

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ  
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ІНСТИТУТ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
У СФЕРІ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БАЛЛО ЯРОСЛАВ В'ЯЧЕСЛАВОВИЧ**

УДК 614.841.334.1

**ДИСЕРТАЦІЯ**

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

21.06.02 – пожежна безпека  
(261 – пожежна безпека)

Подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

 Ярослав БАЛЛО

Перший примірник дисертації є  
ідентичний за змістом з усіма іншими  
примірниками дисертації

Вчений секретар  
канд. техн. наук доц. Дмитро КОБИЛКІН

Львів - 2024



## АНОТАЦІЯ

*Балло Я.В.* Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями будівель. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (261 – Пожежна безпека). – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ, 2024.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огороджувальних конструкцій будівель та фасадних протипожежних перешкод на процеси поширення пожежі по їх поверхні, як теоретична база для можливості запобігання поширення пожежі по негорючим фасадам будівель. Це дозволило створити науково-методичний апарат, який об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

Значна кількість пожеж поширюється між поверхами будівлі ззовні по її фасаду, з подальшим поширенням в середину приміщення через руйнування зовнішніх огороджувальних конструкцій або через руйнування світлових прорізів, в тому числі вікон. При цьому, в низці випадків фасадні системи або їх облицювання було виконано із негорючих матеріалів.

Запобігання поширення пожежі по зовнішнім будівельним конструкціям є однією із основних вимог та показників безпеки будівель і споруд, пов'язаних із їх суттєвими експлуатаційними характеристиками, а

також впливає на забезпечення вимог по обмеженню поширення вогню на сусідні будівлі і споруди та поширення вогню і диму всередині об'єкту.

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

Аналіз існуючих методів дослідження ефективності обмеження поширення пожежі по фасадам будівель показав наступні їх недоліки:

- існуючі методи оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем не передбачають можливість дослідження фасадних систем комбінованого типу виконання та не враховують їх конструктивні параметри;
- відсутня можливість врахування умов поширення пожежі для різних кутів прилягання суміжних площин фасадів;
- досліджувані фрагменти фасадної системи не в змозі змінювати кут площини фасаду відносно вертикалі для імітації кутів нахилу фасадів будівель;
- відсутня можливість досліджувати ефективність фасадних протипожежних перешкод різного типу для обмеження поширення пожежі.

Під час розроблення науково-методичної та експериментальної бази щодо можливості запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та здійснення оцінювання

ефективності заходів щодо її обмеження визначено перелік наступних найбільш впливових чинників:

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

Можливість дослідження взаємного впливу зазначених критеріїв на закономірності зміни температур на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій під час пожежі можна реалізувати використовуючи математичні моделі теплообміну між джерелом пожежі та об'єктом опромінення за методами газодинаміки та математичної моделі процесів теплообміну між факелом пожежі та досліджуваними об'єктами у сукупності із рівнянням променистого теплообміну. Дані методи дають змогу точно враховувати величину пожежної навантаги у будинку, параметри світлових прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, конструктивні параметри фасадів (кути ухилу, нахилу та прилягання суміжних площин в разі їх наявності) та фасадні протипожежні перешкоди.

На основі проведених розрахункових дій з урахуванням найбільш несприятливих сполучень чинників впливу показана висока ефективність газо-гідродинамічних моделей, які дозволяють прогнозувати обмеження поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель протипожежними перешкодами на прикладі моделі із зовнішнім джерелом пожежі, внутрішнім джерелом пожежі та при наявності активних та пасивних фасадних протипожежних перешкод. При цьому доведено, що визначені параметри, а саме коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, величина пожежного навантаження, кути нахилу фасаду, кути прилягання суміжного фасаду та наявність фасадних протипожежних

перешкод впливають на значення температури на поверхні фасадів будівель та відповідно на процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями. На основі вищенаведеного, зроблено припущення про можливість використання удосконаленого підходу з визначення температури полум'я біля поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій заснованого на застосуванні уточнюючих емпіричних коефіцієнтів, що дозволять більш точно та комплексно прогнозувати можливість поширення пожежі по фасадам будівель та здійснювати оцінку ефективності інтегрованих фасадних протипожежних перешкод.

На основі розробленої програми експериментальних досліджень прогнозування запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям запропоновано новий підхід, який ґрунтується на відтворенні конструктивних параметрів фрагменту фасадної системи та найбільш несприятливих умов розвитку пожежі, а не адаптації фасадних систем та будівельних матеріалів їх облицювання до існуючих стандартизованих стендів, установок та фрагментів будинків для проведення імітаційних випробувань. Даний підхід обумовлений тим, що використання негорючих матеріалів в конструкції зовнішніх вертикальних огорожувальних конструкцій не може забезпечити обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи, і є лише вторинним чинником, який в більшій мірі впливає лише на швидкість можливого поширення пожежі на вище розташовані поверхи.

Проведено експериментальне дослідження процесів теплового впливу пожежі, яким є модельне вогнище пожежі класу В з пожежною навантагою до  $2290 \text{ МДж/м}^2$  на фрагмент негорючого фрагменту фасаду будинку при умові коли опромінювання відбувається через віконний проріз на вище розташований фасад будівлі на висоті влаштування термопар 0 мм, 400 мм, 800 мм та 1400 мм.

Встановлено, що на рівні віконного прорізу (1400 мм від рівня верхнього краю вогневої камери) у фрагменті фасаду розміщеного під кутом

нахилу  $0^\circ$  відносно вертикалі у продовж 30 хвилинного впливу модельного вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою до  $2290 \text{ МДж/м}^2$  на досліджуваний зразок зовнішніх огорожувальних конструкцій значення температури становить в межах  $375\text{-}400^\circ \text{C}$  в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері, а саме з 500 по 1500 секунди. В цей же час, для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду розміщеного під кутом нахилу  $+20^\circ$  відносно вертикалі значення температури в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах  $550\text{-}600^\circ \text{C}$ . Для фрагменту фасаду розміщеного під кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі значення температури складає в межах  $180\text{-}210^\circ \text{C}$ .

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що нахил досліджуваного фрагменту фасадної системи значно впливає на процеси поширення пожежі, а саме, зміна температури на поверхні фасаду в залежності від кута нахилу чи схилу може змінюватися фактично 2,5-2,9 рази, як в сторону збільшення так і зменшення.

Експериментально доведено, що наявність зовнішньої протипожежної перешкоди, а саме протипожежного карнизу із мінімальною шириною виступу 300 мм забезпечує зниження значення температури на поверхні фасаду розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі на рівні 400 мм від рівня верхнього краю вікна нижче розташованого поверху з  $680\text{-}820^\circ \text{C}$  до  $390\text{-}420^\circ \text{C}$ .

Визначено, що окрім нахилу площини фасадної системи значний вплив на процеси поширення пожежі створюють суміжні площини фасадів, які під певним кутом прилягають до основної площини, а саме прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $90^\circ$  відносно основної площини впливає на збільшення температури на поверхні фасаду до 2 разів у порівнянні із випадком коли прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини.

Отримані залежності описується поліноміальною залежністю зміни температури вздовж осі фасаду та виражаються формулою

$T_z = (T_w - T_0)[1 - 0,4725(L_f \cdot wt/Q)] + T_0$ , (К) із застосуванням отриманих емпіричних коефіцієнтів, що враховують вплив конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на процеси зміни температурних біля поверхні вище розташованої зовнішньої огорожувальної конструкції.

Розроблено газо-гідродинамічну модель установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівлі від теплового впливу факела пожежі, яким є модельне вогнище пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup>. За результатом оцінки її адекватності визначено, що абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 38,2 °С, що відсоткових показниках не перевищує 11,7 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 3÷8 °С, що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність створеної математичної моделі та кожного окремого експериментального дослідження

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

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

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

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

В результаті проведених досліджень вирішена актуальна науково-прикладна проблема у сфері пожежної безпеки, а саме розкриття закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні під час пожежі як теоретична база для прогнозування запобігання



поширення пожежі по негорючим фасадам будівель. Це дозволило розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями та здійснення комплексного оцінювання ефективності систем перешкоджання поширення вогню.

**Ключові слова:** фасадні пожежі, поширення пожежі, температура, тепловий вплив, теплопередача, поширення пожежі, навантага, математична модель, тепловий розподіл, фасадні протипожежні перешкоди.

## SUMMARY

**Ballo Y.V.** Development of scientific foundations of preventing the spread of fire by external enclosing structures of buildings. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation work for the competition of the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) specialty 21.06.02 – «Fire safety» (261 – Fire safety). – Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific and applied problem in the field of fire safety - revealing the regularities of the influence of the parameters of external enclosing structures of buildings on the processes of temperature changes on their surface as a theoretical basis for preventing the spread of fire on non-combustible facades of buildings. This made it possible to develop a new experimental method of forecasting the spread of fire through external enclosing structures of buildings and to evaluate the effectiveness of measures to limit it. The work investigated the effectiveness of active and passive facade fire barriers installed on the external enclosing structures of buildings.

A significant number of fires spread between the floors of the building from the outside along its facade, with subsequent spread into the interior due to the destruction of external enclosing structures or due to the destruction of light openings, including windows. At the same time, in a number of cases, facade systems or their cladding were made of non-combustible materials.

Prevention of the spread of fire through external vertical building structures is one of the main requirements and safety indicators of buildings and structures related to their essential operational characteristics, and also affects the provision of requirements for limiting the spread of fire to neighboring buildings and structures and the spread of fire and smoke inside object

The analysis of existing methods for determining the effectiveness of limiting the spread of fire on the external enclosing structures of the building and substantiating the safety of the use of materials for facing facades showed that today there are about 14 methods in the world, including the domestic DSTU 9072:2021, which are standardized and used in 29 European countries 6 countries of Asia, as well as in the USA and Australia. The existing methods and the corresponding test facilities differ both in terms of scale and design, which significantly affects the accuracy of the test results of facade systems in relation to fire hazards, while the applicability of these methods in a number of research works is a subject of discussion, which determines their constant improvement process.

An analysis of the existing methods of researching the effectiveness of limiting the spread of fire on the facades of buildings showed the following shortcomings:

- the existing methods of assessing the fire hazard of facade systems do not provide for the possibility of examining facade systems of the combined type of execution and do not take into account their design parameters;
- there is no possibility of taking into account the conditions of fire propagation for different angles of adjacency of adjacent facade planes;
- the investigated fragments of the facade system are not able to change the angle of the facade plane relative to the vertical to simulate the angles of inclination of the facades of buildings;
- there is no possibility to investigate the effectiveness of facade fire barriers of various types to limit the spread of fire.

During the development of the foundations of a comprehensive approach to the possibility of preventing the spread of fire by external vertical enclosing structures of buildings and the evaluation of the effectiveness of measures to limit it, a list of the following most influential factors was determined:

- structural parameters of inter-floor window partitions;
- coefficient of openings in external enclosing structures;
- amount of fire load;
- angles of inclination of the facade;
- adjacent facade angles;
- duration of irradiation of the floor located above;
- presence of facade fire barriers.

The possibility of researching the mutual influence of the specified criteria on the patterns of temperature changes on the surface of vertical building structures during a fire can provide the use of a mathematical model of heat exchange between the fire source and the object of irradiation using gas dynamics methods and a mathematical model of heat exchange processes between the fire torch and the investigated objects as a whole with the radiant heat transfer equation. This approach makes it possible to accurately take into account the size of the fire load in the building, the parameters of the light openings in the external enclosing structures, the structural parameters of the facades (angles of inclination, inclination and adjacency of adjacent planes in case of their presence) and facade fire barriers.

On the basis of the calculated actions, taking into account the most unfavorable combinations of influencing factors, the high efficiency of mathematical models is shown, which allow predicting the limitation of the spread of fire by external enclosing structures of buildings by fire barriers, using the example of a model with an external fire source, an internal fire source, and in the presence of active and passive facade fire barriers. At the same time, it was proved that the defined parameters, namely the coefficient of openings in external enclosing structures, the magnitude of the fire load, the angles of inclination of the facade, the adjacency angles of the adjacent facade and

the presence of facade fire barriers affect the temperature value on the surface of the facades of buildings and, accordingly, the processes of fire propagation through external enclosing structures constructions Based on the above, a conclusion was made about the possibility of using an improved approach to determine the flame temperature on the surface of vertical building structures based on the application of clarifying empirical coefficients.

On the basis of the developed methodology of experimental studies of forecasting the prevention of the spread of fire through external enclosing structures, a new approach is proposed, which is based on the reproduction of the structural parameters of a fragment of the facade system and the most unfavorable conditions for the development of fire, and not on the adaptation of facade systems and building materials for their cladding to existing standardized stands, installations and fragments of houses for simulation tests. This approach is due to the fact that the use of non-combustible materials in the construction of external vertical enclosing structures cannot limit the spread of fire to higher floors, and is only a secondary factor, which to a greater extent affects only the speed of the possible spread of fire to higher floors.

An experimental study of the processes of the thermal effect of a fire, which is a model fire of class 34 B on a fragment of a non-combustible facade of a building, was carried out under the condition that irradiation occurs through a window opening on the facade of the building located above at a height of thermocouples of 0 mm, 400 mm, 800 mm and 1400 mm.

It was established that at the level of the window opening (1400 mm from the level of the upper edge of the fire chamber) in the fragment of the facade placed at an angle of 0° relative to the vertical, during the 30-minute exposure of the model hearth of a class 34B fire to the studied sample of external enclosing structures, the temperature value is in the range of 375-400°C at the moment of peak values of the temperature regime in the fire chamber, namely from 500 to 1500 seconds. At the same time, for the same thermocouples located in the fragment of the facade placed at an angle of +20° relative to the vertical, the

temperature value at the moment of the peak values of the temperature regime in the fire chamber is within 550-600°C. For a fragment of the facade placed at an angle of -20° relative to the vertical, the temperature value is within 180-210°C.

The obtained data allow us to conclude that the slope of the investigated fragment of the facade system significantly affects the processes of fire propagation, namely, the temperature change on the surface of the facade, depending on the angle of inclination or slope, can actually change 2.5-2.9 times, as in the direction of increase and decrease.

It has been experimentally proven that the presence of an external fire barrier, namely a fire curtain with a minimum projection width of 300 mm, ensures a decrease in the temperature value on the surface of the facade placed at an angle of 0° relative to the vertical at the level of 400 mm from the level of the upper edge of the window below the floor located from 680-820°C to 390-420°C.

It was determined that, in addition to the inclination of the plane of the facade system, the adjacent planes of the facades, which are adjacent to the main plane at a certain angle, have a significant influence on the processes of fire propagation, namely, the adjacent part of the facade placed at an angle of 90° relative to the main plane affects the increase in temperature on the surface of the facade up to 2 times in comparison with the case when the adjacent part of the facade is placed at an angle of 180° relative to the main plane.

The given data on temperature distributions on the surface of external vertical enclosing structures were obtained at an average value of the fire load of 2290 MJ/m<sup>2</sup> and at an average value of the temperature in the fire chamber during 20 min of tests was 880-920°C when using a model fire source of 34B.

The obtained dependencies are described by the polynomial dependence of the temperature change along the axis of the facade and are expressed by the formula  $T_z = (T_w - T_0)[1 - 0,4725(L_f \cdot w_t / Q)] + T_0$ , (K) with the use of the obtained empirical coefficients, which take into account the influence of the parameters of external enclosing structures on the processes of temperature changes near the surface of the external enclosing structure located above.

A mathematical model of the installation was developed for predicting the spread of fire along the external vertical enclosing structures of the building from the thermal effect of the fire torch, which is a model fire source of class 34 B. According to the result of the assessment of its adequacy, it was determined that the absolute deviations between the results of mathematical modeling and the averaged experimental studies do not exceed 38.2 °C, which in percentage terms does not exceed 11.7%, the root mean square deviations are within 3÷8 °C, which indicates that the data of mathematical modeling are as close as possible to the averaged data of the experiment, which confirms the general convergence of the created mathematical model and each individual experimental study.

A methodology for calculating the spread of fire through the external vertical enclosing structures of buildings has been developed, which includes a calculation-table method of assessing the possibility of preventing the spread of fire along the facade; a simplified evaluation method which is based on the equation for determining the thermal impact for external structures using empirically determined coefficients that take into account the influence of the parameters of external enclosing structures on the temperature change on their surface, the field method and the method of natural simulation tests.

A reference table has been developed for forecasting the possibility of preventing the spread of fire by external vertical enclosing structures of buildings and evaluating the effectiveness of measures to limit it depending on the design parameters of external vertical enclosing structures of buildings.

A scientific-methodological basis for calculation substantiation of the conditions for limiting the spread of fire is proposed, and the criteria characterizing the danger of fire spread by external enclosing building structures, which became the basis for the development of the national standard DSTU 9192:2022 «Fire safety. Design of high-rise public buildings with a conditional height from 100 m to 150 m» and development of a project of amendments to DBN V.2.6-33:2018 «Constructions of external walls with facade thermal insulation. Design requirements, arrangement».

The evaluation of the economic effect and the cost evaluation of the results of the implementation of the developed method of preventing the spread of fire by external enclosing structures was carried out on the example of a high-rise public building.

As a result of the conducted research, the actual scientific and practical problem of revealing the regularities of the impact of the structural parameters of the external enclosing structures of buildings on the processes of temperature changes on their surfaces during a fire was solved as a theoretical basis for predicting the prevention of the spread of fire on non-combustible facades of buildings. This made it possible to develop a methodology for calculating the spread of fire by external enclosing structures and to carry out a comprehensive assessment of the effectiveness of systems for preventing the spread of fire.

**Key words:** facade fires, fire spread, temperature, thermal effect, heat transfer, fire spread, load, mathematical model, thermal distribution, facade fire barriers.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІ

*Статті у періодичних виданнях,  
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,  
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних  
Scopus та/або Web of Science Core Collection*

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

3. **Ballo Y.**, Nizhnyk, V., Veselivskyy R., Kagitin O. Influence of the facade slope on fire propagation processes on higher floors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023 Vol.5 10 (125), P. 43–52. (Scopus Q3).

***Статті в наукових періодичних виданнях інших держав***

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

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

5. Сізіков О. О., **Балло Я. В.**, Добряк Д. О. та ін. До питань розрахунку протипожежного водозабезпечення об'єкта після реконструкції. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2018. 1 (5). С 26-31.

6. Сізіков О. О., Ніжник В. В., **Балло Я. В.** та ін. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2019. 2 (8). С 41-49.

7. Ніжник В. В., **Балло Я. В.**, Поздєєв С. В., Некора В. С. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією. *Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування КНУБА*. Київ, 2019. №69. С. 278-290.

8. Сізіков О. О., **Балло Я. В.**, Голікова С. Ю., Жихарев О. П. Визначення процедури проведення суб'єктом управління пожежною безпекою внутрішнього аудиту з оцінки протипожежного стану об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. – Київ, 2020. №1(9). С. 84-93.

9. Фещук Ю. Л., Ніжник В. В., **Балло Я. В.** Аналіз закордонних нормативних документів щодо вимог пожежної безпеки під час проектування



висотних громадських будинків *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. Т. 4, №2 . С. 77-88.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### ***Патенти на корисну модель***

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

#### ***Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації***

21. Nizhnyk V., **Ballo Y.**, Pozdieiev S., Borovykov V., Feshchuk Y. Simulation of thermal impact of flames coming from class “B” test fire on the elements of the adjacent facilities *International Scientific Journal «Internauka»*. Київ, 2019. №14 (76). С. 39-44.

#### ***Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

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

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

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

25. **Балло Я. В.**, Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Гордєєв П. М. Вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі в висотних будинках *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*, м. Черкаси, 2020. С. 139-141.

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

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

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

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

30. A Borysova, V Nizhnyk, **Ya Ballo**, O Kyrychenko Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated cardboard. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport» (Scopus)*, Kharkiv, 2021. С. 1-7.

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

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

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

34. **Балло Я. В.**, Нікулін О. Ф., Уханський Р. В., Яковчук Р. С. Удосконалення вимог пожежної безпеки в рамках закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» *Зб. наук. праць Всеукраїнської*

науково-практичної конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення». м. Львів, ЛДУ БЖД, 2022. С. 188-190.

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

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

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

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

39. **Ballo Y.**, Yakovchuk R., Kovalchuk V., Nizhnyk V., Veselivskyi R. Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings. *AIP Conference Proceedings.* (Scopus). 2023. Vol. 2684 (1), p. 1-9.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	28
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ.	45
1.1 Аналіз статистичних даних про фасадні пожежі та наслідки від них на об'єктах з різними типами фасадних систем.....	45
1.2 Типи фасадних систем будівель та аналіз можливих заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі по ним.....	49
1.3 Конструктивні та інженерні заходи обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями для різних типів фасадних систем.....	59
1.4 Аналіз методів натурних випробувань щодо оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі.....	67
1.5.1 Методика SP Fire 105 (Швеція).....	67
1.5.2 Методика BS 8414 (Велика Британія, Ірландія, Японія, Китай, Австралія).....	70
1.5.3 Методика CAN/ULC S-134 (Канада) та NFPA 285 (США)...	75
1.5.4 Методика DIN 4102-20 (Швейцарія, Німеччина).....	78
1.5.5 Методика ÖNORM B 3800-5 (Швейцарія, Австрія).....	80
1.5.6 Методика JIS A 1310 (Японія).....	82
1.5.8 Методика LEPIR2 (Франція).....	84
1.5.8 Методика ГОСТ 31251 (Азербайджан, Казахстан, росія, Молдова).....	88

1.5.9	Методика MSZ 14800-6:2009 Метод випробування поширення вогню на фасадах будівель (Угорщина).....	90
1.5.10	Методика ДСТУ 9072:2021 Метод натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню (Україна).....	93
1.6	Узагальнення характеристик методик натурних випробувань щодо оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі.....	95
1.7	Висновки до розділу 1.....	107
РОЗДІЛ 2	ТЕОРЕТИЧНІ МЕХАНІЗМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЛІ...	112
2.1	Теоретичні методи прогнозування поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями будівель.....	112
2.2	Оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі за допомогою обчислювальних методів комп'ютерної математики.....	131
2.3	Числова реалізація рівнянь математичних моделей поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям.....	137
2.4	Критерії поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям будівель.....	156
2.5	Висновки до розділу 2.....	167
РОЗДІЛ 3	ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІКИ .....	171
3.1	Моделювання процесів поширення пожежі по зовнішнім	

огороджувальним конструкціях при її зовнішньому осередку утворення.....	171
3.1.1 Загальний опис сценарію аварійної ситуації та розрахункові параметри.....	172
3.1.2 Результати розрахунку для моделі із зовнішнім джерелом пожежі.....	177
3.2 Моделювання процесів поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціях при її внутрішньому осередку утворення.....	183
3.2.1 Загальний опис сценарію пожежі та розрахункові параметри моделювання.....	185
3.2.2 Результати розрахунку для моделі із зовнішнім джерелом пожежі.....	187
3.2.3 Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі по фасадним конструкціям висотних будинків.....	192
3.3 Моделювання впливу пожежі у фасадній частині будинку з внутрішнім замкнутим двором (атріумом) на протилежно розташований фасад.....	198
3.3.1 Опис конструктивних особливостей Об'єкту та формування сценарію пожежі.....	199
3.3.2 Результати моделювання впливу фасадної пожежі у внутрішньому замкнутому дворовому просторі будівлі.....	202
3.4 Моделювання обмеження поширення пожежі за допомогою активних фасадних протипожежних перешкод.....	205
3.5 Висновки до розділу 3.....	210
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ПО ЗОВНІШНІМ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМ КОНСТРУКЦІЯМ.....	212



4.1	Обґрунтування характеристик та конструктивних параметрів випробувальної установки.....	212
4.2	Програма експериментальних досліджень з оцінки обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на зовнішні огорожувальні конструкції...	219
4.3	Створення експериментальної установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель.....	233
4.4	Висновки до розділу 4.....	245
РОЗДІЛ 5	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ.	247
5.1	Результати експериментальних досліджень процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям.....	247
5.2	Результати експериментальних досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям пасивними фасадними протипожежними перешкодами.....	264
5.3	Результати експериментальних досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям фасадною протипожежною перешкодою активного типу.....	269
5.4	Висновки до розділу 5.....	275
РОЗДІЛ 6	РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ.....	277
6.1	Створення газогідродинамічної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель.....	277

6.2	Дослідження закономірностей впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні.....	298
6.3	Дослідження закономірностей обмеження поширення пожежі за допомогою фасадних протипожежних перешкод.	305
6.4	Висновки до розділу 6.....	310
РОЗДІЛ 7 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ.		313
7.1	Розрахунок поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель за спрощеним розрахунковим методом.....	313
7.2	Розрахунково-табличний метод оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель.....	322
7.3	Методологічні основи оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель із використанням польових моделей.....	325
7.4	Оцінка економічного ефекту та вартісна оцінка результатів застосування науково-методичного апарату розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель на прикладі висотної будівлі.....	330
7.5	Висновки до розділу 7.....	339
ВИСНОВКИ.....		341
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....		345
ДОДАТКИ.....		382
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....		382
ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації.....		389

ДОДАТОК В Акти впровадження результатів дисертації.....	391
ДОДАТОК Г Патент на корисну модель «Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель».....	398

## Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів

Фасадна протипожежна перешкода - об'ємний елемент частини зовнішньої огорожувальної конструкції з нормованим класом вогнестійкості, яка призначена для запобігання поширення пожежі по фасаду будівлі та в середину приміщень вище розташованих поверхів будівлі (протипожежні карнизи, протипожежні віконні карнизи, протипожежний міжповерховий віконний простінок).

Протипожежний віконний карниз - будівельна конструкція, яка виступає за межі фасаду будівлі, має нормований клас вогнестійкості та призначена для запобігання поширення пожежі через вікна та\або світлові прорізи на вище розташовану частину будівлі.

Протипожежний міжповерховий віконний простінок - несуча зовнішня огорожувальна конструкція будівлі з нормованим класом вогнестійкості або фрагмент несучої стіни, що суцільно розділяє суміжні світлопрозорі елементи

Розрахункова температура - температура, що визначена розрахунковим методом.

Коефіцієнт врахування площі світлових прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будівлі – співвідношення площі прорізів у зовнішній огорожувальній конструкції будівлі до площі огорожувальної конструкції в цілому.

Коефіцієнт безпеки (запасу) – відносний показник, на який додатково збільшують розраховану мінімально необхідну відстань.

$K_6$  – коефіцієнт безпеки (запасу).

$O$  – коефіцієнт, який дозволяє врахувати фактичну площу прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будівлі.

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання поверхні.

$A_f$  – площа поверху будівлі в межах її протипожежного відсіку,  $m^2$ .

$A_s$  – площа поверхні конструкції, яка під час моделювання пожежі випромінює тепло,  $m^2$ .

$A_t$  – сумарне значення площі зовнішніх огорожувальних конструкцій (враховуючи світлові прорізи),  $m^2$ .

$A_{t1}$  – сумарне значення площі зовнішньої огорожувальної конструкції (враховуючи світлові прорізи) будинку, в якому моделюється виникнення пожежі та який протилежний сусідній споруді, яка сприймає пожежу,  $m^2$ .

$A_v$  – сумарне значення площі світлових прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях споруди,  $m^2$ .

$A_{v1}$  – сумарне значення площі світлових прорізів у стіні будівлі, в якій виникла пожежа та яка протилежно розташована відносно сусідньої споруди, що сприймає тепло,  $m^2$ .

$L_f$  – довжина поверхні конструкції, яка випромінює тепло в результаті пожежі, м.

$L_H$  – горизонтальна проекція поверхні конструкції, яка випромінює тепло в результаті пожежі, м.

$L_L$  – висота поверхні конструкції, яка випромінює тепло в результаті пожежі, м.

$Q$  – пожежна навантага в об'ємі приміщень протипожежного відсіку будівлі, Дж/ $m^2$ .

$R_1$  – фактична (проектна) протипожежна відстань між спорудами, м.

$R$  – розрахункова протипожежна відстань між спорудами ( $R_{1,2}$  – розрахункова протипожежна відстань для різних сценаріїв виникнення пожежі у будівлі), м.

$T_0$  – початкова температура повітря,  $^{\circ}C$ .

$T_d$  – максимально допустима температура,  $^{\circ}C$ .

$T_3$  – критична температура займання матеріалу,  $^{\circ}C$ .

$T_p$  – розрахункова температура,  $^{\circ}C$ .

$T_f$  – температура поверхні конструкції, що випромінює тепло,  $^{\circ}C$ .

$T_s$  – початкова температура на поверхні конструкції сусіднього об'єкту, що опромінюється в наслідок пожежі  $^{\circ}C$ .

$T_H$  – температура середовища, в яке передається тепло від поверхні конструкції суміжного об'єкту, що опромінюється теплом, °С.

$HRR$  – інтенсивність тепловиділення при пожежі, кВт/м<sup>2</sup>;

$W$  – ширина поверхні конструкції, що випромінює тепло, м.

$W_1$  – ширина зовнішньої огорожувальної конструкції будівлі, в якій виникла пожежа протилежна суміжній споруді, що сприймає тепло, м.

$W_2$  – ширина зовнішньої стіни будівлі, в якій виникла пожежа та перпендикулярна до стіни, яка протилежна суміжній споруді, яка сприймає тепло, м.

$W_i$  – ширина  $i$ -го прорізу, м.

$W_t$  – сумарна ширина світлових прорізів, м.

$c_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг·°С).

$h_{eq}$  – середнє значення висоти прорізів, м.

$\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·°С.

$\delta$  – товщина матеріалу або речовини, що застосовуються у будинку, який опромінюється теплом, м.

$\varepsilon_f$  – ступінь чорноти полум'я пожежі.

$\varepsilon_m$  – ступінь чорноти поверхні матеріалу (речовини).

$\sigma$  – стала Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

$q$  – кількість теплоти, яка передається в наслідок пожежі, Вт.

$t$  – розрахункова тривалість теплового опромінювання об'єкту, с.

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·°С).

$\rho$  – густина матеріалу або речовин, кг/м<sup>3</sup>.

## ВСТУП

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

Разом із тим, запобігання поширення пожежі по зовнішнім вертикальним будівельним конструкціям є однією із основних вимог та показників безпеки будівель і споруд, пов'язаних із їх суттєвими експлуатаційними характеристиками, що в свою чергу впливає на забезпечення вимог по обмеженню поширення вогню на сусідні будівлі і споруди та поширення вогню і диму всередині об'єкту.

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

дослідження, спрямовані на підвищення ефективності засобів з обмеження поширення пожежі по фасадах будівель або пошукам шляхів забезпечення ефективності систем їх пожежогасіння наведено в роботах Ковалишина В. В., Антонова А. В., Баланюка В. М., Kawagoe K., Oleszkiewicz I. Tang M. Слід зазначити, що в наведених роботах поза увагою залишилися процеси оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель та не розглядалось питання щодо обґрунтування характеристик конструктивних та інженерних заходів для запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальним конструкціями.

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

Існуючі методи оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем не передбачають можливість оцінювати обмеження поширення пожежі для фасадних систем комбінованого типу та не враховують їх конструктивні параметри, зокрема, кути прилягання суміжних площин фасадів та кути нахилу площини фасаду відносно вертикалі. Окрім цього, відсутня можливість оцінювання ефективності фасадних протипожежних перешкод різного типу для обмеження поширення пожежі. Відсутність обґрунтованих критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі по фасадах будівель та зазначені недоліки не дозволяли проводити комплексне



оцінювання можливості поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям із врахуванням взаємозв'язків найбільш значущих чинників, що впливають на поширення пожежі по фасадам або на її обмеження.

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

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертація виконана згідно з основними напрямками наукової діяльності ІДУ НД ЦЗ в рамках Переліку розробок на створення науково-технічної продукції з нормування у сферах будівництва та житлової політики на 2022 рік за бюджетною програмою КПКВК 2751030 затвердженого наказом Мінрегіону № 20 від 31.01.2022, Програми робіт з національної стандартизації на 2021 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 18 березня 2021 року № 91, Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2025 року затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17.11.2020 № 443, замовленнями Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи, які виконано в УкрНДНЦ та ІДУ НД ЦЗ за участю здобувача у якості керівника роботи,

результати яких використано в дисертації: «Провести дослідження та встановити загальні положення системи управління пожежною безпекою об'єкта» (ДР № 0118U003463), «Обґрунтування вимог щодо оцінки стану пожежної безпеки об'єкта захисту» (ДР № 0119U102482), «Наукове обґрунтування вимог пожежної безпеки для громадських будинків з умовною висотою від 100 до 150 м» (ДР № 0120U101693), «Обґрунтування параметрів прогнозування можливості запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» (ДР № 0122U200790).

**Ідея роботи** полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та фасадних протипожежних перешкод на процеси поширення пожежі по їх поверхні, як теоретична база для можливості запобігання поширення пожежі по негорючим фасадам будівель.

**Мета і завдання дослідження** полягає у виявленні закономірностей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі, як наукове підґрунтя для встановлення вимог пожежної безпеки до будівель.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

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

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

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

- розробити програму експериментальних досліджень процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі та ефективності застосування фасадних протипожежних перешкод для обмеження пожежі;

- створити установку прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям для проведення експериментальних досліджень та провести відповідні експериментальні дослідження за розробленою програмою;

- на основі отриманих результатів експериментальних досліджень виявити залежності зміни температур на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, проаналізувати виявлені залежності та здійснити їх кореляційний аналіз;

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

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

- на основі визначених взаємозв'язків та чинників, які впливають на поширення пожежі по фасадам будівель, а також обґрунтованим критеріям що характеризують умови поширення пожежі по фасаду, розробити науково-

методичний апарат, як систему що об'єднує створений метод натурних випробувань та методичне забезпечення для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та оцінити економічний ефект щодо його застосування.

**Об'єкт дослідження** – процеси поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та створення умов запобігання поширення пожежі фасадними протипожежними перешкодами.

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

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

метод із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, обчислювальний метод із використанням польових моделей для оцінювання поширення пожежі по зовнішнім вертикальним конструкціям; метод обчислення значення пожежної навантаги; метод планування, вибору кількості повторюваності та умов проведення дослідів; методи математичної статистики для аналізу отриманих результатів експериментальних вогневих досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертації одержані нові науково обґрунтовані результати, які дозволили вирішити актуальну та сучасну науково-прикладну задачу у сфері пожежної безпеки, яка полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на зміну температур на їх поверхні під час пожежі, як підґрунтя для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі, яка виконана із негорючим облицюванням.

*Вперше отримано наступні наукові результати:*

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

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

3. Розрахунковим методом доведено та експериментально підтверджено, що під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з питомою пожежною навантагою до  $2300 \text{ МДж/м}^2$  значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції від впливу факелу пожежі може змінюватися:

- лінійно з  $210 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  для фасаду будівлі, який знаходиться під кутами нахилу відносно вертикалі від  $-20^\circ$  до  $+20^\circ$  відповідно;

- лінійно з  $440 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  при застосуванні протипожежного карнизу шириною від  $0,3 \text{ м}$  до  $1,5 \text{ м}$ ;

- зменшуватися до  $1,6$  разів при застосуванні протипожежних карнизів обладнаних дренажною системою із мінімальною інтенсивністю зрошення водою  $0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ .

4. Методами комп'ютерного моделювання виявлено закономірність, яка полягає в тому, що протипожежний карниз влаштований на зовнішній огорожувальній конструкції дозволяє знизити значення площі розподілів критичної температури на поверхні фасаду вище розташованого поверху на  $8-15\%$  для кожного кроку збільшення в  $0,1 \text{ м}$  ширини протипожежного карнизу від  $0,3 \text{ м}$  до  $1,5 \text{ м}$ .

*Удосконалено:*

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

2. Науково-методичну та експериментальну базу дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях

будівель, відмінною рисою якої є врахування реальних конструктивних параметрів фасаду будівлі.

*Набули подальшого розвитку:*

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

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

### **Практичне значення отриманих результатів.**

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

Розроблена науково-методична та експериментальна база стала підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо оцінювання процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель і впроваджена при розробці при розробці державних будівельних норм ДБН В.2.2-41:2019 «Висотні будівлі. Основні положення» та

національного стандарту ДСТУ 9192:2022 «Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м».

**Результати дослідження також впроваджені в (Додаток В):**

- у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при викладанні дисципліни «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі», а саме для актуалізації існуючих освітніх програм з врахуванням правових та організаційних засад введення в обіг або надання будівельної продукції на ринку в рамках Стратегії інтеграції України до ЄС (акт від 15.09.2023 року);

- у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України в рамках реалізації Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» та в частині встановлення виражених показників, пов'язаних із суттєвими експлуатаційними характеристиками будівельної продукції (акт від 26.11.2023 року);

- у діяльність АТ «ПОЗНЯКИ-ЖИЛ-БУД» під час використання науково-методичної бази для прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та здійснення оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження під час проектування висотних будинків «TARYAN TOWERS», «JACK HOUSE» (акт впровадження від 10.10.2023);

- у діяльність ПАТ «КиївЗНДІЕП» шляхом використання створеної науково-методичної та експериментальної бази під час розробки Зміни № 1 ДБН В.2.2-15-2019 «Житлові будинки. Основні положення» та Зміни № 1 ДБН В.2.2-9:2018 «Громадські будинки та споруди. Основні положення» акт впровадження від 11.01.2023);

- у наукову діяльність Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту через застосування отриманої методичної бази при оцінюванні процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель (акт впровадження від 26.12.2023).



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

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [1] – проведено дослідження впливу пожежі зовнішньої інженерної установки та оцінено ризик розвитку поширення пожежі по фасаді будівлі; у роботі [2] – проведено моделювання зовнішньої пожежі на прикладі електромобілю та здійснено розрахунок можливих теплових розподілів на фасаді будівлі та потенційних наслідків від її дії; в [3] – проведено дослідження впливу нахилів фасаду на процеси поширення фасадної пожежі; в [4] – проведено моделювання зовнішньої пожежі на технологічній установці здійснено розрахунок негативних наслідків від її дії на фасад суміжно розташованого об'єкту; у [5] – проведено теоретичні дослідження щодо характеру можливої зовнішньої пожежі на об'єкті та аналізу методики визначення необхідної кількості води на її ліквідацію; в [6] – проведено аналіз методів дослідження об'єкту захисту та оцінки його протипожежного стану; в [7] – досліджено сценарії початкового розвитку пожежі у житлових та громадських будинках та обґрунтування її температурного режиму; в [8] – проведено аналіз літературних джерел та обґрунтовано нові методичні підходи процедури проведення оцінки стану об'єкту з питань пожежної безпеки; у [9] – проведено аналіз вітчизняних та закордонних будівельних норм в частині сучасних підходів протипожежного захисту висотних будівель та споруд від фасадних пожеж; у [10] – здійснено аналіз та систематизацію причин та їх наслідків пожеж у висотних будинках; у [11] – дослідження впливу зміни

конструктивних параметрів протипожежних карнизів на процеси обмеження поширення пожежі по фасадах будівель та виявлено шляхи їх удосконалення; у [12] – узагальнено та систематизовано вимоги країн Європи щодо забезпечення пожежної безпеки до фасадних систем будівель різного функціонального призначення; в роботі [13] – проведено FDS моделювання та виявлено залежності впливу конструктивних параметрів протипожежних карнизів на температурні розподіли від дії пожежі на поверхні вище розташованого фасаду; у [14] – обґрунтовано основні вимоги пожежної безпеки до фасадів висотних будівель та запропоновані нові підходи щодо обмеження розвитку фасадних пожеж, які реалізовано у вимогах ДСТУ 9192; в [15] – здійснено аналіз та систематизовано основні чинники, які впливають на розвиток фасадної пожежі або навпаки на її обмеження; у [16] – обґрунтовано протипожежні вимоги до фасадів будівель на яких улаштовується станція зарядки електромобілів; у [17] – здійснено аналіз та систематизовано недоліки основних методів оцінювання пожежної небезпеки фасадних систем; у роботі [20] – презентація результатів конфігурації установки для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель; в [21] – створення математичних моделей тепломасообміну в разі пожежі класу В; в [22] – математичне моделювання пожежі та оцінка потенційних наслідків; в [23] – аналіз результатів досліджень щодо характеру впливу вогнища пожежі класу на процеси поширення пожежі по фасаду будівлі; в [24] – обґрунтовано параметри системи зовнішнього пожежогасіння фасаду та покрівлі будівлі 4 енергоблоку Чорнобильської АЕС; в [25] – проведено моделювання фасадної пожежі та зроблено висновки щодо її наслідків в разі застосування фасадних протипожежних перешкод різних типів та конструктивних параметрів; в [26] – обґрунтовано проблемні аспекти подавання води на пожежогасіння висотних будівель; в [27] – представлення вимог пожежної безпеки для висотних будівель; в [28] – моделювання впливу різних типів фасадних протипожежних перешкод на процес поширення пожежі; у [29] – моделювання впливу конфігурації фасадних протипожежних перешкод на процес поширення пожежі; у [30] – вивчення зміни характеру пожежі під час

вітрового впливу; у [31] – оцінка наслідків від фасадної пожежі в результаті займання кондиціонерного блоку; у [32] – обґрунтування критеріїв, які характеризують небезпеку фасадної пожежі; у [33] – дослідження зміни характеру гасіння фасадної пожежі під час вітрового впливу; в роботі [34] – висвітлено нормативні аспекти забезпечення умов обмеження фасадних пожеж; у [35] – проведено обґрунтування типу модельного вогнища пожежі під час проведення випробувань; у [36] – створення комп’ютерних моделей, що відображають процес поширення фасадної пожежі; у [37] – приведено можливі шляхи удосконалення існуючих методів оцінювання пожежної небезпеки фасадів; у роботі [38] – приведено вплив наявності систем протипожежного захисту на швидкість розвитку пожежі; у роботі [39] – представлення результатів математичного моделювання процесу оцінки ефективності обмеження поширення пожежі при застосуванні протипожежних карнизів. Праці [18;19] підготовлені самостійно.

**Апробація результатів дисертації в (Додаток Б).** Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: XX-й Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2018 р.); XI-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2019 р.); III-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми техногенної та екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (м. Харків, 2019 р.); I-му Львівському науковому форумі міжнародної науково-практичної конференції «Пріоритетні напрямки досліджень в науковій та освітній діяльності» (м. Львів, 2019 р.); XI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2020 р.); VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2020 р.); VI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2021 р.);

VIII-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, 2021 р.); 9-тій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2021 р.); XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2022 р.); VII-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій» (м. Харків, 2022 р.); XII-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2022 р.); III-й Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2022 р.); 3-rd International scientific and practical conference (м. Лондон, 2023); XIV-й Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2023 р.); XVI-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності» (м. Львів, 2023 р.).

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

### **Структура та обсяг роботи**

Дисертація складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 332 найменувань, містить 401 сторінок друкованого тексту (з них 303 сторінок основного тексту), 38 таблиць, 143 рисунки, 4 додатки.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ**

### **1.1. Аналіз статистичних даних про фасадні пожежі та наслідки від них на об'єктах з різними типами фасадних систем**

Закон України «Про надання будівельної продукції на ринку» як основоположний технічний регламент для будівельної продукції, яка вводить в обіг або надається на ринку України [1] регламентує необхідність забезпечення обмеження поширення вогню і збереження несучої здатності конструкції протягом певного проміжку часу. Разом із цим вимоги ДБН В.1.2-7 «Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека» [2] більш детально роз'яснюють концепцію реалізації основної вимоги до виробів, будівель і споруд щодо забезпечення пожежної безпеки, в тому числі обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. Вимоги [2] передбачають, що поширення вогню з одного протипожежного відсіку в інший може відбуватись через зовнішні поверхні фасаду, проте вони не містять критерії, яких слід досягти проектувальнику за для недопущення даної небезпеки або зниження її ймовірності.

Разом із тим, значна кількість пожеж поширюється між поверхами будівлі ззовні по її фасаду та поширюється в середину приміщення через руйнування зовнішніх огороджувальних конструкцій або через руйнування світлових прорізів, в тому числі вікон. Тільки в період 2016-2023 роки кількість таких фасадних пожеж у будинках підвищеної поверховості (вище 26,5 м), висотних будинках (з умовною висотою вище 47 м) в Україні збільшилася фактично вдвічі. При цьому, більш як в 40% таких будинків в яких відбулися пожежі фасад був виконаний з негорючих матеріалів [3]. Аналіз даних щодо фасадних пожеж будівель у світі з 1960-2019 роки [4-5] показав, що якщо у 60-70-тих роках фасадні пожежі здебільшого поширювалися на 10-15 поверхів, то у період 2000-2020-ті роки фасадні

пожежі поширювалися здебільшого на 20-30 поверхів, а для країн середнього сходу на 60-70 поверхів. На рис. 1.1 наведено зведену точкову діаграму статистики поширення пожеж по поверхам у період з 1960-2019 роки для різних країн світу.

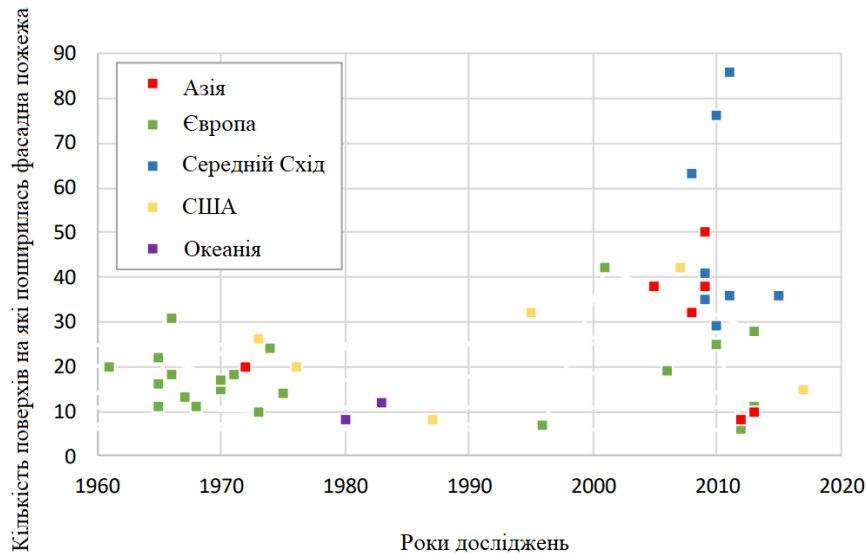


Рисунок 1.1 – Точкова діаграма тенденцій поширення пожеж по поверхам

Згідно аналітичних даних [6] тільки в Європі у продовж 2000-2015 років відбувалося не менше 380-420 резонансних фасадних пожеж щороку, на яких загинуло близько 780 людей. При цьому, 76% пожеж припадає на житловий сектор, 12% на готелі, 10% на офісні будівлі та 2% на інші будівлі за функціональним призначенням. В США згідно даних [7] кількість фасадних пожеж збільшилася з 69 випадків у 1980 році до 260 випадків у 2000 році і 1883 випадків пожеж у 2021 році.

Збільшення кількості поверхів, які охоплювали фасадні пожежі пояснюється збільшенням умовної висоти будівель. Як приклад, в США кількість будинків з умовною висотою вище 47 м згідно даних [8-14] становить близько 8000, в Європі близько 6300 висотних будинків із яких 2435 побудовані в Україні. Саме фасадні пожежі у висотних будинках є одними із найнебезпечніших видів пожеж через складні умови гасіння та сприятливі умови їх поширення, зокрема через вітрові впливи.

Слід відмітити, що форма фасаду будинку, кути прилягання суміжних площин фасадів, горизонтальні кути ухилу та наявність систем пожежогасіння в значній мірі впливають на розвиток пожежі, а відповідно і на наслідки, які вона спричиняє. Як приклад, наявність від'ємних кутів ухилу може спричинити набагато швидше поширення пожежі по фасаді, що було відмічено в проведеному розслідуванні [15]. Пожежа яка виникла в готелі та штаб-квартирі телецентру в Пекіні [16] (TVCC) 2009 рік продемонструвала, що верхня частина будівлі, яка мала від'ємний кут ухилу фасаду фактично за пів години була знищена. На рис. 1.2 наведено фото наслідків описаної пожежі.

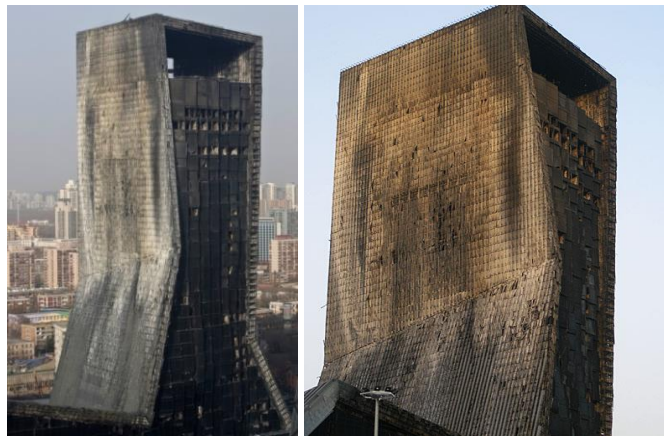


Рисунок 1.2 – наслідки пожежі в готелі штаб-квартирі телецентру в Пекіні

Серед пожеж на неvertикальних фасадах слід відмітити випадок пожежі, який стосується кутового фасаду, а саме 9 жовтня 2020 року виникла пожежа у багатоповерховому житловому будинку у Південній Кореї [17]. Через швидке руйнування склопрозорих елементів фасаду вогонь швидко поширився на верхні поверхи та досяг покрівлі будинку. Серед негативних чинників, які вплинули на швидкий розвиток пожежі було відмічено наявність кутового фасаду, що створював ефект «труби» та вітру, який створював умови посиленої турбулентності горіння полум'я пожежі. На рис. 1.3 наведено фото пожежі та її наслідки.



Рисунок 1.3 – Пожежа та її наслідки в житловому будинку в Південній Кореї

Окремо слід відзначити типи фасадів, форма яких мала позитивний вплив на обмеження розвитку пожежі. Як приклад, в Баку, Азербайджан 20 липня 2012 року горів фасад та дах Культурного центру Гейдара Алієва [18], а 23 серпня 2018 року Crystal Tower в Парелі (Індія) виникла пожежа на 12-му поверсі багатоповерхівки загоряння охопило шахту електропроводки між 12 та 16 поверхами. [19]. Аналіз приведених пожеж показує, що при куті фасаду більше  $90^\circ$  контакт полум'я пожежі із вище розташованою площиною фасаду значно менший і це позитивно впливає на зниження швидкості поширення пожежі. Також позитивно на обмеження поширення пожежі впливає фасад на якому кожен поверх розділяє міжповерхове перекриття, яке виходить за межі площини фасаду будівлі. Дані виступи також значно запобігали швидкому поширенню вогню на вище розташовані поверхи та обмежували контакт відкритого вогню з фасадом будівлі. На рис. 1.4 наведено фото описаних пожеж.



а)



б)

Рисунок 1.4 – Приклади фасадних пожеж, які були обмежені в розвитку за рахунок особливостей форми фасаду: а) пожежа в культурному центрі Гейдара Алієва, б) пожежа в житловому будинку Crystal Tower в Парелі.



Вивчення пожеж показало, що переважно основним чинником поширення пожежі по фасадах будівель та споруд є промениста складова та прямий контакт полум'я пожежі із вище розташованою площиною фасаду. Тобто, форма фасаду та конструктивне виконання фасадної системи може значно впливати на закономірності поширення пожежі. Також важливим елементом обмеження поширення пожежі є виступи за межі площини фасаду, а саме протипожежні карнизи. На сьогоднішній день відсутні залежності, які б визначали мінімально необхідний розмір протипожежних карнизів або їх форму в залежності від типу фасадної системи. Також, залишається не визначеним вплив кутової форми прилеглих площин фасаду будівель, а також кути його ухилу (як позитивні, тобто більше  $90^\circ$  відносно горизонталі так і негативні) на проведення оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів з обмеження поширення пожежі. Реалізація таких методів прогнозування дозволить керувати можливістю обмеження поширення пожежі для будівель і споруд різного функціонального призначення та покращити їх стан протипожежного захисту.

## **1.2. Типи фасадних систем будівель та аналіз можливих заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі по ним**

Визначення закономірностей зміни температур на поверхні вертикальних будівельних конструкцій для забезпечення можливості запобігання поширення пожежі по вертикальних будівельних конструкціях, як підґрунтя для встановлення вимог пожежної безпеки для фасадів будівель обумовлює необхідність аналізу існуючих конструктивних типів основних фасадних систем. Для виявлення критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями та які враховують їх конструктивні та інженерні особливості обґрунтування превентивних протипожежних заходів слід провести систематизацію існуючих типів фасадних систем по конструктивним типам та видам матеріалів з яких вони виконані.

Найбільш поширеним та енергоефективним типом фасадних систем, особливо під час реконструкції існуючих будівель є влаштування так званого «мокрого фасаду», монтаж якого не передбачає посилення несучих стін фасаду. Технологія влаштування «мокрого фасаду» передбачає створення ззовні багатошарового покриття. Технологія передбачає дотримання чіткого порядку нанесення шарів: ґрунтова основа, клеєва суміш, теплоізоляційні плити, армована сітка, штукатурка та фарбування [20]. На рис. 1.5 наведено приклад влаштування «мокрого фасаду» та специфікація шарів фасадної системи.

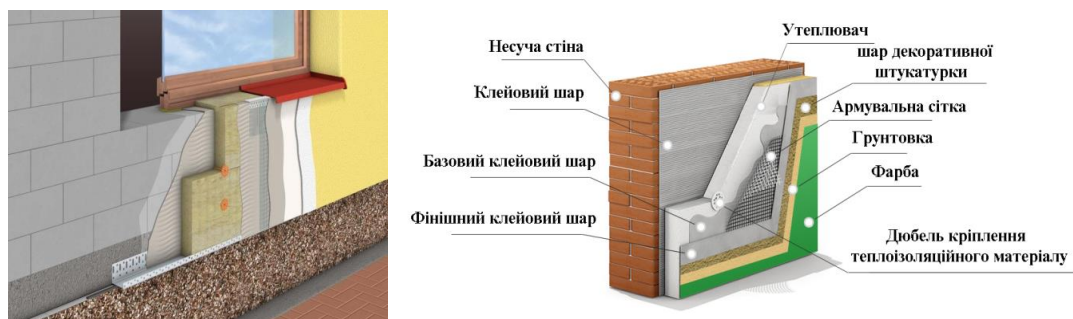


Рисунок 1.5 – специфікація конструктивних елементів фасадної системи «мокрого типу»

Даний тип фасаду найбільш застосований під час реконструкції або капітального ремонту 5-ти - 9-ти поверхових серійних панельних будинків та блокованих цегляних будинків. Окрім цього, даний тип фасадних систем застосовується для цегляних 12-ти та 16-ти поверхових будинків або будинків із збірного залізобетону [20].

Пожежна небезпека даного типу фасадних систем полягає у можливості застосування утеплювача, що не відповідає вимогам пожежної безпеки за показниками горючості, поширення полум'я, займистості тощо для матеріалів фасадів в залежності від функціонального типу будинку згідно норм [13; 21-22], а також використання неякісних кріпильних елементів та порушення технології монтажу, що може створити відшарування фрагментів

фасадних систем та створювати «повітряні кармани» під шаром конструкції фасаду.

Серед конструктивних переваг «мокрого фасаду», які можуть впливати на пожежну безпеку слід відмітити наявність додаткового теплоізоляційного шару покриття, яке при дотриманні належної технології нанесення забезпечує додаткову термо- ізолюючу та вогнестійку здатність зовнішніх огорожувальних конструкцій.

На рис. 1.6 наведено приклади «мокрого фасаду» в новій будівлі та фрагмент утеплення «мокрим фасадом» існуючої будівлі панельного типу.

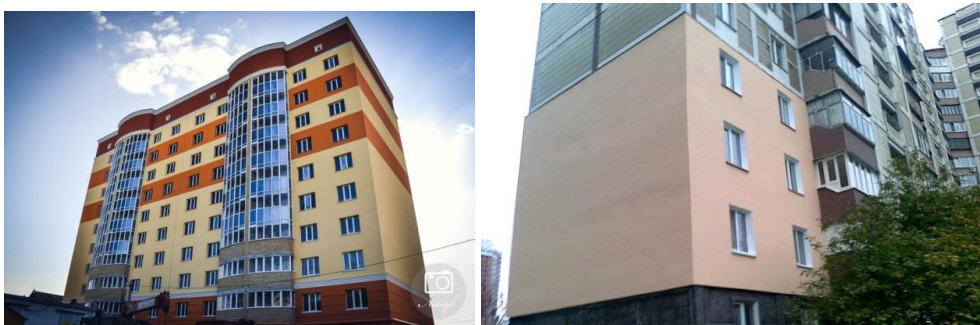


Рисунок 1.6 – Приклад будинків із використанням «мокрого типу» фасаду

До «Сухих фасадів» відносяться системи, які монтуються без використання багатoshарових клейових та інших будівельних розчинів, а більшість елементів фасаду кріпляться за допомогою механічних кріпильних засобів, а саме дюбелів, анкерів, металопрофілів, саморізів тощо. Наприклад, сухим можна вважати сайдинговий фасад або навісний вентиляований фасад виконаний із: алюмінієвих касет, металопрофілів, керамогранітних, керамічних, клінкерних плит, композитних листів або штучних чи природних каменів.



Рисунок 1.7 – Приклад «сухого фасаду» із навісними елементами

Даний тип фасадних систем є одним із пожежонебезпечних, через наявність повітряного прошарку, можливість використання горючих матеріалів, а саме пластику, вінілу, інших штучних матеріалів, які можуть візуально імітувати натуральні камені або плитку, але мати горючі властивості.

Окрім цього, слід розуміти, що під час пожежі температура на поверхні фасаду в залежності від пожежного навантаження в середині будівлі може становити в межах 800-1200 °С згідно з нормативними даними [23], при цьому температура плавлення алюмінію або алюмінійовизованих елементів кріплення навісного фасаду становить від 450 °С, що фактично із 100% вірогідністю гарантує руйнування фасадної системи в разі пожежі. Тобто, використання негорючих будівельних матеріалів, або матеріалів з групою горючості Г1 не можуть гарантувати цілісність фасадної «Сухої» системи в разі пожежі [20].

Серед одних із найбільш пожежобезпечних типів опорядження фасаду є «поліфасад», що є двошаровим декоративним покриттям у вигляді плит товщиною від 3 см до 12 см. Першим шаром є теплоізоляційна основа, як правило виконана із спресованої базальтової вати або для дешевих зразків пінополістиролу (група горючості Г1-Г3). Другий шар є декоративним, в основі конструкції якого 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.

На рис. 1.8 наведено «Поліфасад» із застосуванням керамічної плитки на клейовій основі.



Рисунок 1.8 – Поліфасад фасаду будинку із застосуванням керамічної плитки

Серед конструктивних переваг будівель, які впливають на обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями та на яких можливе застосування «мокрого фасаду», «сухого фасаду», «поліфасаду», «навісного вентиляованого фасаду», слід відмітити наявність зовнішньої вертикальної перешкоди (міжповерхового віконного простінку) висотою, як правило в межах 0,3-1,5 м між світловими прорізами (вікнами) з нормованим класом вогнестійкості, роль якої виконує зовнішня стіна будівлі, згідно схеми наведеної на рис. 1.9, яка позначена червоним кольором.

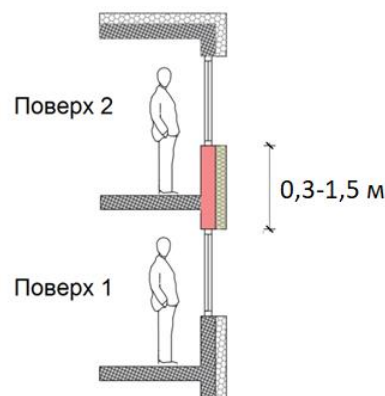


Рисунок 1.9 – Приклад типового фасаду з наявністю зовнішньої вертикальної міжповерхової протипожежної перешкоди

Наявність даного типу зовнішньої вертикальної міжповерхової протипожежної 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 міжповерхові віконні простінки виконані із негорючих матеріалів, а саме: цегли, піноблоку, газоблоку, в тому числі для випадків заповнення зовнішніх стін у будівлі з монолітним каркасом, що наведено на рис. 1.10 (а). Також конструкція міжповерхової зовнішньої стіни поверху може бути збірною залізобетонною конструкцією (панельна конструкція), що наведено на рис. 1.10 (б).



а)

б)

Рисунок 1.10 – Приклад типового моноліт-бетонного фасаду та збірного залізобетонного фасаду з наявністю зовнішніх міжповерхових віконних перешкод: а – монолітно-каркасна будівля; б – будівля із збірних залізобетонних конструкцій

Скляні світлопрозорі фасади, модульні фасади, а також фасади трансформери відносяться до типів фасадів, в яких, як правило, відсутня зовнішня вертикальна міжповерхова протипожежна перешкода з нормованим класом вогнестійкості. Окрім цього, дані типи фасаду часто комбінуються у виконанні з медіа-фасадами або радіальними фасадами з навісними вентиляльованими панелями, коротко зупинімося на кожному із вищезазначених типів [20].

Скляні світлопрозорі фасади, як правило застосовують у каркасно-монолітних будинках або будинках зібраних із збірних сталевих конструкцій. Спайдерне або планарне кріплення фасадів відноситься до без рамного скління без використання профілю, що дозволяє створювати масштабні, 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 каркасу (з використанням силових тросів), і спайдерне кріплення світлопрозорих елементів перерозподіляють і компенсують фізичні навантаження на конструкцію кріплень. З точки зору пожежної безпеки слід відмітити, що дані конструкції не включають елементи, які можуть

обмежувати температурний вплив від пожежі, а також у випадку руйнування одного із елементів, може відбутися повна руйнація зовнішніх огорожувальних скляних конструкцій, і полум'я пожежі почне вільно поширювати свій вплив на верхні поверхи. На рис. 1.11 наведено приклад спайдерного або планарного кріплення фасадів.



Рисунок 1.11 – Приклад спайдерного або планарного кріплення світлопрозорих фасадів

Доцільно відзначити, що описані кріпильні та монтажні елементи фасадів елементи є нестійкими до високих температурних впливів і легко піддаються деформуванню та руйнуванню вже при температурах 400-450 °С через використання нестійких до високих температур матеріалів, зокрема легких алюмінієвих сплавів [20].

Модульний фасад (панельний фасад) відноситься до огорожувальних світлопрозорих скляних фасадних систем з рамою із алюмінієвих профілів, складання, яких здійснюється по-секційно. На монтажі здійснюється стикування секцій між собою та фіксація їх на кронштейнах. Кронштейни для модульного фасаду кріпляться заздалегідь на перекриттях, або на модульній конструкції. Зазначений тип технології кріплення є надзвичайно зручним з точки зору економії часу на монтажі такого фасаду, в порівнянні з монтажем класичної фасадної системи. Модульні фасади виконують роль захисного екрану між внутрішніми приміщеннями і навколишнім середовищем. На рис. 1.12 наведено схему монтажу фасаду, а також фото будівлі під час їх встановлення.



Рисунок 1.12 – схема монтажу світлопрозорого фасаду, а також фото будівлі із модульною світлопрозорою фасадною системою

Серед конструктивних особливостей, які можуть впливати на обмеження поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями є можливість регулювати площу заповнення склом панелей, що може значно впливати на потенційну площу світлового прорізу та як наслідок можливої дії пожежі. Таким чином, перевагою застосування модульного фасаду може бути можливість його конструктивної адаптації під час проектування горизонтального протипожежного поясу, що виконаний із вогнестійких негорючих матеріалів, які можуть створювати умови обмеження поширення пожежі по фасаді.

Окремо слід виділити метод структурного кріплення скляних модулів до будівельних конструкцій будівлі. Ця будівельна технологія застосовується під час облицювання фасаду прозорими склопакетами, при цьому будівля зовні виглядає цілісною скляно-дзеркальною стіною. Також цю технологію називають «стійкоригельною світлопрозорою фасадною системою». Технологія скління полягає у принципі кріпленні склопакетів до конструкції фасаду будівлі за допомогою синтетичного герметика, який є несучим елементом конструкції. Структурне скління фасаду відрізняється від звичайного відсутністю із зовнішнього боку скління алюмінієвих частин (кріпильних елементів). При цьому, склопакет



приклеєний за особливою технологією до алюмінієвої рами утворює касету структурного скління. Всі ці матеріали та конструктивні елементи як правило є негорючими, проте втрачають свої міцнісні характеристики вже при температурі 350 °C [20].

Зовнішній вигляд фасаду із структурним кріпленням скляних модулів до будівельних конструкцій будівлі наведено на рис. 1.13.



Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд світло-прозорого фасаду із структурним кріпленням скляних модулів до будівельних конструкцій

Серед існуючих конструктивних типів влаштування скляних світлопрозорих фасадів слід окремо виділити стійко-ригельні конструкції для кріплення скляних фасадів. До основних конструктивних елементів в цьому типі фасадних систем відносяться вертикальні металеві стійки до яких механічним шляхом кріпляться горизонтальні ригелі. Склопакети монтуються зовні на алюмінієві опорні конструкції, які перед цим закріплюються до ригелів. Ущільнювачі, які витконані з гуми стікої до низьких температур забезпечують герметизацію стиків між склом і алюмінієвими несучими профілями. Фіксуючі планки склопакетів кріпляться болтами з нержавіючої сталі, а на притискні планки заціпуються декоративні алюмінієві кришки. Структура такої конструкції розташовується з внутрішнього теплового боку навісної стіни. Перевагою даної фасадної системи з конструктивної точки зору є можливість реалізації багатьох варіантів з'єднання профілів, які як правило виконуються із алюмінію. Окрім простоти кріплення, дана конструктивна система є найбільш економічною.

На рис. 1.14 наведено приклад вузла кріплення склопакету та зовнішній вигляд змонтованого фасаду.

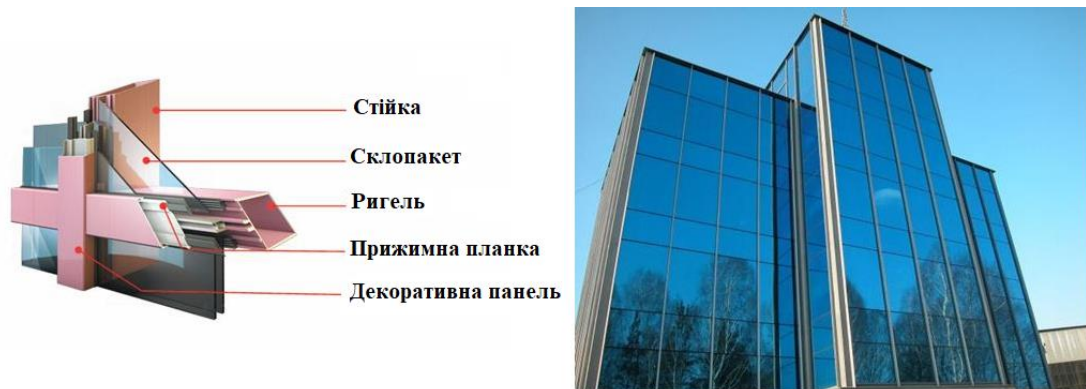


Рисунок 1.14 – Приклад вузла кріплення стійко-ригельних конструкції для скляних фасадів та приклад змонтованого фасаду будівлі

Таким чином, за результатом проведеного аналізу узагальнено та систематизовано типи скляних світло-прозорих фасадів, а також конструктивні схеми їх монтажу та наведено технології кріплення скляних панелей до будівельних конструкцій будівлі.

Разом із тим, під час аналізу пожежної небезпеки конструктивних особливостей зовнішніх вертикальних огорожувальних конструкцій, слід відмітити новітні типи фасадних систем, які швидко набувають розвитку у застосуванні 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 під дією вітрових, світлових, температурних впливів. Різноманітність матеріалів облицювання, форми захисних штор та медіа елементи конструкцій, а також технології їх монтування є здебільшого індивідуальними інженерними рішеннями, а тому систематизація та дослідження закономірностей впливу того чи іншого компоненту фасадної системи на пожежну небезпеку поширення пожежі зовнішніми огорожувальними вертикальними конструкціями є предметом індивідуальних досліджень для кожної будівлі та не може бути узагальнена.

На рис. 1.15 наведено приклади кінетичних фасадних систем у будівлях.



Рисунок 1.15 – Приклади кінетичної фасадної системи

Дослідження впливу наявності кінетичних панелей, які входять до складу фасадних систем будівлі, на обмеження пожежі вертикальними конструкціями є предметом окремих досліджень та може змінити уявлення, щодо можливості застосування елементів кліматичного обладнання у якості активних систем обмеження поширення пожеж по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

### **1.3. Конструктивні та інженерні заходи обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями для різних типів фасадних систем**

Поширення вогню по фасадам будівель, особливо висотного типу є одним із найнебезпечніших видів розвитку пожежі, що обумовлюється її швидким розвитком, складністю гасіння, достатньою кількістю кисню, а також додатковим вітровим впливом, що спонукають її швидке поширення по фасадним конструкціям. Аналіз пожеж та їх наслідків в Україні та за її кордоном показує [20], що значна кількість пожеж, які виникали у будівлях супроводжувалися поширенням вогню по фасадам, що унеможливило їх швидку ліквідацію та значно ускладнювало роботу пожежно-рятувальних підрозділів, а також обумовлювало необхідність залучення спеціальної протипожежної техніки. Поширення пожежі по зовнішнім вертикальним будівельними конструкціями будівель також унеможливило ліквідацію пожежі на початковій стадії її

виникнення, в тому числі із застосування систем протипожежного захисту, якими обладнуються висотні будівлі.

Таким чином, постає завдання узагальнити існуючі конструктивні заходи та інженерні системи, які можуть забезпечувати обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями, а також обґрунтувати ефективність нових запропонованих систем та конструктивних елементів, які забезпечуватимуть обмеження поширення пожежі по фасадам в залежності від типів фасадних систем. Серед найбільш поширених конструктивних заходів для забезпечення обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними конструкціями є застосування протипожежних карнизів.

Відповідно до вимог [14] необхідно поділяти за висотою на протипожежні відсіки, які слід відокремлювати один від одного протипожежним перекриттям з класом вогнестійкості не менше REI 180 або технічним поверхом із протипожежними перекриттями класом вогнестійкості не менше REI 120. Крім того, умовна висота відсіку не повинна перевищувати 50 м умовної висоти будинку, а на межі протипожежних відсіків (на рівні протипожежного перекриття) слід передбачати карнизи по контуру будинку, які виступають за межі фасаду не менше 0,75 м. На рис. 1.16 наведено приклад будинку обладнаного протипожежними карнизами.



Рисунок 1.16 – Приклад будівлі, яка обладнана протипожежним карнизом на межі протипожежних відсіків.

Зазначена вимога є важливою частиною комплексу протипожежного захисту для висотних будинків в частині обмеження можливого поширення пожежі по фасаді та її обмеження поширення на верхній протипожежний відсік. В роботі [24-25] розглядаються питання дослідження залежностей впливу розмірів (ширини) та форми протипожежних карнизів на зміну температурних розподілів від пожежі на поверсі, який розташований над поверхом пожежі. На сьогоднішній день в Україні відповідно до норм [14, 26] передбачено протипожежні карнизи шириною 0,75 м та 1,5 м.

В роботі [27] розглядалося питання порівняння відносної ефективності для віконних міжповерхових простінків та протипожежних карнизів. В наведених роботах відзначається, що для зменшення теплового впливу на 50% висота суцільного негорючого поясу має становити не менше 2,5 м, а значення ширини протипожежних карнизів в межах 0,5-0,7 м забезпечує аналогічні умови зниження теплового впливу.

Разом із тим, в ряді країн мінімальні розміри ширини протипожежних карнизів виготовлених з негорючих матеріалів та з певним класом вогнестійкості має становити:

- 0,762 м для США згідно з [28];
- 1,0 м для Великої Британії згідно з [29];
- 0,45 м для Австралії згідно з [30];
- 1,2 м для Швеції згідно з [31].

Разом із тим, на сьогоднішній день залишаються недослідженими питання впливу форми протипожежних карнизів, зокрема їх обтічної форми.

Таким чином залишається питання дослідження не тільки найбільш ефективного значення довжини виступу карнизу, але і форми конструктивного виконання, як невід'ємної складової на запобігання поширення пожежі та зменшення площі температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду. Окрім цього, серед перспективних напрямів розвитку систем обмеження поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями є влаштування активних протипожежних карнизів обладнаних сухотрубним дренажем, який обладнаний на рівні 1-го поверху будівлі

виведеними назвні патрубками (позначка землі від рівня проїзду в межах 0,5 м - 1,0 м) для підключення насосів високого тиску пожежних автомобілів [32-33].

На рис. 1.17 наведено принципову схему влаштування активних протипожежних карнизів.

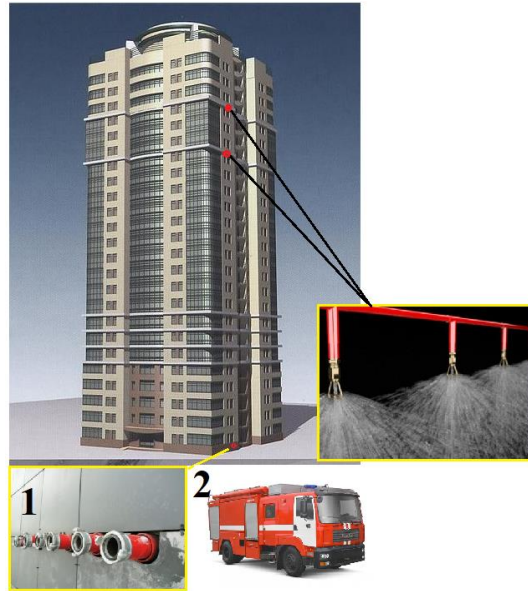


Рисунок 1.17 – Схематичний приклад влаштування активних протипожежних карнизів, де: 1) виведені назвні патрубки сухотрубної дренчерної системи; 2) пожежний автомобіль обладнаний насосом високого тиску.

Наступним конструктивним заходом серед одних із найпоширеніших конструктивних заходів для обмеження поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями є влаштування протипожежних поясів. Як правило під поняттям протипожежного поясу розуміють горизонтальний чи вертикальний бар'єр по всій товщині теплоізоляційної контактної системи, яка обмежує поширення вогню по теплоізоляційній контактній системі у вздовж зовнішньої поверхні зовнішньої стіни, захищеної теплоізоляційною фасадною системою. Протипожежні пояси можуть бути суцільними по всьому периметру будівлі або локаційними – над окремими отворами або світловими прорізами. Окрім цього існують протипожежні пояси під карнизом, аттиком або на рівні карнизу покрівлі виконаної із горючих матеріалів. Такі пояси передбачаються на зовнішній стіні для запобігання

поширенню вогню по поверхні даху або до мансарди в будівлях з дахом з горючих матеріалів або несучою конструкцією даху та з карнизом чи аттиком з горючих матеріалів плоского даху на відстані не більше 7.0 м від рівня поверхні землі. На рис. 1.18 наведено приклади будинків обладнаних протипожежними поясами у вигляді балкону технологічного поверху та протипожежного скла.



а)



б)

Рисунок 1.18 – будівлі обладнані протипожежними поясами, де:

- а) протипожежний пояс у вигляді балкону технологічного поверху;
- б) протипожежний пояс із склопакетів із нормованим класом вогнестійкості

Слід відзначити, що фасадні віконні штори також можуть бути активним чи пасивним елементом обмеження поширення пожежі по фасадам. Серед активних систем запобігання вертикального поширення пожежі зовнішніми конструкціями будівлі можна відмітити адаптовані кінетичні фасади обладнані динамічними протипожежними елементами для захисту світлових прорізів. Окрім кліматичної функції, використання кінетичних заповнювачів виконаних із негорючих матеріалів може забезпечити обмеження теплового впливу від пожежі на верхні поверхи, або навпаки обмежити поширення пожежі із поверху де вона виникла на зовнішні огорожувальні конструкції. На рис. 1.19 наведено приклад створення світлового прорізу в частині зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі, що може змінювати свою форму та площу в дистанційному режимі.



Рисунок 1.19 – фрагменти фото під час функціонування кінетичного фасаду

Серед складності прогнозування ефективності в обмеженні поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями того чи іншого типу адаптованих кінетичних фасадів є різноманітні архітектурні форми та типи технічних пристосувань для активації даних типів фасадних систем. Апробацію пожежної безпеки таких фасадних систем доцільно проводити не лише за результатами розрахунків але і обов'язкових натурних випробувань, які підтверджуватимуть їх ефективність.

За результатами аналізу існуючих типів фасадних систем та фасадних протипожежних перешкод, які можуть запобігати вертикальному поширенню пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями зведемо дані до узагальненої табл. 1.1.





На основі аналізу приведених конструктивних та інженерних заходів обмеження поширення пожежі зовнішніми вертикальними будівельними конструкціями для різних типів фасадних систем, систематизуємо основні типи фасадних протипожежних перешкод, що наведено на схемі рис. 1.20.

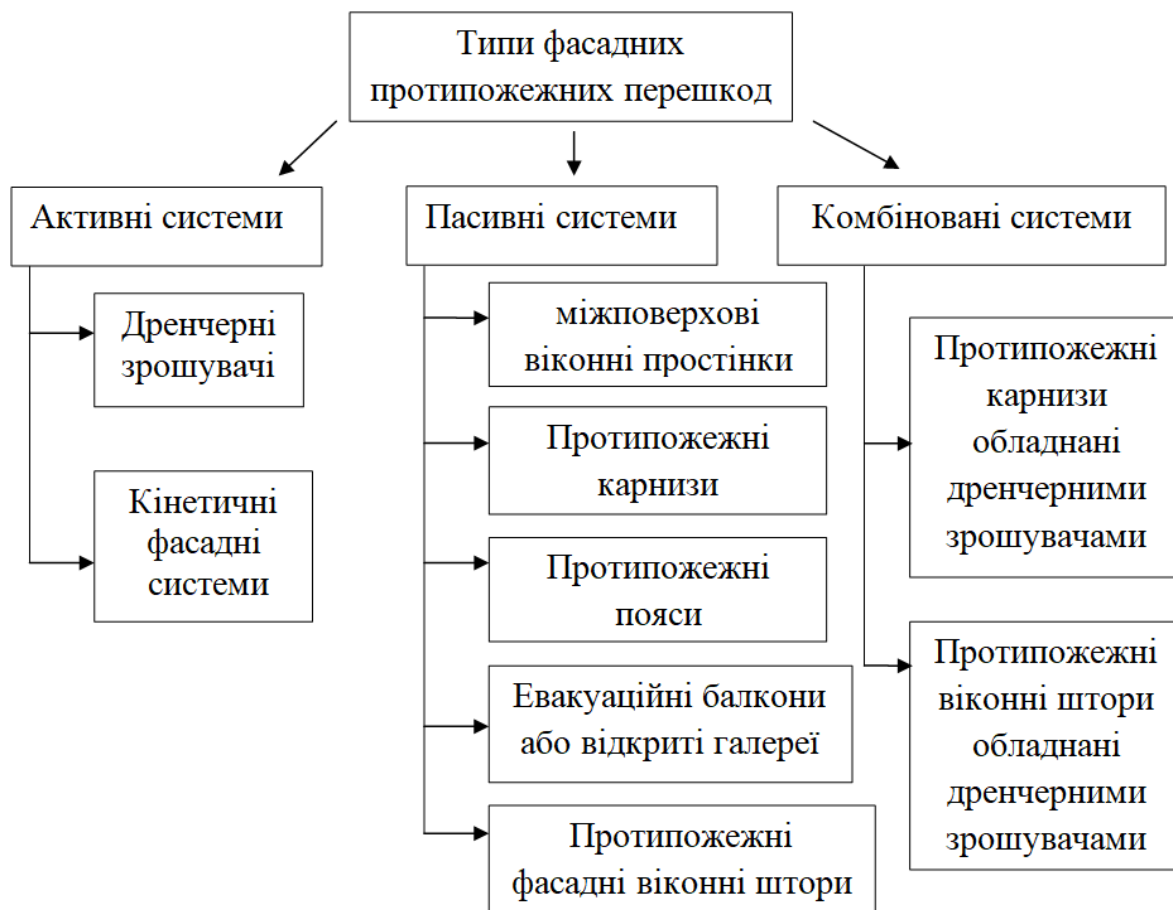


Рисунок 1.20 – систематизація основних типів фасадних протипожежних перешкод

Таким чином, за результатом проведеного аналізу визначено та систематизовано основні конструктивні та інженерні заходи для забезпечення обмеження поширення пожежі по зовнішнім вертикальним будівельним конструкціям для різних типів фасадних систем будівель та споруд.

## 1.4 Аналіз методів натурних випробувань щодо оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі

### 1.4.1 Методика SP Fire 105 (Швеція)

Одним із перших та найпоширеніших стандартизованих методів оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі по фасадам будівель є SP Fire 105 [34], Експериментальна установка, описана в SP Fire 105 призначена для визначення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі та обґрунтування умов безпечного застосування матеріалів для облицювання фасадів, що можуть піддаватися впливам тепла і полум'я від пожежі в приміщенні. Метод був представлений на міжнародному рівні для різних технічних комітетів стандартизації та був взятий в основу багатьох сучасних методик із дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки їх відповідності [35].

Перші натурні випробування за методикою SP Fire 105 було проведено в 1958 р на лабораторній установці, яка мала загальні геометричні параметри близько 4 м у висоту та 1 м у ширину з джерелом модельного вогнища пожежі, яке складалося із 20 кг деревини. В майбутньому даний тип модельного вогнища буде поставлений під сумнів та замінено на клас В, через відсутність сталої тривалості горіння і неоднорідність його температурних параметрів для різних порід дерев та їх віку. На початку 1980-х років джерелом модельного вогнища для стенду, SP Fire 105 остаточно стало модельне вогнище класу В, а саме в якості палива було прийнято 60 л гептану, що відповідало значенню пожежного навантаження  $110 \text{ МДж/м}^2$ . Зміна типу модельного вогнища дозволила отримати більшу щільність теплового потоку починаючи з перших хвилин експерименту, стабільну кількість сажі та сталі значення теплового потоку в  $140 \text{ кВт/м}^2$  на рівні першого поверху та  $75 \text{ кВт/м}^2$  на рівні другого. На рис. 1.21 наведено сучасну схему стенду для оцінювання обмеження поширення пожежі згідно з методом SP Fire 105.

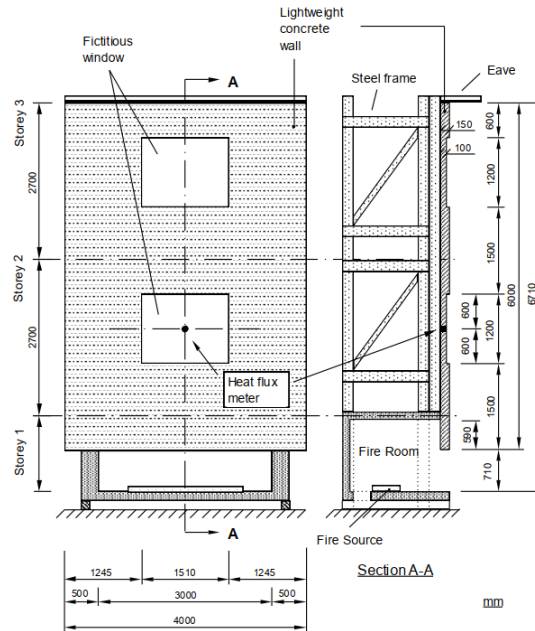


Рисунок 1.21 – Стенд для оцінки ефективності обмеження поширення фасадної пожежі згідно з методом SP Fire 105

З 1994 року, згідно з останньою чинною редакцією SP Fire 105 тестовий стенд має геометричний розмір 4000 мм на 6710 мм (ширина і висота), а технологія виконання фасадної системи повинна максимально моделювати реальний фасад будівлі. Тривалість вогневого впливу становить не менше 20 хвилин. Пожежною навантагою є 60 літрів гептану, що спалюється в металевих деках прямокутної форми розмірами 2000 мм на 500 мм влаштованого на рівні землі на відстані 300 мм від площини фасаду. Розміри досліджуваних вікон на двох поверхах на модельним вогнищем становить 1510 мм х 1200 мм. Температури в випарах і на конструкції стенду вимірюють за допомогою термопарі діаметром  $\varnothing = 0,25$  мм.

Тривалість тесту становить 18 хвилин, а умовою проведення успішного тесту є відсутність поширення полум'я та/або пошкодження нижньої частини вікна другого поверху над рівнем камери модельної пожежі, а також фасадна система не може бути хоча б частково пошкоджена шляхом осипання великих шматків облицювання. Разом із тим, що саме під падає під критерій «частково пошкоджена» або «великі шматки облицювання» в стандарті

SP Fire 105 не визначено, що може означати наявність уламків фрагменту фасадної системи розміром більше за 10 см.

Що стосується температурних критеріїв, то в стандарті визначено, що температура, виміряна на карнизі першого поверху вікна над пожежою, не може перевищувати 500 °С більше ніж 2 хвилини або 450 °С протягом більше 10 хвилин. Окрім цього, для фасадних систем закладів охорони здоров'я є додатковий критерій, який полягає у тому, що тепловий потік у центрі вікна на першому поверсі над рівнем камери модельної пожежі не повинен перевищувати значення 80 кВт/м<sup>2</sup>.

За результатом багаторічних численних випробувань було встановлено, що конструкція фасадної системи, геометричні параметри віконних отворів та зовнішні протипожежні карнизи значно більше впливали на обмеження пожежі, ніж властивості окремих будівельних матеріалів з різною реакцією на вогонь [36]. В цілому метод SP Fire 105, сприймається як базовий, але досить консервативний метод натурних випробувань через сталу геометрію отвору випробувального стенду та відсутність можливості відтворювати різні конструктивні типи фасадних систем. Разом із тим, приведена методика є фактично єдиним стандартизованим методом оцінки ефективності запобігання розповсюдження пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі, як імітація пожежі в приміщенні з розбитим вікном. Зокрема через те, що інші методи спрямовані на дослідження пожежонебезпеки фасадних облицювальних будівельних матеріалів.

Окремо слід відзначити, що на основі методики стандартах SP Fire 105 були створені похідні методи дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та їх вогнестійкості, дослідження пожежної небезпеки матеріалів облицювання та аналізу поширення пожежі по фасадам будівель з врахуванням національних доповнень. В табл. 1.2 наведено перелік існуючих найбільш поширеніших методів дослідження пожежної безпеки фасадних систем для різних країн світу.

Таблиця 1.2 - Перелік стандартів щодо дослідження пожежної небезпеки фасадних систем різних країн

Шифр стандарту	Країни, що використовують метод
SP Fire 105	Швеція, Норвегія, Данія
BS 8414-1:2015 and BS 8414-2:2015 ISO 13785-1, ISO 13785-2.	Велика Британія, Ірландія, Японія, Китай, Чехія, Словаччина
GB/T 29416-2012	Китай
CAN/ULC S-134	Канада
PN-B-02867:2013	Польща
DIN 4102-20	Швейцарія, Німеччина
ÖNORM B 3800-5	Швейцарія, Австрія
JIS A 1310	Японія
Lepir2	Франція
NFPA 285	США
ГОСТ 31251	Україна (до 2011 року), Азербайджан, Казахстан, Молдова та інші країни колишнього СНГ
AS 5113:2016	Австралія
MSZ 14800-6:2009	Угорщина
ДСТУ 9072:2021	Україна

Розглянемо приведені стандарти та описані в них методики, визначимо їх основні параметричні відмінності, конструктивні переваги, перелік критеріїв, виявлені недоліки, а також перспективні напрями їх удосконалення для можливості більш ефективного дослідження обмеження поширення пожежі по фасадам будівель.

#### **1.4.2 Методика BS 8414 (Велика Британія, Ірландія, Японія, Китай, Австралія)**

В 2002 році в розвиток SP Fire 105 було розроблено стандарт Великої Британії BS 8414 «Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building» (Пожежні характеристики зовнішніх облицювальних систем. Метод випробування не несучих зовнішніх облицювальних систем, нанесених на цегляну поверхню будівлі), який був вперше опублікований у 2002 році і є

стандартом, який використовується у Великобританії, на Близькому Сході, Австралії, Китаї, Австралії та Японії. На рис. 1.22 наведено фрагмент проведення натурних випробувань на основі методики BS 8414.

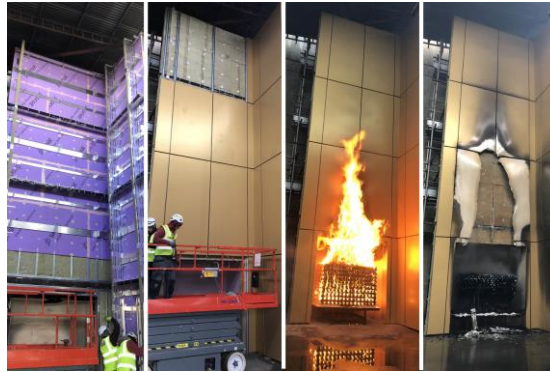


Рисунок 1.22 – фрагменти проведення натурних випробувань під час оцінки пожежної безпеки систем облицювання фасаду

Основними відмінностями методу BS 8414 від SP Fire 105 є те, що натурні випробування тривають 60 хвилин, в конструкції стенду не має віконних прорізів, а також в конструкції випробувального стенду з'явився додаткова прилегла площина під кутом  $90^\circ$  відносно основної площини фасаду для відтворення ефекту екранування. Також під час випробувань замінено тип модельного вогнища, а саме використовується модельне вогнище класу A1, а експеримент став складатися з декількох етапів. Висота стенду складає 9675 мм, ширина основної частини над камерою модельного вогнищ 2500 мм, ширина бокової екрануючої конструкції 1500 мм.

Перший етап тестування полягає в тому, що вільне горіння модельного вогнища триває протягом 30 хвилин при температурі не менше  $600^\circ\text{C}$ , під час якого проводяться вимірювання, включаючи те, як поширюється вогонь, наскільки високо по вертикальній площині він поширюється, що відбувається з матеріалом який контактує з полум'ям та які температури досягаються у шарах облицювальних матеріалів. Тобто акцент призначення нового методу випробувань змінено повністю на дослідження пожежної небезпеки

облицювальних матеріалів фасадних систем, а не дослідження обмеження поширення пожежі по фасадам.

Разом із тим, серед критеріїв вдалого проведення експерименту залишилися вимоги, що значення температури на поверхні фасаду не може перевищувати 600 °С протягом усієї тривалості випробувань на висоті 5 м над камерою модельного вогнища, а полум'я не повинно досягти «другого поверху» протягом перших 15 хвилин. Якщо температура на поверхні фасаду досягає даного значення або вогонь поширюється до другого поверху, випробування припиняється і вважаються негативними.

Другий етап тестування пожежної безпеки конструкції фасадної системи полягає в тому, що вільне горіння модельного вогнища триває протягом 30 хвилин при температурі не менше 600 °С після чого модельне вогнище гасять. В разі відсутності упродовж наступних 30 хвилин займання матеріалів фасаду, випробування вважається позитивним.

Стандарт ISO 13785-1:2002 — це випробування на реакцію на вогонь фасадних систем із дослідженням помірно горючих матеріалів.. Тест можна використовувати для прогнозування або оцінки субкомпонентів оздоблювальних матеріалів. Цей метод випробування застосовний лише до фасадів та облицювання, які не є самостійними конструкціями, а які використовуються для реконструкції існуючої зовнішньої стіни..

Дослідження [37] показали, що ISO 13785 можна використовувати для точної оцінки ефективності реакції на вогонь фасадних систем за даними контрольного великомасштабного тесту BS8414.

Серед відмінностей методу слід відзначити, що випробування проводять на установці, що містить три зовнішні стіни шириною 2,4 м: основну задню стінку та з бічними стінками на обох протилежних сторонах. Газовий пальник шириною 1,2 м розташований по центру, по осі задньої стінки. Ширина прилеглої бокової стінки досліджуваного фрагменту фасаду 0,6 м. Висота всіх зовнішніх стін екранування 2,8 м. На рис. 1.23 наведено креслення стенду.



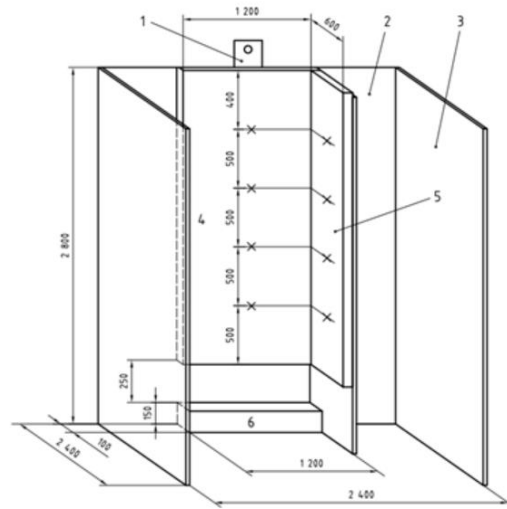


Рисунок 1.23 – геометричні параметри стенду згідно методики ISO 13785

де: 1) вимірювач теплового потоку; 2) внутрішня стіна; 3) стіна зовнішнього екранування; 4) внутрішня стіна, що піддається тесту; 5) бокова стіна що піддається тесту; 6) джерело модельного вогнища; x) місця влаштування термопар.

Випробувальний зразок фактично являє собою масштабований фрагмент фасаду у співвідношенні 1:3,5 відносно методики BS 8414 з додатковими боковими екранами. Даний метод є репрезентативним для дослідження фасадної системи у порівнянні із тою, яка використовується на практиці, включаючи усі з'єднання та кріплення. Дослідний зразок розміром 1,2 м на 2,4 м встановлений на задній стінці, а ще одна секція розміром 0,6 м на 2,4 м встановлена на меншій бічній стінці. Обидві секції встановлюються на висоті 0,4 м від рівня підлоги.

Термопари (теплові датчики) розміщують на екрані фасадної системи на відстані 0,5 м, 1 м, 1,5 м, 2 м і 2,4 м від нижнього краю зразків. У системах з повітряною порожниною розміщують додаткові датчики усередині порожнин на відстані 1,2 м і 2,3 м від нижнього краю вогневої камери. Під час випробування газовий пальник горить з потужністю 100 кВт протягом 30 хвилин або до тих пір, поки верхня частина зразка не загориться.

Протягом усього часу випробування за зразком спостерігають і записують час появи одного з наступних критеріїв:

- займання досліджуваного зразка (умова випробувань не виконана);
- поширення полум'я на 0,5 м, 1 м, 1,5 м, 2 м і 2,4 м у будь-якому напрямку на зразку, що є якісним показником, який показує на скільки не ефективна система.

Крім того, показники вимірювань термопар використовуються для надання інформації про поширення вогню по фасадній системі всередині будь-якої порожнини, під час якого записуються наступні дані:

- тепловий потік як функція від часу на графіку;
- температури термопар як функція від часу в графіках;
- максимальне значення теплового потоку.

Міжнародний стандарт ISO 13785 «Reaction-to-fire tests for façades» фактично є масштабованою модифікацією SP Fire 105 та BS 8414, проте його призначення, як і BS 8414 полягає у випробуваннях фасадної теплоізоляції, тобто випробування будівельних матеріалів на пожежну небезпеку, а не заходів щодо ефективності обмеження поширення пожежі по фасаду будівлі за допомогою конструктивних та інженерних рішень. В 2012 році вперше створено числову модель тестової установки, що була стандартизована та отримала шифр ISO 13785-2 для тестування фасадних систем будівель та моделювання теплового середовища на фасаді [37]. На рис. 1.24 наведено зовнішній вигляд моделі стенду за методом BS 8414.

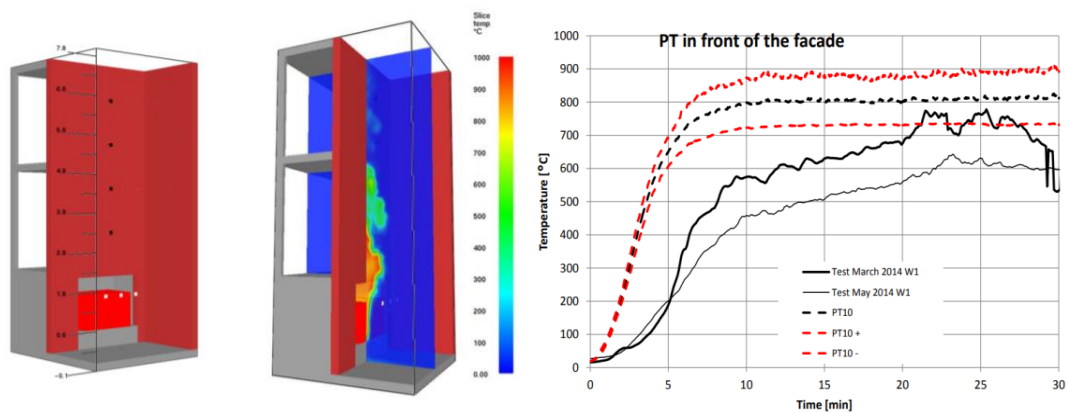


Рисунок 1.24 – Фрагмент FDS моделювання випробування фасаду за методом BS 8414

Таким чином встановлено, що основними стандартами для оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та зокрема матеріалів, які використовуються в облицюванні у Великій Британії, Ірландії, Японії, Австралії та Китаю є BS 8414-1:2015; BS 8414-2:2015; ISO 13785-1 та ISO 13785-2. Серед недоліків даних документів можна відмітити відсутність можливості аналізу поширення полум'я на верхні поверхи, які знаходяться над поверхом пожежі, досить обмежені критерії у порівнянні із SP Fire 105, а також відсутність можливості досліджувати ефективність типи фасадних протипожежних перешкод (протипожежні карнизи, протипожежні пояси тощо), в тому числі із врахуванням зміни кута ухилу фасаду будівлі.

Окремо слід виділити стандарт GB/T 29416-2012 «Test method for fire-resistant performance of external wall insulation systems applied to building facades» (Метод випробування вогнестійкості систем ізоляції зовнішніх стін, що застосовуються для фасадів будівель), що є ліцензійною копією BS 8414-1:2015; BS 8414-2:2015, адаптованою під законодавство КНР та не містить змін в частині методики проведення випробувань.

#### **1.4.3 Методика CAN/ULC S-134 (Канада) та NFPA 285 (США)**

В Канаді та США, на основі SP Fire 105 створено власні методи випробування горючого облицювання фасадів змонтованого на негорючій основі CAN/ULC S-134 та NFPA 285. Дані методи випробування є подібними та дозволяють оцінити характеристики поширення вогню по не несучим зовнішнім стінам та визначають порівняльні характеристики горіння зовнішніх стінових вузлів шляхом оцінки таких показників, як поширення вогню на верхній поверх та поширення вогню всередині досліджуваного зразка фасадної системи.

Відмінною особливістю методу CAN/ULC S-134 є врахування деталей каркасу або заповнення вікон, дверей або інших світлових прорізів, які можуть використовуватися в поєднанні з досліджуваним зразком. Зокрема

згідно критеріїв стандарту [39] встановлено, що для пластикових елементів фасаду критичною температурою самозаймання є значення в 343 °С.

Також відмінністю стандарту CAN/ULC S-134 є параметри випробувального стенду, а саме він має габарити висотою 9,8 м та шириною 6 м, на відміну від базового стенду з шириною стенду висотою 6,71 м та шириною 4 м згідно SP Fire 105. На рис. 1.25 наведено фрагмент випробувань фасадної системи.



Рисунок 1.25 – Фрагмент випробувань фасадних систем щодо пожежної безпеки за методом CAN/ULC S-134

Метод тестування в більшій частині призначений для випробування фасадних системи навісних стін (сухий фасад), встановлених на випробувальній опорній установці без бетонної або цегляної основи, якщо це потрібно. Загальна висота випробувального стенду становить 10 м, ширина 6 м з габаритами вікна. На рис. 1.26 наведено габаритну схему стенду згідно методу CAN/ULC S-134.

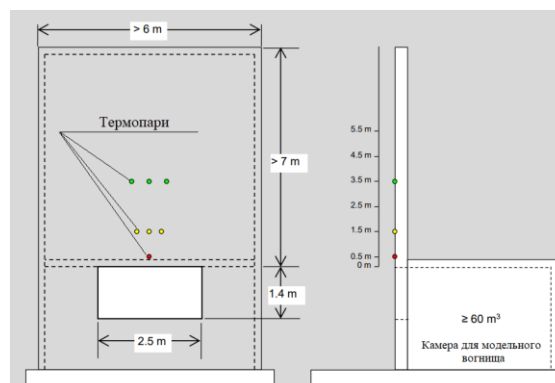


Рисунок 1.26 – габаритні розміри випробувального стенду згідно методу CAN/ULC S-134

Для CAN/ULC S-134 та NFPA 285 в якості джерела пожежі використовують нестандартизоване модельне вогнище класу А загальною масою 675 кг, або чотири лінійні пропанові пальники довжиною 3,8 м, призначені для однакової подачі вогню. Витрата газу в пальнику складає приблизно 120 г/с пропану (5,5 МВт). Загальний час вогневого впливу повинен становити не менше 25 хвилин. Джерело вогню відкалібровано для досягнення середнього значення теплового потоку на рівні значень  $45 \pm 5$  кВт/м<sup>2</sup>, що контролюється на рівні 0,5 м над краєм отвору, а значення теплового потоку  $27 \pm 3$  кВт/м<sup>2</sup> контролюється на рівні 1,5 м вище отвору, у середньому за 15-хвилинний період 2 фази випробувань.

Температуру стін вимірюють по вертикалі з інтервалами 1 м, починаючи з висоти 1,5 м над отвором камери модельного вогнища пожежі. На кожній висоті температури передньої поверхні і задньої поверхні, а також проміжного матеріалу.

Критерії позитивного проведення тесту є умови, при яких відстань розповсюдження полум'я повинна бути менше 5 м над отвором камери для модельного вогнища, а тепловий потік, на висоті 3,5 м над отвором камери для модельного вогнища повинен бути менше значення 35 кВт/м.

Таким чином, зміст та призначення даних методик не суттєво відрізняється від методу представленого в BS 8414, при цьому можна стверджувати, що кількість вимірювальних точок для розміщення термопар значно менше ніж в Британських нормах. Критерії успішного проведення випробувань значно простіші, як за абсолютними значеннями теплового потоку так і за зонами де вони спостерігаються. Переваги методики полягають у можливості використання під час проведення експерименту різних класів модельних вогнищ.

Серед недоліків даних методик можна відмітити відсутність критеріїв для можливості проведення аналізу поширення полум'я на верхні поверхи, які знаходяться над поверхом пожежі, досить обмежені критерії успішного проведення випробувань у порівнянні із SP Fire 105, а також відсутність

можливості досліджувати ефективність типи фасадних протипожежних перешкод (протипожежні карнизи, протипожежні пояси тощо), в тому числі із врахуванням зміни кута ухилу фасаду будівлі та вітрових впливів.

#### 1.4.4 Методика DIN 4102-20 (Швейцарія, Німеччина)

Стандарт DIN 4102-20 дозволяє прогнозувати поведінку будівельних матеріалів і будівельних компонентів фасадних систем в умовах пожежі [40-41]. Ця методика моделює сценарій поширення пожежі по фасадній системі, що виходить через отвір вогневої камери біля основи стенду із використанням нестандартного модельного вогнища пожежі класу А, вагою 25 кг із м'яких порід дерева. Розмір модельного вогнища складає 0,5 м х 0,5 м х 0,48 м, з використанням брусків розмірами 40 мм х 40 мм. Також допускається в якості джерела вогню використовувати лінійний газовий пальник потужністю 320 кВт з постійним випромінюванням, розташований приблизно на 200 мм нижче верхнього отвору вогневої камери.

Випробувальний фасад має вигляд L-образного кутового фрагменту споруди виконаної із цегли або газобетону загальною висотою 5,5 м та шириною 2 м лицевої сторони стенду та 1,8 м для прилеглої сторони. Отвір вогневої камери має розміри 1 м на 1 м. На рис. 1.27 наведено фото фрагменту випробувань.



Рисунок 1.27 – Фото вогневих випробувань за DIN 4102-20

Аналіз методики [42] показав, що дане модельне вогнище пожежі створює сталу температуру приблизно 780-800 °С, на рівні 1 м стіни над отвором вогневої камери. Тривалість випробувань складає 20 хвилин для горючих фасадів та 30 хвилин для негорючих фасадів. Вимірювання та спостереження тривають до тих пір, поки горіння або тління повністю не припиняться (в тому числі поширення диму) або доки не мине 60 хвилин.

Критеріями успішного проведення випробувань є відсутність пошкоджень та вигорань (крім плавлення або спікання зовнішнього шару) на висоті до 3,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери. Температура на поверхні стіни або всередині стінних шарів/порожнин не повинна перевищувати 500 °С до висоти 3,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери. Відкрите полум'я вогню не повинно досягати верхнього краю стенду, а саме висоти 5,5 м, при цьому падіння палаючих крапель, палаючих і негорючих уламків і бічного поширення полум'я повинні припинитися через 90 с після вимкнення пальників. Значення теплового потоку не повинно перевищувати 60 кВт/м<sup>2</sup> на рівні 0,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери; 35 кВт/м<sup>2</sup> на рівні 1,0 м від верхнього краю отвору вогневої камери та 25 кВт/м<sup>2</sup> при 1,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери.

Аналіз методики проведення вогневих досліджень за стандартом DIN 4102-20 та її порівняння із європейськими аналогами дає можливість стверджувати, що фактично метод є аналогічним до методу викладеному у стандарті BS 8414. Незначні відмінності критеріїв, а саме більш жорсткіші значення в межах 10% можна пояснити тим, що стенд фактично на 4 метри менший по висоті (висота 5,5 м у порівнянні із висотою стенду 9,6 м за стандартом BS 8414). Серед переваг методики DIN 4102-20 можна відзначити вичерпний та логічний перелік критеріїв, просте конструктивне виконання стенду та можливість використовувати на вибір різні джерела вогню в якості модельного вогнища пожежі.

Серед недоліків можна відзначити відсутність можливості використовувати модельне вогнище класу В та відсутність можливості зміни

кута площини досліджуваного фрагменту фасадної системи. Також цей метод на відміну SP Fire 105 не дозволяє досліджувати параметри обмеження поширення пожежі між поверхами та не дозволяє прогнозувати поширення вогню з врахуванням наявності віконних прорізів.

Слід зазначити, що дані методики не передбачають можливості дослідження конструктивних систем та інженерних рішень, щодо ефективності обмеження поширення пожежі вертикальними фасадними будівельними конструкціями, що є їх недоліком.

#### 1.4.5 Методика ÖNORM B 3800-5 (Швейцарія, Австрія)

Стандарт ÖNORM B 3800-5 Пожежна безпека будівельних матеріалів та компонентів - Частина 5: Аналіз пожежонебезпеки фасадів - Вимоги, випробування та оцінка відноситься до середньомасштабних методів випробування фасадних систем. Даний метод є національною адаптацією методу BS8414, проте його відмінністю є можливість аналізувати не тільки пожежну небезпеку матеріалів фасадних систем але і розглядати аналіз обмеження поширення пожежі по фасадах [43]. Як приклад, в роботі [44] на основі ÖNORM B 3800-5 проводиться дослідження обмеження поширення пожежі по дерев'яним фасадам за допомогою протипожежних карнизів виконаних із металу або інших мінеральних матеріалів шириною 250 мм, що наведено на рис. 1.28.

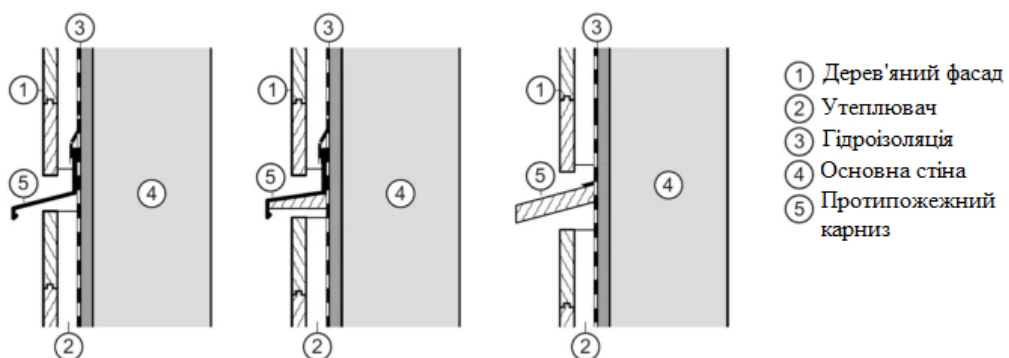


Рисунок 1.28 – Дослідження ефективності протипожежних карнизів на дерев'яних фасадах



В якості модельного вогнища використовують 30 ( $\pm 1,5$ ) кг дерев'яних не струганих брусків ялини з щільністю 475 ( $\pm 25$ ) кг/м<sup>3</sup> і вологістю деревини 12,4 %. Дерев'яні бруси мають геометричні розміри 40 ( $\pm 2$ )  $\times$  40 ( $\pm 2$ )  $\times$  500 ( $\pm 10$ ) мм які розміщують у шаховому порядку з хрестоподібним розташуванням (90°) при співвідношенні деревини до повітря 1:1 у вогневій камері. Загальні габаритні розміри модельного вогнища пожежі становила 500  $\times$  500 мм.

Вогнева камера побудована з газо-бетонних блоків, при цьому з тильного боку влаштовано прямокутний отвір розмірами 300  $\times$  250 мм (ш  $\times$  в), що відповідає площі 0,075 м<sup>2</sup> для забезпечення механічного вентиляювання модельного вогнища пожежі в об'ємі до 400 м<sup>3</sup>/год. На досліджуваній фасадній системі розміщуються 16 термопар типу К в оболонці за EN 60584-1 [45] із зовнішнім діаметром 3 мм на відстані 20 мм від зовнішнього облицювання фасаду. На рис. 1.35 наведено зовнішній вигляд стенду та його габаритні параметри [46].

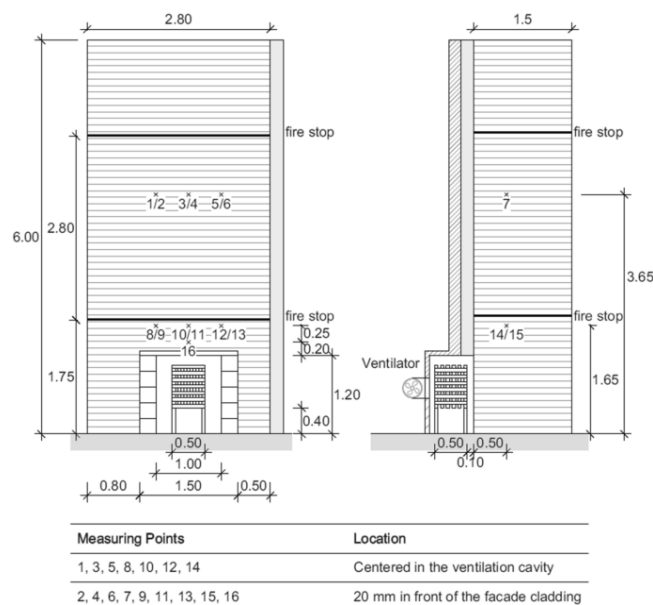


Рисунок 1.29 – конструктивні параметри стенду згідно стандарту  
ÖNORM B 3800-5

На відміну від методики BS 8414 тривалість тесту триває 50 хв у продовж якого полум'я не повинно поширитися на другий рівень фасаду на висоті вище 1,65 м. Разом із тим, в межах висоти 1,65-3,65 м допускається незначне

обуглення дерев'яного оздоблення фасаду, який не повинен підтримувати горіння. Таким чином, перевагою методу ÖNORM B 3800-5 є можливість дослідження параметрів інженерних засобів обмеження поширення пожежі для різних типів фасадних систем, в тому числі виконаних із потенційно горючих матеріалів. Слід відзначити, що критерії руйнування фасадної системи згідно методу ÖNORM B 3800-5 на відміну від інших стандартів є чіткими та вичерпними. Зокрема, для успішного проведення тесту для будь якої фасадної системи загальна вага частин фасаду або крапель, які впали дотолу не повинна перевищувати 5 кг, а площа вигорання не повинна становити більше  $0,4 \text{ м}^2$  над рівнем вище 1,65 м від відмітки землі.

Що стосується геометричних параметрів, то висота стенду за методикою ÖNORM B 3800-5 дещо нижча у порівнянні із методикою стандарту BS 8414, а саме становить 6 м у порівнянні із 9,675 м відповідно. Ширина вогневої камери в методиці стандарту ÖNORM B 3800-5 становить  $1,2 \text{ м}^2$  у порівнянні із  $1,5 \text{ м}^2$  за методикою стандарту BS 8414. Можна стверджувати, що методика стандарту ÖNORM B 3800-5 є дещо масштабованою у порівнянні із аналогічними методиками представленими в DIN 4102-20 та BS 8414, проте вона має більш чіткі критерії успішного проведення випробувань та можливість інтегрувати до фасадних систем протипожежні карнизи.

Також серед недоліків слід відмітити відсутність віконних прорізів, як основного критерію для можливості прогнозування обмеження поширення пожежі згідно SP Fire 105 та відсутність можливості зміни кута ухилу площини фасадної системи.

#### **1.4.6 Методика JIS A 1310 (Японія)**

В Японії окрім методик визначених в стандарті BS 8414 та ISO 13785, діє національний стандарт JIS A 1310 «Test method for fire propagation over building facades» (Метод випробування на поширення вогню по фасадах

будівель) який було вперше розроблено в 2015 році [47]. На відміну від вітчизняних норм [14, 26], для висотних будинків, в Японії допускається використовувати окремі горючі елементи або елементи з низьким термічним опором (декоративні елементи з дерева, алюмінієві панелі тощо) в конструкції фасадних систем будівлі за умови, що буде доведено відсутність можливості поширення вогню на верхні поверхи будівлі в разі пожежі.

Методика національного стандарту JIS A 1310 передбачає проведення середньомасштабного випробування, яке ґрунтується в більшій мірі на основі методики приведеної в [41]. Габаритні розміри стенду становлять 2730 мм у висоту та 1820 мм у ширину. Розмір вікна вогневої камери становить  $910 \times 910$  мм, а об'ємні габарити вогневої камери становлять  $1350 \times 1350$  мм.

В якості модельного вогнища використовують газовий пальник або рідке паливо, яке може забезпечити тепловий потік від вогнища пожежі не менше 600 кВт. На рис. 1.30 наведено конструктивні елементи стенду та його габаритні розміри.

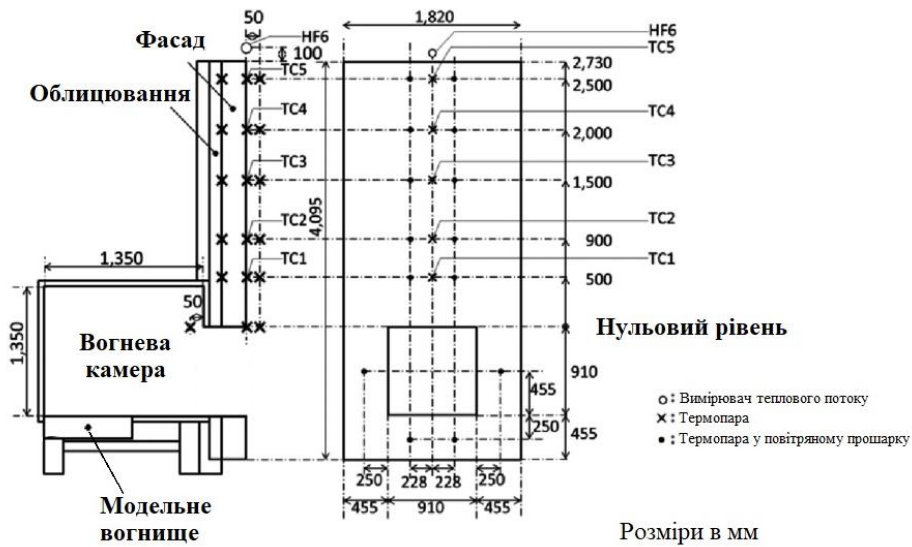


Рисунок 1.30 – конструктивні елементи випробувального стенду та їх габаритні розміри згідно стандарту JIS A 1310

Внутрішня поверхня вогневої камери покрита керамічним волокном товщиною 25 мм. Тривалість проведення випробувань складає 20 хвилин, у

продовж яких значення температури на будь якій частині фасадної системи вище 500 мм над рівнем вогневої камери не повинно перевищувати 500°C [48].

Таким чином можна відзначити, що методика за стандартом JIS A 1310 передбачає проведення середньомасштабного випробування на основі зменшеного стенду, проте на відміну методів описаних в стандартах DIN 4102-20; PN-B-02867; BS 8414; CAN/ULC S-134 він призначений для обґрунтування відсутності поширення пожежі по фасадним системам в конструкціях яких є горючі матеріали та декоративні елементи з низьким термічним опором. Серед переваг також слід відзначити можливість використовувати різні типи модельного вогнища пожежі, разом із цим методика JIS A 1310 не враховує можливість наявності вікон та потенційних загроз пов'язаних із їх наявністю. Також дана методика не дозволяє враховувати кут нахилу площини фасаду, вітрові впливи та досліджувати ефективність обмеження поширення пожежі протипожежних карнизів чи інших типи фасадних протипожежних перешкод.

Критерії проведення випробувань, а саме не перевищення значення температури в 500°C на будь якій частині фасадної системи вище 500 мм над рівнем вогневої камери, не є досить інформативним показником у порівнянні із критеріями інших методик описаних в стандартах. Разом із тим, даний показник є досить значним, враховуючи середньомасштабні розміри випробувального стенду та високі нормативні значення температурного режиму в його вогневій камері.

#### **1.4.7 Методика LEPiR2 (Франція)**

Випробувальний комплекс LEPiR2 призначений для оцінки поведінки конструктивного виконання фасадних систем будівлі, відповідно до експериментальної методики визначеної французьким технічним комітетом 249 (IT249) з пожежної безпеки. Він спрямований на дослідження шляхів з обмеження ризиків поширення вогню по фасадах на верхні поверхи. Цей метод

на відміну від інших методик передбачає використання в якості палива два нестандартних модельних вогнища пожежі класу А встановлених у вогневій камері на першому поверсі. Габаритні розміри модельного вогнища складають 1000 мм на 1000 мм та 1800 мм (Ш×Д×В) вагою 300 кг. Загальна вага деревини у вогневій камері становить 600 кг, а тривалість експерименту становить 60 хв [49].

Геометричні розміри конструкції стіни стенду становить 5500 мм в ширину та 7000 мм у висоту, що імітує 3-поверхову будівлю. Стенд для дослідження пожежної безпеки фасадних систем має 4 отвори розмірами 1500 мм у висоту та 1000 мм у ширину, які імітують 2 вікна будівлі на першому поверсі та 2 вікна на другому поверсі. На третьому рівні стенду додатково зроблений суцільний пояс без отворів шириною 1500 мм у верхній частині. Загальний вигляд стенду та його геометричні параметри наведено на рис. 1.31.

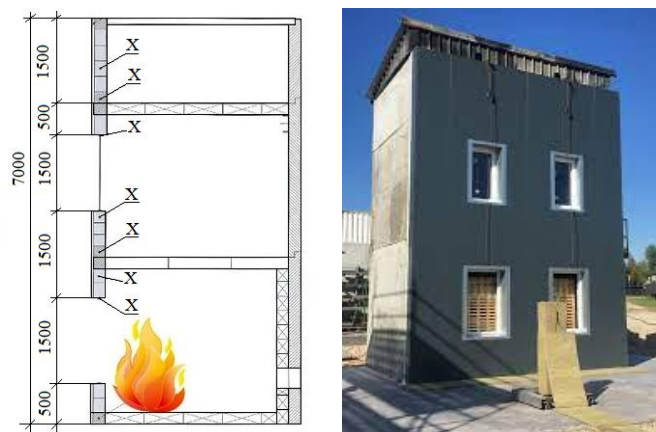


Рисунок 1.31 – Загальний вигляд стенду та його геометричні параметри,  
де: X – рівні розміщення термопар

Основною метою тесту на відміну від BS 8414-1, ISO 13785, CAN/ULC S-134, PN-B-02867:2013, DIN 4102-20, JIS A 1310 є не дослідження пожежної небезпеки фасадних систем, а дослідження обмеження поширення вогню по фасаду на рівень 2-го поверху, що фактично відповідає меті випробувань за методикою SP Fire 105. Також особливістю методики LEPiR2 є використання будь якого типу фасадної системи та видів утеплювача. Які можуть кріпитися на бетонну чи цегляну конструкцію.

Перевагою методу LEPiR2 є наявність апробованої числової моделі на базі FDS, проте дана модель на відміну від методу BS 8414, не є стандартизованим [50] Разом із тим авторами визначено основні параметри моделі, які дозволяють її відтворити з максимальним наближенням до реальних натурних умов випробувань.

FDS дослідження з оцінки здатності чисельної моделі дозволили відтворювати кількісні результати щодо температури пожежі та значення теплового потоку на випробовуваному фасаді для подальшої оцінки характеристик протипожежних заходів. Запропоновані моделі модельних вогнищ пожежі дають правильні теплові навантаження та форму полум'я для випробовуваного фасаду. Окрім цього варто відзначити високу точність зняття отриманих даних під час проведення натурального експерименту, що зокрема забезпечується 125 термопарами ззовні та всередині об'єму стенду на різних рівнях [51].

Критеріями успішного проведення тесту є відсутність займання фасадної системи на висоті вище 5 м від рівня вогневої камери упродовж 30 хвилин проведення випробувань. Також має забезпечуватися відсутність поширення пожежі по ширині фасаду відносно границь вікна вогневої камери упродовж всієї тривалості випробувань. Серед критеріїв, які не зустрічаються в інших описаних методиках слід відмітити умову забезпечення відсутності поширення полум'я на стику між стіною фасаду та плитою перекриття поверху розташованою над вогневою камерою. Окрім цього температура на внутрішній поверхні зовнішньої стіни на 2-гому поверсі не повинна перевищувати 180 °C, а на стиках підлоги та стіни на рівні 2-го поверху не повинно спостерігатися перевищення температури вище 350 °C. Також не допускається упродовж всієї тривалості тесту відшарування чи відпадання фрагментів фасадної системи від основної конструкції на рівні 2-го поверху.

Методика описана в LEPiR2 також дозволяє досліджувати ефективність заходів щодо обмеження поширення пожежі, а саме досліджувати ефективність протипожежних вертикальних та горизонтальних карнизів, протипожежних віконних карнизів, протипожежних поясів тощо. На рис. 1.32

наведено приклади фасадних систем обладнаних різними типами фасадних протипожежних перешкод.

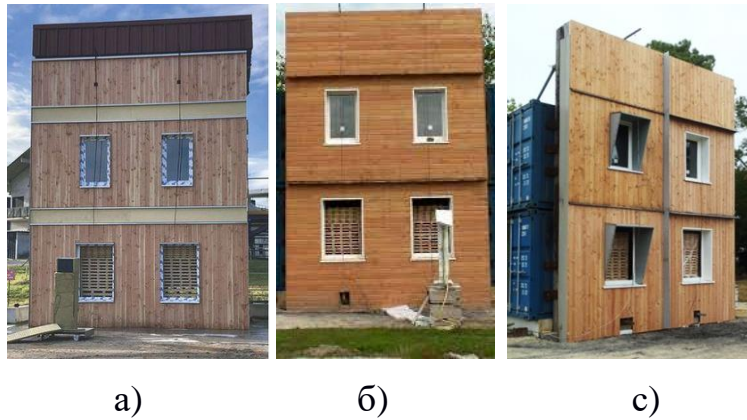


Рисунок 1.32 – Приклади фасадних систем обладнаних фасадними протипожежними перешкодами за методикою LEPiR2, де: а) фасадна система обладнана протипожежним поясом; б) фасадна система обладна протипожежним карнизом; с) фасадна система обладнана протипожежними віконними карнизами та вертикальним протипожежним перешкоджувачем.

Аналіз методики LEPiR2 дозволяє стверджувати, що даний тест за своєю метою найбільш наближений до методики SP Fire 105, проте критерії цих тестів значно відрізняються, як за значенням температури так і за переліком критеріїв. Серед переваг даного методу викладеного в LEPiR2 слід відзначити максимальне наближення конструктивного виконання фрагменту фасадної системи до реального типового вигляду будівлі.

Окремою перевагою слід відмітити можливість досліджувати різні типи фасадних протипожежних перешкод, а саме протипожежних карнизів різних типів, протипожежних віконних штор та протипожежних поясів, що не зустрічається в інших описаних методиках. Значна кількість термопар, а саме 125 одиниць, які фіксують температурний режим у продовж всієї тривалості проведення експерименту дозволяє стверджувати про забезпечення високої точності зняття даних та достовірність отриманих результатів. Також важливою перевагою даного методу є наявність апробованої числової FDS

моделі, використання якої дозволяє значно знизити економічні та трудові затрати, під час дослідження пожежної небезпеки фасадних систем.

Окремо слід відзначити, що дана методика є єдиною, яка передбачає наявність вікон на рівні 2-го поверху, як елементу повноцінного відтворення фасадної системи. Разом із тим, критерії успішного проведення тесту не передбачають врахування даного елемента заповнення світлових прорізів, та не висуває умов щодо можливості їх руйнування або деформації.

Недоліки методу LEPiR2 полягають у відсутності можливості використання різних типів модельного вогнища пожежі, а також не дозволяє враховувати кут нахилу площини фасаду та вітрові впливи. Також даний стенд можливо застосовувати тільки для дослідження таких типів фасадів як «мокрый фасад», «сухий фасад» та «поліфасад» [52-54].

#### **1.4.8 Методика ГОСТ 31251 (Азербайджан, Казахстан, Молдова)**

Міждержавний стандарт ГОСТ 31251 «Стіни зовнішні із зовнішнього сторони. Метод випробувань на пожежну небезпеку. Фасади будівель. Метод перевірки пожежної небезпеки» в своїй першій редакції розроблений Технічним комітетом зі стандартизації ТК 465 «Будівництво» в російській федерації в 2003 році. Цей стандарт встановлює метод випробувань на пожежну небезпеку при тепловому впливі пожежі із зовнішнього боку будівлі для зовнішніх стін з виконаною на їх зовнішній поверхні системою зовнішньої теплоізоляції, облицюванням та оздобленням. Тривалість проведення тесту складає 45 хвилин. Стіни стенду повинні бути виконані з негорючих матеріалів товщиною не менше 60 мм, щільністю не менше 600 кг/м<sup>3</sup>, з механічними характеристиками, що дозволяють кріпити до їхньої зовнішньої поверхні з фрагменти фасадних систем [55].

Загальна висота стенду складає 5100 мм, а ширина 3000 мм, який включає в себе конструкцію вогневої камери та двоповерховий фрагмент стіни, що імітує зовнішню стіну будівлі із вікнам над поверхом пожежі. Для



вимірювання температур факела полум'я за висотою та температурою на поверхні та всередині зразка випробуваних конструкцій застосовуються термопари в кількості 7 шт. На рис. 1.33 наведено зовнішній вигляд стенду, його основні геометричні параметри та місця розміщення термопар (Т1-Т7).

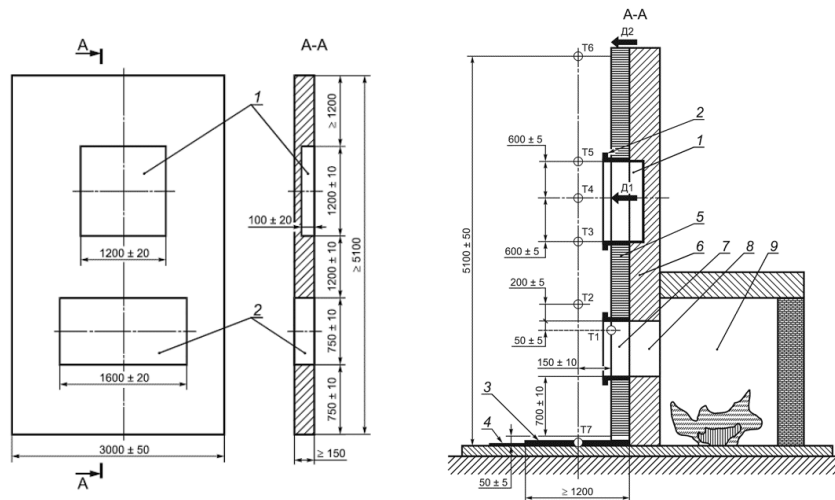


Рисунок 1.33 – Загальний вигляд стенду за ГОСТ 31251 та його основні геометричні параметри, де: Т1-Т7) – термопари; Д1,Д2) – тепловіри; 1) - імітація віконного отвору; 2) – обрамлення віконного отвору (якщо передбачається); 3) – руберойд; 4) – основа під руберойд; 5) – зразок теплоізоляції, оздоблення або облицювання; 6) – фрагмент стіни; 7) – віконний отвір без заповнення в випробуваній конструкції; 8) – відкритий отвір фрагмента стіни; 9) – вогнева камера

Температура, що реєструється термопарою Т2 у період з 10-ї по 20-у хвилини тесту повинна фіксувати значення температури не менше 600 °С. Факел полум'я з відкритого отвору вогневої камери установки повинен виходити на зовнішню поверхню фрагмента стіни не пізніше 6-ї хвилини та згасати і «повертатися» всередину вогневої камери не раніше 25-ї хвилини випробувань. Висота частини факела полум'я, що горить, над верхнім обрізом відкритого отвору фрагмента стіни в безперервному інтервалі з 10-ї по 20-у хвилини калібрування повинна бути не менше 1,2 м. Показники температури з термопар знімають кожні 60 секунд.

В якості модельного вогнища пожежі допускається використовувати модельні вогнища класу А, В, а також газові пальники. Не залежно від типу модельного вогнища пожежі вони мають забезпечувати середнє значення потоку теплового випромінювання на рівні центру вікна 2-го поверху з 7-ї по 25-у хвилини в межах  $(12,5 \pm 2,5)$  кВт/м<sup>2</sup>. Температура, що реєструється термопарою Т2 у період з 10-ї по 20-у хвилини тесту на випробувальній установці, повинна бути не менше 600 °С.

Критерії успішного проведення випробувань полягають у тому, що не допускається поширення полум'я вище рівня підлоги 2-го поверху, а також не допускається самозаймання газів, що виділяються під час термічного впливу або будь яких елементів конструкції фасадної системи. Також пошкодженням вважають обвалення елементів зразка та обвуглювання матеріалів на глибину 2 мм і більше, з яких виконаний зразок. Враховується їх оплавлення з ознаками горіння, обвуглюванням або утворенням розплаву чорного кольору.

Серед недоліків слід відзначити відсутність можливості враховувати кути нахилу площини фасаду та конструкції заповнення світлових прорізів. В тому числі на сьогоднішній день можна відзначити відсутність апробованої числової FDS моделі для проведення комп'ютерного моделювання. Також дана методика не передбачає можливість дослідження типів фасадних протипожежних перешкод на кшталт протипожежних карнизів, протипожежних поясів тощо.

#### **1.4.9 Методика MSZ 14800-6:2009 Метод випробування поширення вогню на фасадах будівель (Угорщина)**

Стандарт MSZ 14800-6:2009 є безпосереднім методом проведення випробувань щодо оцінки заходів з обмеження поширення вогню по фасадам будівель різного функціонального призначення [56-58].

Даний метод дозволяє випробовувати різні типи фасадних систем, а також досліджувати пожежну небезпеку систем облицювання. У цьому методі у

вогневій камері, яка знаходиться в середині стенду створюється стандартний температурний режим за допомогою модельного вогнища пожежі класу А, яке виконане із соснових брусків загальною вагою 650 кг та розміром 1,5 м на 2,0 м. В якості первинного джерела запалювання використовується 10 л дизелю. Дане модельне вогнище пожежі забезпечує значення близько 3,25 МВт теплової енергії у продовж 45 хв. Загальна тривалість тесту становить 60 хв. Стенд складається с каркасної конструкції яка дозволяє монтувати різні типи фасадних систем (в тому числі комбіновані) та імітувати фрагмент будівлі, що складається з двох умовних поверхів із двома вікнами розмірами 1,2 м на 1,2 м розташовані один над одним. Для направлення вогню на стіну, перед вікном першого поверху влаштовується направляючий дефлектор полум'я. Загальна висота стенду становить 7,57 м, а висота кожного з поверхів становить 2,65 м.

На поверхні фасадної системи влаштовуються теплові вимірювачі у кількості 6 одиниць для контролю температурних розподілів на різних рівнях та один контрольний вимірювач у вогневій камері. На рис. 1.34 наведено зовнішній вигляд стенду.

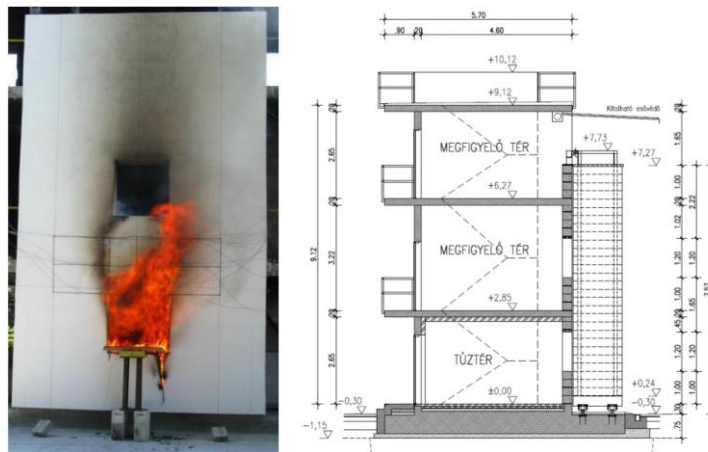


Рисунок 1.34 – Зовнішній вигляд стенду за стандартом MSZ 14800-6:2009

Серед основних відмінностей методики слід відмітити те, що методика передбачає можливість розміщення на фасаді будівлі додаткового пожежного навантаження (імітація кондиціонерних блоків, сонячних панелей тощо), що може впливати на поширення вогню по фасаді.

Окрім цього, ряд досліджень проведених за даною методикою [59;60] ставлять питання щодо необхідності передбачення рухомої бічної площини до основної фасадної частини для імітації різних кутів фасадів. Разом із тим, на даний момент дана пропозиція не була імплементована в стандарт.

Серед переваг даного методу, слід відмітити наявність розробленої CFD моделі, яка дозволяє проводити дослідження обмеження поширення пожежі по фасадам за допомогою комп'ютерного моделювання. Наявність методології побудови комп'ютерної моделі дозволяє з прийнятною точністю визначити характер поширення пожежі та її можливий вплив для будівлі під час використання фасадів різних типів. На рис. 1.35 наведено приклад CFD модель на базі MSZ 14800-6:2009, яка описана в ÖNORM B3800-8:2013.

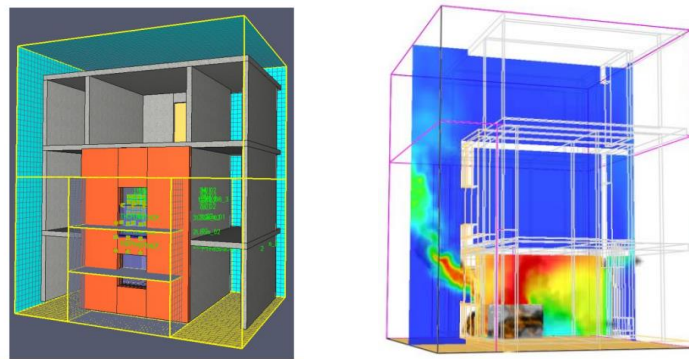


Рисунок 1.35 – Приклад CFD модель за методом MSZ 14800-6:2009

Таким чином, аналіз стандарту MSZ 14800-6:2009 показав, що він включає найбільш поширені характеристики та критерії під час проведення випробувань, зокрема модельне вогнище пожежі класу А, два рівні поверхів, які досліджуються та вимірювачі температури на поверхні фасаду.

Серед недоліків даного методу можна відмітити відсутність можливості досліджувати ефективність обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі або обґрунтувати ефективності засобів обмеження поширення пожежі для фасадних систем різного типу (протипожежні карнизи, дренажні завіси тощо). Також даний стенд не дозволяє відтворювати кутові типи фасадів та змінювати їх кут ухилу відносно вертикалі.

#### 1.4.10 Методика ДСТУ 9072:2021 Метод натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції з опорядженням штукатурками та дрібноштучними елементами на поширення вогню (Україна)

Національний стандарт ДСТУ 9072:2021 розроблений на основі методики натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню, яка була впроваджена наприкінці 1990-х років. Методика розроблена для проведення випробувань з дослідження пожежної небезпеки фасадної теплоізоляції різних типів для «мокрих» фасадних систем. Сутність методу випробувань полягає в оцінюванні здатності фасадної системи не поширювати вогонь у вертикальному та горизонтальному напрямках за умов вогневого впливу [61].

Випробувальний стенд представляє собою капітальний фрагмент цегляної двоповерхової будівлі загальною висотою 5,6 м. Приміщення першого поверху є вогневої камери і призначене для створення в ньому температурного режиму наближеного до стандартного. Вогнева камера має віконний проріз розміром шириною 2400 мм та висотою 1200 мм. Внутрішній розмір приміщення на першому та другому поверхах становлять 3300 мм × 4300 мм × 2600 мм (ширина, довжина, висота). На рис. 1.36 наведено креслення вогневого стенду та натурне фото.

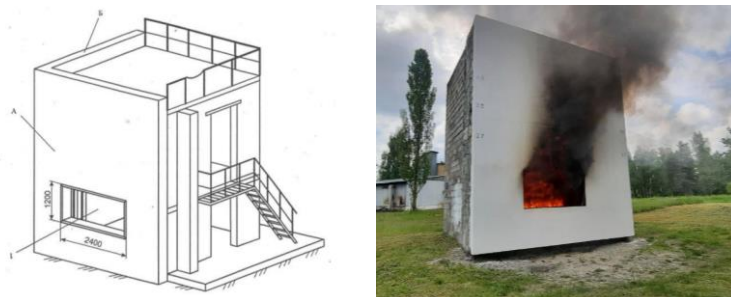


Рисунок 1.36 – Зовнішній вигляд стенду для натурних вогневих випробувань та фото фрагменту проведення натурних досліджень, де А та Б – стіни призначені для монтажу фасадних систем, 1 – віконний проріз вогневої камери

В якості вогневого навантаження використовують вогнище пожежі класу А, виконане із штабелю дерев'яних брусків розміром 1220 мм ширини, 2440 мм довжини та 724 мм висоти. Штабель розміщується у вогневій камері по центру відносно вікна, питоме навантаження складає  $25\text{кг}/\text{м}^2$ , що забезпечує умови стандартного температурного режиму протягом 30 хв. Для підпалювання штабелю модельного вогнища пожежі класу А в обидва дека під ним наливають по 3 л дизелю.

Для вимірювання температури середовища біля зовнішньої поверхні фасадної системи використовують термопари не менше ніж в 20 точках. Вимірювальний спай термопар має бути встановлено на відстані від 20 мм до 30 мм від поверхні облицювання фасадної системи. Схему розташування термопар наведено на рис. 1.37.

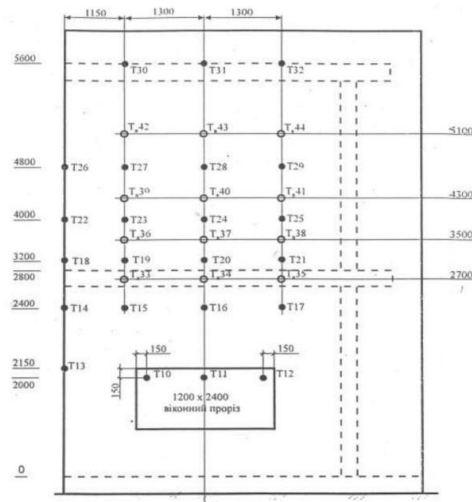


Рисунок 1.37 – Схема розміщення термопар на випробувальному стенді

Тривалість випробування триває 30 хвилин. Навіть при руйнуванні або загорянні фасадної системи забороняється гасити її достроково, якщо це не спричиняє ризиків для персоналу, який проводить випробування.

Методика стандарту [62] призначена для дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та матеріалів з яких виконано її облицювання, при цьому вона не передбачає можливості дослідження заходів щодо обмеження поширення пожежі на кшталт протипожежних карнизів, протипожежних поясів тощо. В роботі [63] наведено приклад апробованої

числової FDS моделі, що дозволяє проводити альтернативні дослідження фасадних систем на основі комп'ютерного моделювання.

Капітальне виконання споруди стенду не дозволяє досліджувати вплив зміни кута площини фасадної системи на поширення по ній пожежі, а також використовувати різні альтернативні види вогнища для забезпечення стандартного температурного режиму. Також методика стандарту [82] не враховує можливість наявності заповнення світлового прорізу.

Головним критерієм успішного проведення випробувань є збереження цілісності фасаду без обмежень щодо досягнення критичних значень температур на його поверхні. Окрім цього, не допускається поширення полум'я по фасаду в наслідок займання матеріалів, які входять до конструкції фасадної системи.

Таким чином [62] щодо методу натурних вогневих випробувань збірних систем фасадної теплоізоляції на поширення вогню має ряд спільних конструктивних параметрів та критеріїв, які подібні до NFPA 285 та CAN/ULC S-134. Разом із тим, метод не дозволяє в існуючих параметрах та критеріях досліджувати ефективність обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі та обґрунтування ефективності засобів обмеження поширення пожежі для фасадних систем різного типу.

### **1.5 Узагальнення характеристик методик натурних випробувань щодо оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі**

Узагальнення параметрів та критеріїв описаних методик щодо проведення дослідження з обмеження поширення пожежі по фасадним системам є підґрунтям для створення нової удосконаленої методики досліджень параметрів конструкцій фасадів для забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. Нова методика повинна включити в себе найбільш вдалі та ефективні, економічно та практично обґрунтовані параметри для проведення натурних досліджень, а також може бути

доповнена новими функціональними можливостями, з врахуванням аналізу методик [28-31;35;47;55;57;62]. Під час зведення проаналізованих даних з описаних методик виділено наступні основні конструктивні особливості та параметричні дані для випробувального стенду:

- геометричні та габаритні параметри стенду і його основних конструктивних елементів;
- тип модельного вогнища, яке влаштовується у вогневій камері та його потужність;
- наявність вікон на фасаді, окрім вікна вогневої камери, їх габаритні розміри, а також кількість поверхів, які враховуються під час проведення випробувань.
- геометричні розміри вікна вогневої камери, через яке поширюється полум'я модельного вогнища пожежі;
- тривалість проведення випробувань;
- можливість проведення випробувань з дослідження ефективності різних типів фасадних протипожежних перешкод;
- можливість досліджувати різні конструктивні типи фасадних систем (сухі фасади, мокрі фасади, поліфасади тощо);
- критерії проведення успішних випробувань.

В табл. 1.3 наведено зведені дані характеристик методик дослідження обмеження поширення пожежі для фасадних систем, які проаналізовано в розділах 1.5.1-1.5.10 [24].



Таблиця 1.3 - Зведені дані характеристик методик дослідження обмеження поширення пожежі для фасадних систем

Назва стандарту	Габарити стенду, мм (ширина, висота, глибина)	Тип модельного вогнища, та його потужність	Наявність вікон на фасаді, кількість поверхів, габаритні розміри, мм	Розмір вікна вогневої камери, мм	Тривалість проведення випробувань, хв	Можливість досліджувати ефективність фасадних протипожежних перешкод	Можливість досліджувати різні типи фасадних систем	Критерії успішного проведення випробувань
SP Fire 105	4000/6710/1700	клас В, 110 МДж/м <sup>2</sup>	так, 2 вікна 1500×1200, 2 поверхи,	3000×1700	18	ні	ні, тільки можлива зміна матеріалу облицювання	температура, на нижньому краю вікна першого поверху, не може перевищувати 500 °С більше ніж 2 хвилини або 450 °С протягом більше 10 хвилин.
BS 8414	2600/9675/1500	клас А, Клас В, газовий пальник, 100 кВт	ні	2000×2000	60	ні	так	значення температури на поверхні фасаду не може перевищувати 600 °С протягом усієї тривалості випробувань на висоті від 1 до 5 м над камерою модельного вогнища

## Продовження таблиці 1.3

ISO 13785	2400/2800/2400	газовий пальник 100 кВт	ні	1200×250	30	ні	ні	відсутність займання досліджуваного зразка
GB/N 29416-2012	2600/9675/1500	клас А, Клас В, газовий пальник, 100 кВт	ні	2000×2000	30	ні	ні	значення температури на поверхні фасаду не може перевищувати 600 °С протягом усієї тривалості випробувань на висоті від 1 до 5 м над камерою модельного вогнища
CAN/ULC S-134	6000/9800/3000	Газовий пальник (120 г/с), 5.5 МВт або клас А, 675 кг	ні	2500×1400	25	ні	так	- відстань розповсюдження полум'я повинна бути менше 5 м над отвором камери для модельного вогнища; - тепловий потік, виміряний на висоті 3,5 м над отвором камери для модельного вогнища повинен бути менше 35кВт/м.
PN-B-02867	1800/2300/500	клас А, 20 кг, вітрове навантаження 2 м/с	ні	-	30	ні	ні	забезпечення цілісності фасадної системи у продовж 20 хвилин

## Продовження таблиці 1.3

DIN 4102-20	2000/5500/1800	клас А, 25 кг, газовий пальник 320 кВт	ні	1000×1000	30	ні	так	<p>відсутність вигорянь (на висоті до 3,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- температура на поверхні стіни або всередині порожнин не повинна перевищувати 500 °С до висоти 3,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери;</li> <li>- відкрите полум'я вогню не повинно досягати верхнього краю стенду на висоті 5,5 м;</li> <li>- значення теплового потоку не повинно перевищувати 60 кВт/м<sup>2</sup> на рівні 0,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери; 35 кВт/м<sup>2</sup> на рівні 1,0 м від верхнього краю отвору вогневої камери та 25 кВт/м<sup>2</sup> при 1,5 м від верхнього краю отвору вогневої камери.</li> </ul>
-------------	----------------	---	----	-----------	----	----	-----	---

## Продовження таблиці 1.3

ÖNORM B 3800-5	2800/6000/1500	клас А, бруски 40×40 з габаритами штабелю 500 × 500 мм	ні	1000×1200	50	так	так	полум'я не повинно поширитися на другий рівень фасаду на висоті вище 1,65 м.
JIS A 1310	1820/2730/1350	клас В, газовий пальник, 600 кВт	ні	910×910	20	ні	ні	значення температури на будь якій частині фасадної системи вище 500 мм над рівнем вогневої камери не повинно перевищувати 500°C.
LEPIR2	5500/7000/3000	клас А температура біля вікна на поверсі пожежі має бути не менше 600 °С	так, по 2 вікна на кожному з двох поверхів 1500×800. Всього 3 поверхи.	2 вікна розмірами 1500×800 на першому поверсі	30	так	так	- відсутність займання фасадної системи на висоті вище 5 м від рівня вогневої камери упродовж 30 хвилин; - температура на внутрішній поверхні зовнішньої стіни на 2-гому поверсі не повинно перевищувати 180 °С, а на стиках підлоги та стіни на рівні 2-го поверху не повинно спостерігатися перевищення температури вище 350 °С.

## Продовження таблиці 1.3

NFPA 285	4620/5300/3050	два газових пальника на 900 та 400 кВт	ні	1980×762	30	ні	так	Температура на зовнішній поверхні стіни на висоті вище 3,05 м над отвором вогневої камери не повинна перевищувати 538 °С.
ГОСТ 31251	3000/5100/1500	клас А, клас В, газовий пальник. Значення теплового потоку по центру вікна 2-го поверху (12,5±2,5) кВт/м <sup>2</sup> , а також температура біля вікна на висоті 1500 мм має бути не менше 600 °С	так, 2 вікна: - 1600×750 на першому поверсі - 1200×1200, на другому поверху	1600×750	45	ні	ні, тільки можлива зміна матеріалу облицювання	не допускається поширення полум'я вище рівня підлоги 2-го поверху; не допускається самоспалах газів що виділяються під час термічного впливу або займання будь яких елементів конструкції фасадної системи; не допускається обвалення елементів зразка та обвуглювання матеріалів на глибину 2 мм і більше.

## Продовження таблиці 1.3

AS 5113:2016	2800/9675/1500	Клас В	ні	2000×2000	60	ні	ні, тільки можлива зміна матеріалу облицювання	<p>- Температура на висоті 4 м над отвором, виміряна на відстані 10 мм від відкритої поверхні зразка фасаду, не повинна перевищувати 600 °С протягом періоду 30 с;</p> <p>- Температура на середині глибини кожного горючого шару або будь-якої порожнини на 4 м над отвором не повинні перевищувати 250 °С протягом 30 с.</p>
MSZ 14800-6:2009	3700/7270/1400	клас А, 650 кг, 3,25 МВт	так, 2 вікна 1200×1200, на першому та другому поверхах	1200×1200	60	ні	ні	<p>- Різниця температур в центрі зони виходу полум'я з вогневої камери та центру вікна верхнього поверху повинна бути більше 300 °С.</p> <p>- відсутність будь яких уламків в тому числі горючих елементів, що зруйнувалися та впали на землю.</p>
ДСТУ 9072:2021	6250/5600	клас А, 700 МДж/м <sup>2</sup>	ні	1200×2400	30	ні	ні	збереження цілісності фасаду.

Зведені дані приведених методик стандартів дозволяє зробити попередні висновки, що на сьогоднішній день успішно застосовуються стенди як для проведення повномасштабних натурних випробувань так і середньомасштабні стенди висотою 2,3-2,8 м. Як правило, кількість поверхів стенду, які досліджуються складає два. А саме контролюється температурний режим на рівні вогневої камери та досліджується поверх який розташований безпосередньо над нею.

Під час проведення середньомасштабних випробувань можливо відтворювати реальні геометричні параметри світлових прорізів у масштабі 1:1, для двох поверхів, проте відтворювати кожен поверх у повному обсязі не має необхідності. Зазначене обґрунтовується тим, що під час досліджень оцінюється можливість поширювати полум'я між світловими прорізами (вогневої камери та вище розташованого вікна). При цьому поверх вогневої камери повинен бути повністю відкритий для імітації найгірших умов пожежі.

Разом із тим, під час дослідження ефективності протипожежних карнизів, відстань між краями вікон поверхів розташованих один над одним не може бути меншою за 0,5 м для забезпечення виконання вимог по геометричним параметрам протипожежних карнизів визначених в [14;21;26;].

Важливою економічною та практичною складовою під час організації проведення випробувань є можливість використовувати декілька альтернативних модельних вогнищ пожежі, які створюють в більшості випадків описаних методик умови адекватні стандартному температурному режиму. Також слід розуміти, що тривалість проведення випробувань, незалежно від методики, знаходиться в межах від 20 хв до 60 хв, що в більшості випадків обґрунтовується значенням нормованої межі вогнестійкості для зовнішніх несучих або ненесучих стін.

Для України, враховуючи вимоги [13], тривалість випробувань має складати не менше 30 хвилин, що відповідатиме значенню межі вогнестійкості як для зовнішніх ненесучих стін для будівель I ступеню вогнестійкості.

Сучасні архітектурні підходи під час проектування будівель та споруд різного функціонального призначення поєднують в собі широкий діапазон нових стилів та форм фасадних систем. На сьогоднішній день проектування сучасних архітектурних комплексів ввела ряд нових уявлень, які раніше могли сприйматися як недолік. Зокрема, на сьогоднішній день міцність фасаду будівлі більше не є синонімом масивності. В архітектурі 1970-80х років масивні несучі стіни були завжди підкреслені глибокими віконними та дверними проймами [85]. У сучасній архітектурі стіни зазвичай є тонкими, з тонкими площинами, що огорожують внутрішній простір будівлі для створення відчуття, що внутрішній простір перетікає у зовнішній. Ці нові підходи до об'єму впливають не лише на план, але й на цілу форму будівлі. На рис. 1.38 наведено Танцюючий дім (побудований у 1991–95), проект якого був удостоєний Прітцкерівської премії, головної архітектурної премії світу в 1989 році [66].



Рисунок 1.38 – Танцюючий дім Френка Гері

Даний проект став прикладом переломного періоду між традиційним конструктивізмом та модернізмом. Разом із тим, жодний із виявлених методів дослідження пожежної небезпеки фасадних систем або оцінки заходів для обмеження поширення пожежі не враховує можливість зміни кута площини фасаду. Відсутність нових підходів в методиках випробувань фасадів, які мають враховувати сучасні тенденції в архітектурі створюють передумови



відсутності об'єктивної оцінки пожежної небезпеки фасадних систем, що є актуальною науковою задачею.

Таким чином, удосконалений стенд для проведення оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів з обмеження поширення пожежі має враховувати можливість змінювати кут нахилу площини фасадної системи від  $70^\circ$  до  $110^\circ$  відносно горизонтальної осі. Дані кути є найбільш поширенішими ухилами площини фасаду в сучасній архітектурі, тому введення даного параметру дозволить більш точно оцінювати пожежну небезпеку фасадних систем.

Також слід відмітити, що більшість сучасних методик включали в конструкції стенду кутову екрануючу площину, що імітувала прилеглий кут стіни фасаду будівлі. Слід зазначити, що сучасні стенди дозволяли враховувати тільки прилеглий кут із значенням  $90^\circ$ , що є досить консервативним та може не відповідати реальним параметрам фасаду. Як приклад, склопрозорі фасади в багатьох випадках мають плавні кути кривизни фасадів. Таким чином, доречно передбачити в конструкції стенду можливість змінювати кут екрануючої панелі для максимального наближення натурних параметрів фасаду будівлі.

Наступним невирішеним питанням під час проведення оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів з обмеження поширення пожежі є врахування вітрових навантажень. В роботах присвячених питанням впливу вітру на процеси теплообміну [67-69] доведено значний вплив вітру на температурні розподіли на поверхні, яка опромінюється пожежею, а саме збільшення площі прогріву та температури не менше ніж 20%, на відміну від ідеальних умов навколишнього середовища при відсутності вітру.

Згідно з даними [70] майже у всіх кліматичних зонах України вітровий потенціал зростає із збільшенням висоти щодо показника на рівні 10 метрової позначки, а саме на висоті 30 м - в 1,5 рази; на висоті 60 м - в 2 рази; на висоті 100 м - в 2,5 рази. Таким чином, під час дослідження фасадних систем висотної будівлі слід враховувати, що умовні одиниці вимірювання будь якого з критеріїв

проведення випробувань, наприклад для фрагменту фасаду 5 поверху (орієнтовна умовна висота 15-16 м) та для фрагменту фасаду 30 поверху (орієнтовна умовна висота 100-110 м) може відрізнятись в декілька разів.

Таким чином, визначимо основні вихідні дані для розробки удосконаленого стенду для проведення досліджень обмеження впливу висхідного теплового потоку джерела теплового випромінювання на фасадні будівельні системи різних типів:

- середньомасштабний стенд, з висотою в межах 2700-3000 мм, шириною 1600-2000 мм, глибина вогневої камери 1300-1500 мм;
- можливе використання модельних вогнищ класу А, класу В або газовий пальник, при умові забезпечення значення температури у вогневій камері та ззовні над верхнім краєм вікна вогневої камери не менше 600 °С у продовж всієї тривалості випробувань, але не менше 20 хв;
- тривалість випробувань має становити не менше 30 хв, що відповідатиме вимогам, які висуваються до межі вогнестійкості ненесучих стін будівель І ступеню вогнестійкості;
- має бути передбачена можливість влаштування термопар на зовнішній поверхні фасаду стенду для можливості контролю температурного режиму на різних висотних рівнях під час проведення випробувань. Також термопари повинні бути влаштовані на нижньому краї вікна, що розташоване над отвором вогневої камери;
- стенд повинен мати можливість змінювати кут нахилу площини фасадної системи від 70° до 110° відносно горизонтальної осі;
- стенд повинен мати можливість обладнуватися протипожежними перешкоджувачами різних типів для можливості оцінки ефективності обмеження поширення пожежі;
- стенд повинен включати можливість влаштування віконного прорізу різних розмірів на відстані від верхнього краю вогневої камери від 200 до 1500 мм;

- під час оцінки результатів успішного проведення випробувань слід врахувати фізичні властивості основних матеріалів конструкції вікон та визначити температурні значення критеріїв для забезпечення збереження їх цілісності;

- стенд повинен мати прилеглу поворотну кутову площину для імітації кута будівлі, яка повинна змінювати кут від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

Таким чином постає наукова задача розробити удосконалену методику з оцінки обмеження поширення пожежі по фасадам будівель на основі отриманих даних, визначених пріоритетних шляхів удосконалення та виявлених недоліків в методах стандартів [28-31;35;47;55;57;62].

## **1.6 Висновки до розділу 1**

Питання запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель на сьогоднішній день у нормативній документації має в більшій частині декларативний характер і не включає конкретні вимоги, яких слід дотримуватися проектувальнику для забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам будівель. Існуючі методи дослідження поширення пожежі по фасадам не враховують їх конструктивні особливості, а саме вертикальні кути ухилу, кути прилягання суміжних частин фасадів, а також параметри віконних міжповерхових простінків.

Застосування активних та пасивних типів фасадних протипожежних перешкод на сьогоднішній день реалізуються за допомогою виключно розпорядчого методу нормування, який передбачає використання унормованих значень без можливих альтернатив для тих чи інших типів фасадних систем. При цьому такі унормовані значення встановлювалися без відповідного наукового обґрунтування та визначалися, як правило, експертним шляхом. Зазначене має негативний вплив на статистичні дані про пожежі в наслідок, яких має місце поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель.

Вимоги, як вітчизняні так і зарубіжні, за якими досягаються обмеження поширення пожежі для фасадів значно відрізняються. В переважній своїй більшості проведені на сьогодні дослідження ґрунтуються на критеріях температури на поверхні фасаду або значенні теплового потоку.

На сьогоднішній день широке застосування отримали розрахункові методи, зокрема методи комп'ютерного моделювання під час дослідження процесів поширення фасадної пожежі та відповідно температурних розподілів по фасаді. Проте використання таких методів потребує свого розвитку та апробування щодо досліджень та оцінювання обмеження поширення пожежі. Також без належного наукового обґрунтування залишаються такі питання: оцінювання ефективності тих чи інших типів фасадних протипожежних перешкод за температурним критерієм, розробка алгоритмів, систематизування та апробація розрахункових методів оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадам, узагальнення та розроблення процедур використання методів комп'ютерного моделювання, як такі, що залишаються не до кінця дослідженими і потребують подальшого наукового розвитку.

Вирішення зазначених задач дасть змогу більш точно та обґрунтовано підходити до питання оцінювання небезпеки поширення пожежі по зовнішнім вертикальними будівельними конструкціями та враховувати їх конструктивні особливості, в тому числі, в разі обладнання їх фасадними протипожежними перешкодами.

Планується досягти економічного ефекту, оскільки відомо, що відновлення 1м<sup>2</sup> житлового, громадського чи адміністративного будинку не менше ніж на 14% дорожче ніж нове будівництво [71].

Аналіз літературних джерел показав, що для розв'язання визначених проблем існує перспектива у методів комп'ютерного моделювання процесів поширення пожежі по фасадам будівель. Також можливо досягнути поставлені задачі за рахунок створення удосконаленого стенду для проведення натурних випробувань з метою проведення оцінювання забезпечення обмеження поширення пожежі по фасаді при застосуванні

фасадних протипожежних перешкод. Існуючі підходи не адаптовані та не апробовані для вирішення зазначених вище завдань та повинні отримати подальший розвиток під час використання, як складних уточнених математичних моделей, що реалізуються за допомогою сучасного комп'ютерного забезпечення, так і спрощених розрахункових та табличних методів. Для цього потрібно провести додаткові дослідження параметрів, які впливають на ефективність обмеження поширення пожежі з поверху де виникла пожежа на вище розташовані поверхи.

Таким чином, розвиток нових методів прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель та її обмеження протипожежними перешкодами на основі методів комп'ютерного моделювання, натурних випробувань чи табличного методу є актуальним напрямком наукових досліджень. При цьому, планується забезпечити виконання основної вимоги Закону України «Про надання будівельної продукції на ринку» як основоположний технічний регламент для будівельної продукції в частині забезпечення обмеження поширення пожежі, забезпечення несучої здатності конструкції протягом певного проміжку часу та забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів.

Виходячи із вище викладеного сформульовані мета дослідження та задачі дисертації.

**Мета дослідження:** Розкриття механізму поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі для запобігання поширення пожежі ззовні будівлі, як наукове підґрунтя для встановлення вимог пожежної безпеки до будівель.

**Задачі дослідження:**

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

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

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

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

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

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

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

- на основі отриманих закономірностей розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівлі, яке включає

спрощений метод розрахунку та табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду;

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

## **РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ МЕХАНІЗМИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЛІ**

### **2.1 Теоретичні методи прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель**

В основі методів [29-31; 54-55] оцінювання можливості поширення пожежі по фасадам будівель покладено класичну теорію розвитку процесів переносу теплоти в просторі та у часі [72]. В результаті вирішення завдань тепломасообміну знаходяться розподіл температури, концентрації компонентів суміші, а також потоків тепла і маси як функції координат та часу. Теорія та методологія оцінювання розвитку фасадних пожеж [73-74] базуються двох ключових чинниках.

Перший чинник полягає у тому, що тепловий потік  $E_q$  поширюється крізь певний отвір (вікно) площею  $A$  ( $m^2$ ) у зовнішній огорожувальній конструкції, при цьому  $E_q$  залежить від розмірів отвору світлового прорізу та геометричної форми, зокрема його висоти  $H$ . Слід відзначити, що для даної теорії не враховуються такі супутні чинники як зміна температури навколишнього середовища, атмосферний тиск, вітрові впливи та інші супутні чинники, які можуть впливати на дані процеси.

Другий чинник полягає у відсутності отвору, як такого, а тепловий потік поширюється через всю площу зовнішньої огорожувальної конструкції, що відповідає повній висоті поверху, де відбувається пожежа та що є характерно під час руйнування склопрозорих фасадних систем із панорамним застосуванням. На рис. 2.2 наведено візуалізацію конструктивного виконання зовнішніх огорожувальних конструкцій.



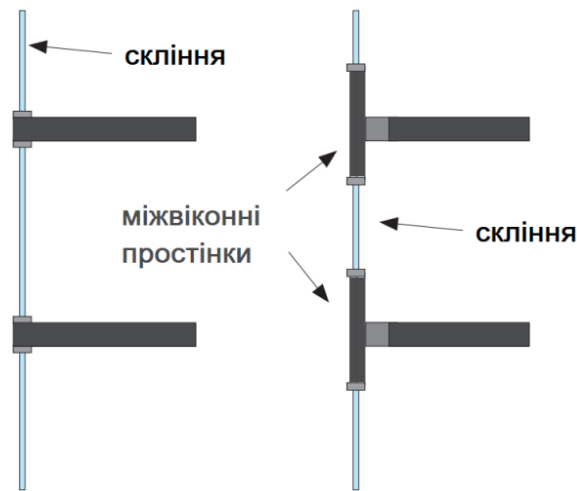


Рисунок 2.1 – схематична візуалізація основних типів конструктивного виконання зовнішніх огорожувальних конструкцій

Приплив повітря до камери де розміщено вогнище пожежі можна виразити рівнянням [73;74]:

$$m_a = 0,5AH^{0.5}, \quad (2.1)$$

де  $A$  = площа отвору,  $H$  = висота отвору, а коефіцієнт  $0,5$  має розмірне значення  $\text{кг/с} \cdot \text{м}^{5/2}$ .

Загальна масова швидкість піролізу всередині приміщення, де відбувається горіння (камери горіння) [73;74]:

$$m_T = 0,1AH^{0.5} = 0,2m_a. \quad (2.2)$$

Паливо, що згорає всередині вогневої камери, має стехіометричну пропорцію до вхідного повітря  $S$  і становить наступне співвідношення маси повітря до палива [75;76]:

$$m_{ins} = \frac{m_a}{S}, \quad (2.3)$$

Звідси випливає, що швидкість горіння палива на зовнішній поверхні фасаду становить [75;76]:

$$m_{ext} = m_T - \frac{m_a}{S} = m_a \left(0,2 - \frac{1}{S}\right), \quad (2.4)$$

Значення теплового потоку що виділяється ззовні на фасаді є [75;76]:

$$\dot{Q}_{ext} = \dot{m}_{ext} \Delta H_C = \dot{m}_a \left(0,2 - \frac{1}{S}\right) \Delta H_C = \left(\dot{m}_T - \frac{\dot{m}_a}{S}\right) \Delta H_C, \quad (2.5)$$

де  $\Delta H_C$  – значення теплоти згоряння палива.

Значення висоти полум'я, що створюється швидкістю зовнішнього тепловиділення, становить [75;76]:

$$\begin{aligned} Z_f &= 3,2 \dot{Q}_{\ell_1}^{*2/3} \text{ for } \dot{Q}^* < 1,3 \\ Z_f &= 3,2 \dot{Q}_{\ell_1}^{*2/5} \text{ for } \dot{Q}^* > 1,3 \end{aligned} \quad (2.6)$$

де значення довжини  $l_1 = (\Delta H^{0.5})^{2/5}$ .

При цьому нормалізована кількість тепловиділення визначається як [96]:

$$\dot{Q}_{\ell_1}^* = \frac{\dot{Q}_{ext}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} \ell_1^{5/2}} = \frac{\Delta H_C}{c_p T_{\infty}} \left( \frac{0,5}{\sqrt{g} \rho_{\infty}} \right) \left(0,2 - \frac{1}{S}\right), \quad (2.7)$$

де  $c_p$  – питома теплоємність повітря, що дорівнює 1 кДж/кг·К;  $T_{\infty}$  – температура навколишнього повітря, що приймається під час випробувань згідно із температурою навколишнього середовища, або умовно приймається 293 К;  $g$  — прискорення сили тяжіння;  $\rho_{\infty}$  – густина навколишнього повітря;  $S$  – стехіометричне масове співвідношення повітря та палива.

Згідно досліджень [77] відзначається, що нормалізована швидкість зовнішнього тепловиділення в рівнянні (1.7) не залежить від геометрії приміщення та геометрії предметів, які в ньому знаходяться. Крім того, початкова відмітка для розрахунку висоти полум'я знаходиться на висоті  $0,4H$ , що відповідає відмітці на рівні центру площини для полум'яного потоку на отворі. На рис. 2.2 наведено схему розрахунку висоти полум'я.

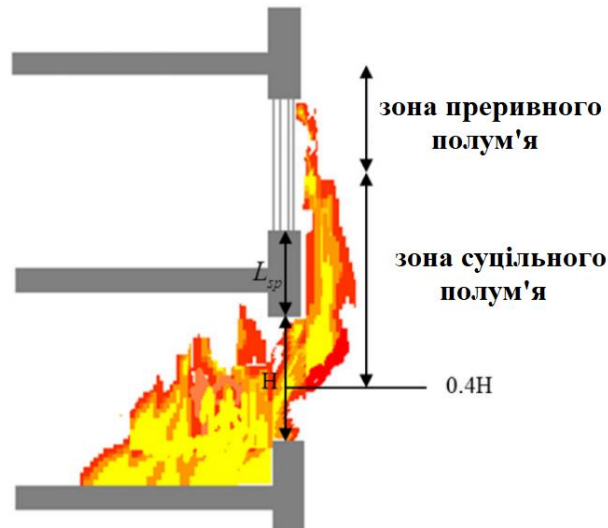


Рисунок 2.2 – Схема розрахунку висоти полум'я із отвору у зовнішній огорожувальній конструкції

На основі досліджень [77] зроблено припущення що геометричні параметри зони суцільного полум'я становить  $0,8 Z_f$  середньої висоти полум'я  $Z_f$ .

Разом із тим, згідно із дослідженнями [78] виведено залежність між висотою полум'я, масовою швидкістю горіння та шириною отвору через яке виходить полум'я, що виражається рівнянням:

$$z_1 + H = 18.6 \left( \frac{R}{W} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.8)$$

де  $z_1$  - висота полум'я над верхньою частиною вікна, м;

$H$  – висота отвору вікна, м;

$W$  – ширина вікна, м;

$R$  - швидкість згоряння палива, (кг/с);

Схема рис. 2.3 візуалізує параметри полум'я, що визначається

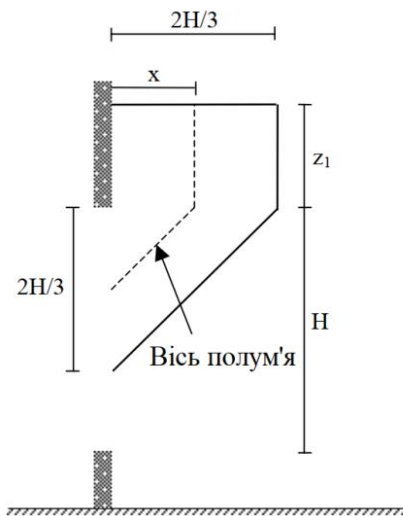


Рисунок 2.3 – Схема розрахунку параметрів полум'я із отвору у зовнішній огорожувальній конструкції

Значення теплового потоку в зоні суцільного полум'я має максимальне сталі значення, яке можна описати рівнянням на основі формули 1.9 за [78].

$$q''_{t,\max} = 0.35 \frac{\dot{Q}_{\text{ext}}}{Z_f e^{0.6(\frac{H}{l_1})} l_1} = 0.35 \frac{\dot{Q}_{\ell_1}^{*1/3} \rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} l_1^{1/2}}{3.2 e^{0.6(\frac{H}{l_1})}} = 0.1 \frac{\dot{Q}_{\ell_1}^{*1/3} \rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g} l_1^{1/2}}{e^{0.6(\frac{H}{l_1})}} \quad (2.9)$$

За методикою [78] даний режим полум'я класифікується як режим I. Після режиму суцільного полум'я описується переривчастий режим II, а потім плаваючий режим (режим не стабільного вогневого утворення).

За безперервним режимом полум'я слідує переривчастий режим II, який описується наступними рівняннями [77]:

$$q''_t = q''_{t,\max} \text{ for } Z < 0.8Z_f, \quad (2.10)$$

Для рівнянь 1.9 та 1.10 справедливе рівняння

$$\frac{\dot{q}_t''}{\dot{q}_{t,\max}''} = 0.64 \left( \frac{Z}{Z_f} \right)^{-2} \text{ for } Z > 0.8Z_f. \quad (2.11)$$

Плаваючий режим теплового потоку III вище рівня полум'я не враховується, як такий через відсутність значного впливу на формування температурного режиму та відповідно значення теплового потоку, що опромінює фасад будівлі.

Для випадків, коли пожежа може поширюватися крізь певний отвір (вікно) площею  $A$  ( $\text{m}^2$ ) у зовнішній огорожувальній конструкції, в тому числі з врахуванням наявності між віконних простінків приймається умова, що полум'я не пошириться по фасаді на вище розташований поверх, якщо максимальне значення теплового потоку  $\dot{q}_{t,\max}$  у нижній частині цього вікна менше за критичне значення теплового потоку  $\dot{q}_{cr}$  для руйнування конструкцій заповнення прорізу (вікна, склопакету тощо). Відмітку розташування нижньої частини вікна від початку координат визначають за формулою [78]:

$$Z_{sp} = 0.6H + L_{sp}. \quad (2.12)$$

Залежність формулювання умови поширення пожежі має наступний вигляд за [98]:

$$\frac{Z_{sp}(= 0.6H + L_{sp})}{Z_f} = 0.8 \left( \frac{\dot{q}_{t,\max}''}{\dot{q}_{cr}''} \right)^{1/2} \text{ if } \dot{q}_{cr}'' \leq \dot{q}_{t,\max}'' \quad , \quad (2.13)$$

Згідно з критеріями методики [31] обмеження поширення пожежі є достатньо ймовірним, якщо значення теплового потоку у центрі вікна на поверсі, що розташований над поверхом пожежі перевищує  $80 \text{ кВт/м}^2$ .

Методи визначення теплових впливів згідно з методом [78] дозволяє визначати параметри випромінювання та конвекції для пожежного навантаження у вогневій камері  $q_{f,d}$  більше  $200 \text{ МДж/м}^2$ .

Швидкість тепловиділення визначається за [78]:

$$Q = \min \left( (A_f \cdot q_{f,d}) / \tau_F; 3,15(1 - e^{-0,036/0}) A_v \left( \frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{1/2} \right), \quad (2.14)$$

При цьому висота полум'я пожежі  $L_L$  визначається [78]:

$$L_L = \max \left( 0; h_{eq} \left( 2,37 \left( \frac{Q}{A_v \rho_g (h_{eq} g)} \right)^{2/3} - 1 \right) \right), \quad (2.15)$$

Параметри полум'я, що виходить із отвору (вікна) на рівні поверху пожежі залежить від наявності на вище розташованому поверсі негорючого міжвіконного простінку або його відсутності (та відповідно наявності суцільного вікна). Параметри полум'я для випадку наявності вище розташованого міжвіконного простінку визначається згідно зі схемою наведеною на рис. 2.4 за [79]:

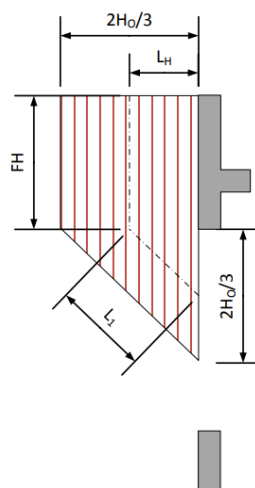


Рисунок 2.4 – Схема розрахунку параметрів полум'я із отвору у зовнішній огорожувальній конструкції

При цьому значення  $L_L$  визначається залежністю [79]:

$$L_L = \sqrt{L_H^2 + \frac{h_{eq}^2}{9}} \cong \frac{h_{eq}}{2}, \quad (2.16)$$

При цьому довжина полум'я  $L_f$  визначається за формулою [79]:

$$L_f = L_L + L_1, \quad (2.17)$$

Параметри полум'я, для випадку зменшеного міжвіконного простінку на рівні вище розташованого, поверху визначається згідно зі схемою наведеною на рис. 2.5.

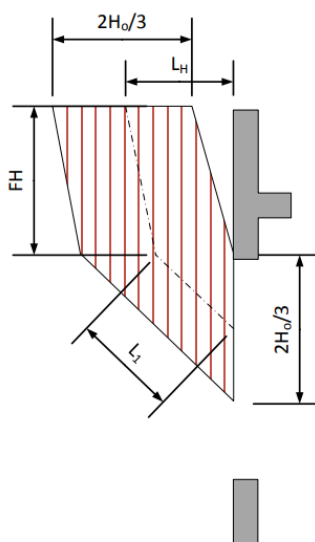


Рисунок 2.5 – Схема розрахунку параметрів полум'я із отвору у зовнішній огорожувальній конструкції при зменшеному міжповерховому простінку

Для даних умов, значення  $L_L$  визначається за формулою [79]:

$$L_L \cong \frac{h_{eq}}{2}, \quad (2.18)$$

При цьому довжина полум'я  $L_f$  для даного випадку визначається за формулою [79]:

$$L_f = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3}\right)^2} + L_1, \quad (2.19)$$

Глибина полум'я становить  $2/3$  висоти вікна, тобто  $2/3h_{eq}$ .

Горизонтальна проекція полум'я для випадків наявності міжвіконного простінку над вікном де є пожежа визначається за формулами згідно з [79]:

$$L_H = h_{eq}/3, \text{ якщо } h_{eq} \leq 1,25wt, \quad (2.20)$$

$$L_H = 0,3h_{eq}(h_{eq}/wt)^{0,54}, \text{ якщо } h_{eq} > 1,25wt, \quad (2.21)$$

в інших випадках:

$$L_H = 0,454h_{eq}(h_{eq}/2wt)^{0,54}. \quad (2.22)$$

Для випадків відсутності міжвіконних простінків та суцільного скління зовнішніх огорожувальних конструкцій (світлопрозорі фасадні системи) для визначення горизонтальної проекції полум'я слід використовувати наступну залежність [79]:

$$L_H = 0,6h_{eq}(L_L/h_{eq})^{1/3}. \quad (2.23)$$

Довжина полум'я вздовж осі фасаду визначається за формулами: якщо  $L_L > 0$ , то за [79]:

$$L_f = L_L + h_{eq}/2. \quad (2.24)$$



У разі наявності міжвіконного простінку над вікном пожежі або  $h_{eq} \leq 1,25wt$  довжина полум'я вздовж осі фасаду приймається як  $L_f=0$  та  $L_L=0$ .

Температура полум'я у вікні пожежі визначається за формулою [79;80]:

$$T_w = 520 / [1 - 0,4725(L_f \cdot wt / Q)] + T_0, \quad (2.25)$$

де  $L_f \cdot wt / Q < 1$

Температура полум'я вздовж осі фасаду визначається за формулою [79;80]:

$$T_z = (T_w - T_0) [1 - 0,4725(L_f \cdot wt / Q)] + T_0, \quad (2.26)$$

де  $L_f \cdot wt / Q < 1$ ;

$L_x$  – відстань вздовж осі від вікна до точки фасаду, для якою проводиться розрахунок.

Коефіцієнт випромінювання полум'я визначається за формулою [79;80]:

$$\varepsilon_f = 1 - e^{-0,3d_f}, \quad (2.27)$$

де  $d_f$  – товщина полум'я [м]

Коефіцієнт конвекційного теплообміну визначається за формулою [79;80]:

$$\alpha_c = 4,67(1/d_{eq})^{0,4}(Q/A_v)^{0,6}. \quad (2.28)$$

Методика [78] передбачає зміну горизонтальної проекції полум'я в разі наявності горизонтальних виступів конструкції фасаду за межі основної вертикальної площини на відстань (a-b), що наведено на рис. 2.6.

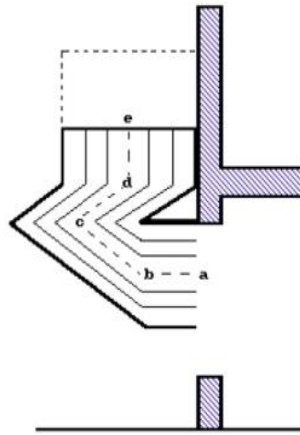


Рисунок 2.6 - Схема розрахунку параметрів вихідного полум'я із отвору у зовнішній огорожувальній конструкції при наявності вище розташованого карнизу

Добуток значень параметрів  $a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e = L_f$ , при цьому значення  $w_a = a \cdot b$ . Згідно з даними [78] для умов наявності карнизу проте при відсутності вищерозташованого міжвіконного простінку значення висоти полум'я  $L_L$  зменшується на значення  $W_a$ . При цьому горизонтальна проекція  $L_H$  з урахуванням значення  $L_L$  збільшується на  $W_a$ . В дослідженнях [79;80] досліджено питання теоретичних методів прогнозування поширення пожежі по паралельних, кутових та похилих поверхнях фасадів. Зокрема в дослідженні [80] запропоновані теоретичні методи поширення полум'я для прилеглих фасадів, які знаходяться під кутами  $60^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $120^\circ$ ;  $150^\circ$ ;  $180^\circ$ . За результатами даних експериментальних та теоретичних обґрунтувань встановлено, що тепловий потік від полум'я для кутових фасадів можна виразити наступною залежністю:

$$q_f'' = C_{q,L} B L (\sin \alpha L)^{2/5} x_p^{1/5}, \quad (2.29)$$

де  $q_f''$  – значення теплового потоку від полум'я,  $\phi$  – кут прилягання;  $x_p$  – значення довжини полум'я.

В дослідженнях [81;82] досліджувалися питання лінійної залежності характеристики поширення полум'я. Разом із тим, в роботі [83] за допомогою експериментальних досліджень доведено нелінійну залежність значення коефіцієнту швидкості вигорання модельного вогнища пожежі  $\eta$  та значення кута прилеглої площини фасаду, що наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнту швидкості вигорання модельного вогнища пожежі  $\eta$  в залежності від кута прилягання суміжної площини фасаду

Кут прилягання площини	60°	90°	120°	150°	180°
$\eta$	34,10%	31,78%	33,20%	40,48%	51,52%

Аналіз вище приведених даних демонструє, що швидкість вигорання та значення кута суміжно розташованого фасаду є нелінійними, тобто значення коефіцієнту  $\eta$  спочатку зменшується зі збільшенням в куті, а потім збільшується. Це явище описується як наслідком ефекту «димоходу» зв'язку з обмеженим доступом повітря до камери згорання, при цьому зменшення кута спричиняє збільшення значення теплового опромінення суміжної площини фасаду. Значення теплового випромінювання  $q_r$  відносно зони нагріву суміжно розташованої площини  $q_{rs}$  та площі  $F_s$  вважається сталою величиною  $q_{r'inc}$  протягом кожного випробування та розв'язується граничними умовами наведеними в рівняннях:

$$q_r = \alpha q_{r'inc} - \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (2.30)$$

де  $\sigma$  – постійна Стефана–Больцмана ( $= 5.67 \times 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>));  $T_s$  – температура поверхні (К);  $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювання,  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання.

Інтенсивність опромінення поверхні, що випромінюється гарячою поверхнею, буде зменшуватися при збільшенні значення відстані віддалення від поверхні випромінювання. Мірою цього зменшення є так званий коефіцієнт,  $\phi$  Бьюкенена. В роботі [84] приводиться математичний вираз для визначення коефіцієнта  $\phi$  Бьюкенена при умовах наявності прямокутного випромінювача та прямокутної поверхні опромінення на різних дистанціях:

$$\phi = \frac{1}{360} \left[ \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \tan^{-1} \left( \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} \right) + \frac{y}{\sqrt{1+y^2}} \tan^{-1} \left( \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} \right) \right], \quad (2.31)$$

де  $x = H_{f/r}$ ;  $y = W_{f/r}$ ;  $H_f$  – висота прямокутного вікна;  $W_f$  – ширина прямокутного вікна;  $r$  – відстань між випромінюючою та опроміненою поверхнею.

Серед теоретичних підходів прогнозування поширення пожежі крізь отвори у зовнішніх стінах слід відмітити дослідження Томаса [85], який визначив залежність розмірів плавучого дифузійного полум'я від геометричних параметрів отвору з якого поширюється полум'я.

Як граничний критерій, за яким робився висновок щодо поширення пожежі на верхній поверх прийнято значення температури у  $500^\circ\text{C}$  на рівні нижнього краю вікна, що розташоване над поверхом де відбувається пожежі. Дана залежність має наступний вигляд [86]:

$$\frac{L}{D} = f \left( \frac{v^2}{gD} \right) = f \left( \frac{Q^2}{gD^5} \right), \quad (2.32)$$

де  $L$  = висота полум'я, м;  $D$  = діаметр отвору, м;  $v$  = швидкість витoku з отвору, м/с;  $Q$  = об'ємна витрата через отвір,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

В майбутньому Томас переглянув дану залежність в частині визначення об'ємної витрати не тільки для круглого отвору але і для прямокутного і виразив її наступною залежністю [86]:

$$\frac{L}{D} = 400 \left( \frac{R^2}{D^5} \right)^{1/3}, \quad (2.33)$$

де  $D$  = висота прямокутного отвору;  $R$  = швидкість згоряння палива.

Слід відзначити, що еквівалент швидкості горіння заснований на даних щодо швидкості горіння для деревини зі значенням теплоти згоряння  $h_c = 16\,800$  кДж/кг. Отримані залежності були зкорильовані для випадків коли на кожному із досліджуваних поверхів наявні віконні міжповерхові простінки між отворами  $\frac{z}{r_o}$  мають висоту менше 1 м. Для круглих отворів виведено наступну залежність [87]:

$$\frac{z}{r_o} = \frac{A}{\theta} \text{ для } \frac{z}{r_o} > 1, \quad (2.34)$$

де  $A$  – співвідношення ширини  $W$  до висоти  $H$  вікна, що виражається як [49]:

$$A = \left( \frac{H_o}{2W_o} \right)^{1/3}, \quad (2.35)$$

$\theta$  - безрозмірна величина, що представляє підвищення температури прогріву по центру опроміненого фасаду [87]:

$$\theta = \frac{\Delta\theta r_o^{5/3}}{\sqrt[3]{\frac{\dot{Q}^2 \theta_o}{c_p^2 \rho^2 g}}}, \quad (2.36)$$

де  $r_o$  виражається як [87]:

$$r_o = \sqrt{\frac{H_o W_o}{2\pi}}, \quad (2.37)$$

де  $r_o$  – еквівалентний радіус відкритого отвору, м

$Q$  - швидкість тепловиділення з отвору за одиницю часу кДж/с;

$\theta$  – температура, К

$\rho$  – густина газу від полум'я пожежі, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  - питома теплоємність струйних газів при постійному тиску, кДж/(кг·К);

$g$  - прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>.

Таким чином висоту полум'я можна виразити наступними залежностями [88]:

$$L = z + H_o = 18.6 \left( \frac{R}{W_o} \right)^{2/3}, \quad (2.38)$$

або

$$\left( \frac{\eta^{1/3}}{r_o} \right) L = 18.6 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{\pi^{1/3} h_c^{2/3} r_o^{5/3}}. \quad (2.39)$$

Дослідження Мізуно та Каваго [89] щодо теоретичних основ прогнозування поширення пожежі по вертикальним фасадам дозволило візуалізувати основні параметри у вигляді схеми наведеної на рис. 2.7.

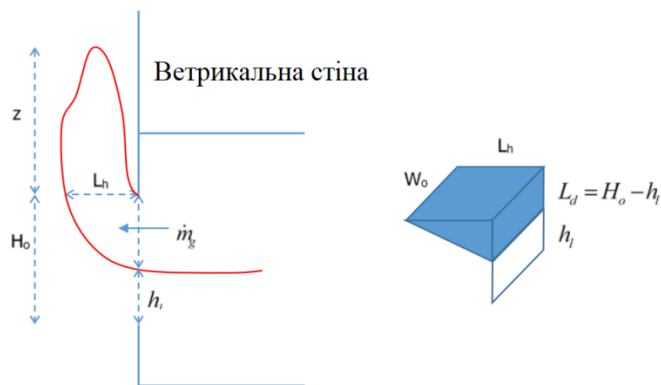


Рисунок 2.7 – Візуалізація параметрів, які впливають на поширення пожежі по вертикальним конструкціям

Для проведення оцінювання критичного значення теплового потоку, який утворюється в результаті дії параметрів відкритого полум'я, що виходить із нижче розташованого отвору, виведено математичну залежність, яка має наступний вигляд [89]:

$$\dot{m}_g u = (\rho_\infty - \rho_g) g V = (\rho_\infty - \rho_g) g \left( \frac{L_h W_o (H_o - h_l)}{2} \right), \quad (2.40)$$

де  $\dot{m}_g$  = значення теплового потоку;  $u$  = усереднена швидкість витоку, м/с;  $\rho_\infty$  = середнє значення густини повітря кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_g$  = середнє значення густини газу, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$ , м/с<sup>2</sup>;  $V$  = об'єм витоку, м<sup>3</sup>;  $L_h$  = розрахункова ширина полум'я, м;  $W_o$  = ширина отвору, м;  $H_o$  = висота отвору, м;  $h_l$  = нейтральна висота площини, м.

При цьому [89]:

$$\dot{m}_g u = (\rho_\infty - \rho_g) g V = (\rho_\infty - \rho_g) g \left( \frac{L_h W_o (H_o - h_l)}{2} \right), \quad (2.41)$$

Середня вихідна швидкість теплового потоку виражається [50]:

$$u = \frac{\dot{m}_g}{\rho_g W_o (H_o - h_l)}, \quad (2.42)$$

Виразення цієї швидкості з кореляцією імпульсу та витоку та її перегрупування стає наступним [89]:

$$L_h = \frac{2\dot{m}_g}{\rho_g (W_o (H_o - h_l))^2 (\rho_\infty - \rho_g) g}. \quad (2.43)$$

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 [89]:

$$D = \left( \frac{8W_o \dot{m}_g^2 T_g^2}{\pi \rho_\infty^2 T_\infty (T_g - T_\infty) g (W_o (H_o - h_l))^2} \right)^{0.5}, \quad (2.44)$$

Ігор Олешкевич [106] на основі наведених залежностей провів повномасштабні експериментальні дослідження залежностей поширення теплового потоку уздовж стіни фасаду над отвором пожежі за допомогою модельних вогнищ класу А різної потужності. Суть досліджень полягала у визначенні значень теплового потоку на різній висоті над вогневою камерою в залежності від геометричних розмірів вікна (висоти, ширини) вогневої камери, пожежного навантаження модельних вогнищ, а також відповідно висоти самого полум'я. Результати цих досліджень наведені у зведеній таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Дані щодо значень теплових потоків на фасаді будинку і залежності від типу вікна та значення теплового потоку

Тип вікна	Параметри отвору вікна			Значення теплового потоку енергії	Висота полум'я	Тепловий потік на одиниці поверхні (кВт/м <sup>2</sup> )			
	ширина W <sub>o</sub> (м)	висота H <sub>o</sub> (м)					Вт	(м)	0,5
1	0,94	2	4,0	5,5	5	43,9	12,4	7,7	3,9
	0,94	2	4,0	6,9	6	58,6	17,7	9,9	5,1
	0,94	2	4,0	8,6	7	75,5	25,9	15,9	8,1
	0,94	2	4,0	10,3	-	-	-	-	-
2	0,94	2,7	6,3	5,5	-	19,2	6,3	3,5	1,7
	0,94	2,7	6,3	6,9	-	34,8	10,4	6	3
	0,94	2,7	6,3	8,6	6,2	53,2	15,9	9,8	4,8
	0,94	2,7	6,3	10,3	-	68,3	23,2	13,7	6,7
3	2,6	1,4	6,5	5,5	3,9	24,5	22,9	13,2	11,5
	2,6	1,4	6,5	6,9	4,4	53,2	33,1	17,2	15,6
	2,6	1,4	6,5	8,6	5,1	104,3	58,6	51,2	28,3
	2,6	1,4	6,5	1,03	6,4	208,7	122,4	103,9	56,5
4	2,6	2	11,0	5,5	-	10,5	5,2	4,5	2,9
	2,6	2	11,0	6,9	4,5	17,4	9,4	7,4	5,4
	2,6	2	11,0	8,6	5	29,5	14,8	12,6	8,2
	2,6	2	11,0	10,3	5,5	43,4	20,8	16,3	9,6



## Продовження таблиці 2.2

5	2,6	2,7	17,3	5,5	-	6,5	2,9	2	1,4
	2,6	2,7	17,3	6,9	5,2	11,4	5,3	4,2	2,9
	2,6	2,7	17,3	8,6	5,9	17,4	8,1	5,7	3,6
	2,6	2,7	17,3	10,3	6,2	29,1	12,8	9,1	5,6

Окремо слід відмітити дослідження [90] ефективності «горизонтальних виступів» за межі площини фасаду, які в майбутньому отримали термін протипожежні карнизи. За результатом ряду натурних випробувань Ігоря Олешкевича (Канада) отримав залежності зміни значень теплового потоку на рівні 1 м над віконним отвором (шириною 2,24 м та висотою 0,96 м), який обладнано протипожежним карнизом із шириною 0,0, 0,3, 0,6 та 1 м. Питоме тепловиділення від пожежі становило  $3000 \text{ кВт/м}^2$ . На основі проведених досліджень було визначено, що для вікна 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%. На рис. 2.8 наведено графіки залежності зміни відносного зменшення впливу теплового потоку при застосуванні протипожежних карнизів різної ширини.

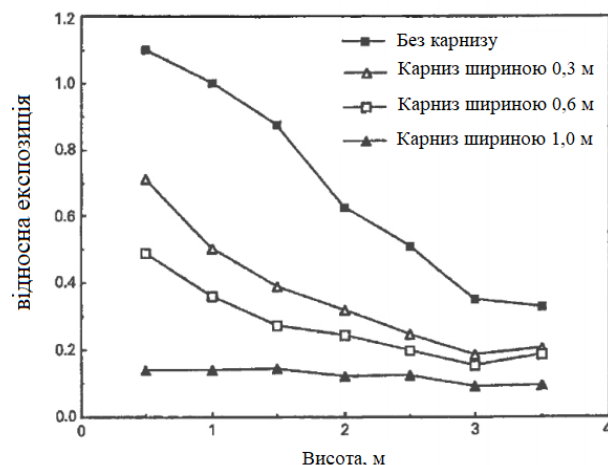


Рисунок 2.8 – Графік зміни відносного зменшення впливу теплового потоку при застосуванні протипожежних карнизів

Слід відзначити, що дані залежності були повторно перевірені та підтверджені в роботі [91] що дозволяє сприймати наведені результати як цілком верифіковані. Разом із цим, представлені залежності залишають ряд невирішених питань щодо обґрунтування типу модельного вогнища пожежі, тривалості проведення випробувань, обраних геометричних параметрів отвору, що імітує вікно, ухилів фасаду, кутів прилягання суміжних фасадів, вертикальних ухилів фасаду тощо, що є предметом подальших досліджень.

Недоліками основних існуючих теоретичних методів прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель слід відзначити слабку адаптацію задач теплообміну між факелом пожежі та будівлі із складними геометричними формами фасаду. Аналіз рівнянь з визначення впливу теплового потоку, температури та факелу пожежі на вище розташований фрагмент фасаду не в повній мірі враховують кути прилягання суміжно розташованих площин фасадів. Окрім цього, не враховується можливість знаходження основної площини фасаду під певним вертикальним кутом, що в умовах сучасної архітектури є актуальним.

Під час проведення розрахункової оцінки поширення пожежі по фасаді будівлі за суттєву параметричну характеристику приймається значення теплового потоку або температури, при цьому відсутні єдині підходи щодо критеріїв, якими обумовлюються ті чи інші критичні значення. Як приклад, серед таких критеріїв може бути критичні значення температури чи теплового потоку руйнування віконних конструкцій. Також залишаються не визначеними теоретичні підходи прогнозування поширення пожежі по фасадам в разі утворення початкового осередку пожежі не всередині приміщення будівлі, а із зовні фасаду. Серед таких сценаріїв може бути займання зовнішніх кондиціонерних блоків або поширення пожежі через вікно внутрішнього фасаду, який виходить у замкнутий внутрішній двір.

## **2.2. Оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі за допомогою обчислювальних методів комп'ютерної математики**

Проведення повномасштабних випробувань за допомогою математичного моделювання чинників впливу на поширення пожежі зовнішніми огорожуючими конструкціями є сучасним підходом дослідження пожежної безпеки фасадних систем. Серед симуляторів математичних моделей за методами обчислювальної газодинаміки або гідродинаміки слід відзначити можливість їх реалізації за допомогою програмних комплексів Computational Fluid Dynamics (CFD) або Fire Dynamics Simulator (FDS) [92].

Для розрахунку поширення тепла від факелу пожежі до вище розташованих конструктивних елементів фасадної системи, як правило використовують обчислювальну гідродинамічну модель тепломасопереносу під час горіння, яка чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, в якій важливим аспектом є процеси теплопередачі під час пожежі.

Дана модель представляє собою систему диференціальних рівнянь, які описують закони збереження маси, імпульсу та енергії з частинними похідними [93] та вирішується на трьох-вимірній комірковій системі координат. Теплове та температурне випромінювання обчислюється методом кінцевих об'ємів на сітці аналогічного типу.

Слід відзначити, що натурні випробування на основі повномасштабних стендів дозволяють лише констатувати виконання якісних показників основних критеріїв успішного проведення випробувань щодо оцінки поширення пожежі по фасадам будівель [94]. Моделювання за допомогою математичних комплексів CFD та FDS дозволяє робити всебічну оцінку впливу пожежі на зовнішню огорожувальну конструкцію або дослідження обмеження поширення пожежі по ній за допомогою активних чи пасивних фасадних протипожежних перешкод.

Серед недоліків CFD та FDS моделювання можна відзначити необхідність проведення комплексної перевірки запропонованої тої чи іншої числової моделі із використанням повномасштабних натурних вогневих випробувань, що є досить вартісним [95]. Проте після повної верифікації такої моделі можливо досліджувати поведінку пожежі, температурні розподіли, зміну модельних сценаріїв, поведінку фізичних матеріалів та характер поширення вогню без використання високовартісних витратних матеріалів та залучення численного висококваліфікованого персоналу.

Впровадження таких обчислювальних методів комп'ютерної математики шляхом відтворення стандартизованих стендів для дослідження та оцінювання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям є поширеною практикою.

Одним із найпоширеніших методів оцінювання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі, що був неодноразово відтворений у вигляді математичної FDS моделі є метод SP 105 [31]. В роботах [96] описано процедуру створення та верифікації FDS моделі, що розроблена Лундським університетом (Швеція) на базі методики SP 105. Цінність звіту [96] полягає не тільки в проведенні численних натурних випробувань для якісної верифікації FDS моделі стандартизованого стенду на основі методики [31], але і оприлюднення вихідних кодів моделювання, що пройшли валідацію та можуть використовуватися для проведення розрахунків з оцінювання поширення пожежі по фасадам. На рис. 2.9 наведено фото натурального експериментального випробування та візуалізацію гідродинамічної комп'ютерної FDS моделі.

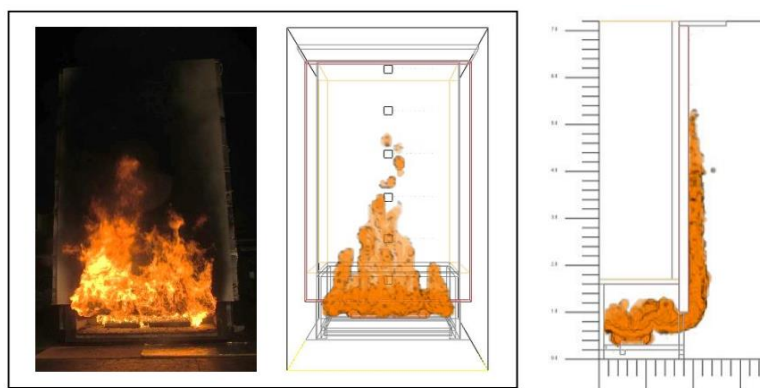


Рисунок 2.9 – Натурні випробування за методикою SP 105 та візуалізація FDS моделі

Дані звіту [98] представляють розроблені верифіковані моделі фасадів, в конструкції яких можливо використовувати наступні негорючі матеріали: сталь, бетон, легкий бетон, магнезитна плита або проматект (декоративна штукатурка), менеральна вата, легка клінкерна плитка. В табл. 2.3 наведено фізичні дані наведених матеріалів, що використовуються під час створення FDS моделі.

Таблиця 2.3 - Перелік матеріалів та їх теплофізичні властивості, що пройшли валідацію та використані у FDS моделюванні за [98]

Матеріали	Питома теплоємність [кДж/кг·К]	Теплопровідність [Вт/м·К]	Густина [кг/м <sup>3</sup> ]	Коефіцієнт випромінювання
Сталь	0,5	48	7800	0,9
легкий бетон	1,0	0,15	500	0,85
важкий бетон	1,0	0,7-1,5	2300	0,85
магнезитна плита	0,975	0,242	1000	0,9
менеральна вата	згідно даних характеристик виробника	0,032-0,036	140	0,87
легка клінкерна плитка для поліфасадів	згідно даних характеристик виробника	0,14-0,22	280	0,9

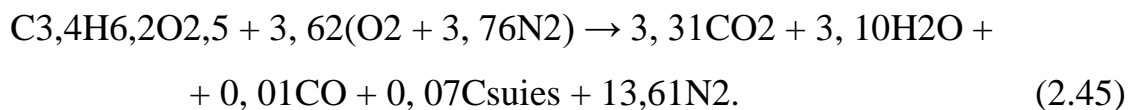
Рекомендований розмір комірок розрахункової сітки складає 5 см (загальна кількість розрахункових комірок в моделі 813888), при цьому

допускається проводити моделювання для розмірів комірки 10 см та 20 см. Температура на поверхні фасаду контролюється за допомогою п'яти термопар, а шоста термопара контролює температуру у вогневій камері.

В якості змодельованого джерела модельного вогнища пожежі використано гептан, а значення тепловиділення прийнято  $6200 \text{ кВт/м}^2$ .

Створена та стандартизована FDS модель дозволила обґрунтувати мінімальні розміри міжповерхових віконних простінків та параметри протипожежних карнизів визначених в нормах Швеції [99], при цьому отримані результати були імплементовані в будівельні норми Нової Зеландії та Норвегії [100;101]. Разом із цим, в Швеції мінімальні розміри протипожежних карнизів прийняті 60 см, а у Новій Зеландії 1,2 м, що обґрунтовується значним коефіцієнтом запасу, обґрунтування якого нажалі відсутнє.

Серед методик оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель, які були відтворені за допомогою математичного моделювання FDS слід відзначити метод LEPIR2 [34]. Дана математична модель була створена лабораторією «Efectis France» в 2016 році [102]. Серед особливостей даної FDS моделі є те, що в якості джерела вогню використовується два модельних вогнища пожежі класу А із масою 300 кг кожен. Реакцію горіння даного типу вогнища пожежі визначено наступним рівнянням [102]:



Теплота згоряння вогнища пожежі становить 14 МДж/кг. Проведене комп'ютерне моделювання динаміки пожежі за допомогою математичного інструменту FDS та порівняння отриманих результатів з експериментальними даними довели можливість використання відповідного програмного забезпечення для відтворення реальних умов виникнення пожеж у будинках та спорудах різного функціонального призначення [103].

На рис. 2.10 наведено графік кривих температурного режиму у вогневій камері за результатом натурних випробувань та проведеного FDS моделювання.

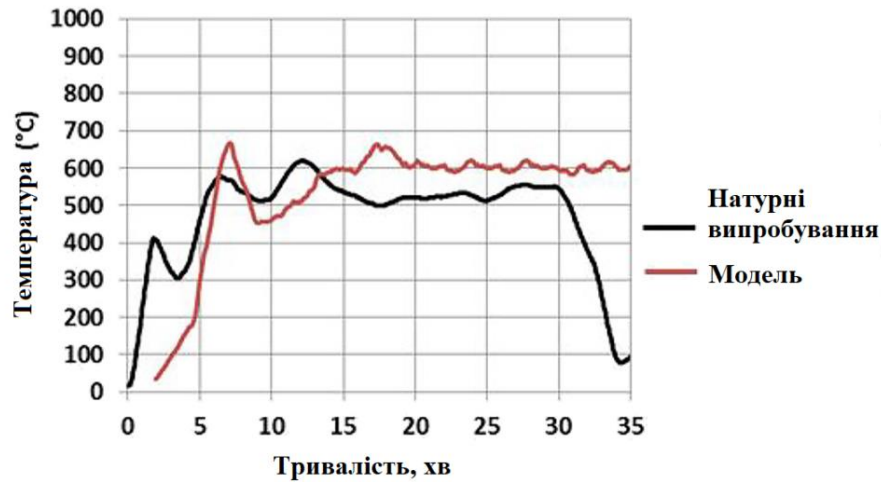


Рисунок 2.10 – Порівняльний графік температурних режимів у вогневій камері за методом LEPIR2

Авторами проведених досліджень [102] відзначено високий рівень збіжності досягнених результатів моделювання горіння модельного вогнища пожежі класу А (в межах 15%), незважаючи на те, що режим горіння даного типу модельного вогнища пожежі є набагато нестабільніший ніж для вогнища пожежі класу В. На рис. 2.11 наведено візуалізацію відтвореної FDS моделі та фрагмент натурних випробувань під час її верифікації.

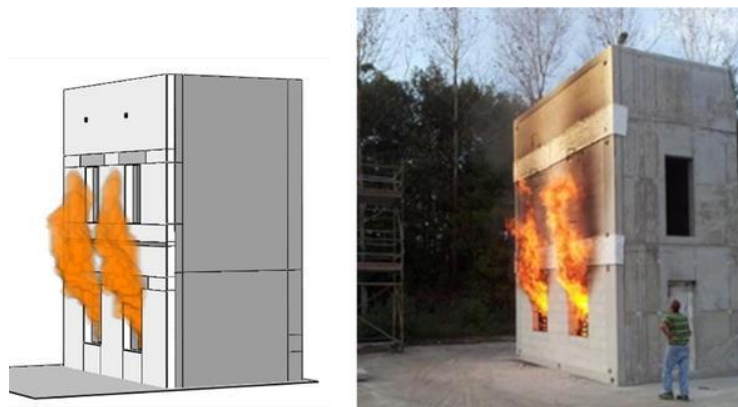


Рисунок 2.11 – візуалізація FDS моделі за методом натурних випробувань оцінювання поширення пожежі LEPIR2

В роботах [104; 105] було доведено спроможності математичної FDS моделі відтворювати необхідні режими температури та теплових потоків для досліджуваного типу фасаду, який проходить оцінювання. Стандартизований код моделі дає коректні теплові навантаження та форму полум'я біля фасаду під час випробувань, при цьому модель може бути використана для подальшої оцінки пожежної небезпеки облицювальних матеріалів які використовуються в конструкції фасаду. Разом із цим в роботі [106] відзначався досить помірний середній температурний режим пожежі на виході із верхнього краю вогневої камери (середні значення температури в межах 450-500 °C) у порівнянні із методикою [31] із значеннями 600-700 °C.

Таким чином застосування FDS моделювання процесів поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями за методами газодинаміки може реалізуватися в програмному комплексі Fire Dynamics Simulator (FDS) [92] та є перспективним напрямком теоретичних методів досліджень. Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується програма Smokeview (SMV) [107].

Перевагою кодування основних теплофізичних властивостей матеріалів, які закладаються в алгоритми моделей (густина, агрегатний стан, питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт поглинання та випромінювання, температура самозаймання) є можливість задавати початкові умови виключно на етапі введення вихідних даних без можливості коригування в процесі проведення розрахунків. Тобто даний алгоритм кодування запобігає можливості коригування результатів розрахунків у випадку виявлення невиконання поставлених критеріїв з успішного проведення оцінки стану обмеження поширення пожежі для об'єкту.

Серед існуючих недоліків програмного комплексу FDS є неповноцінне сприйняття геометричних форм об'єктів, що є проблемним аспектом, враховуючи нелінійні форми сучасних типів фасадів, а FDS забезпечує вирішення основних рівнянь тепло переносу виключно на прямокутній сітці.



В якості вирішення даної проблеми під час моделювання складних геометричних форм є зменшення розмірів розрахункових комірок сітки для створення прямокутників меншої форми, щоб задовольняти параметри кратності розрахункової матриці сітки.

### 2.3 Числова реалізація рівнянь математичних моделей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям

Для розрахунку поширення тепла від факелу пожежі по конструктивним елементам зовнішніх огорожувальних конструкцій запропоновано використати обчислювальну гідродинамічну модель тепломасопереносу під час горіння, яку чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, в якій основним процесом є теплопередача під час горіння вогнища пожежі.

Запропонована модель представляє зведену систему диференціальних рівнянь щодо збереження маси, імпульсу та енергії з частинними похідними [93] та вирішується на трьохвимірній розрахунковій сітці. Теплове випромінювання вирішується методом кінцевих об'ємів для тих самих умов, що продемонстровано в результатах роботи [108].

Математична модель описує просторово-часовий розподіл температури та швидкостей газового середовища (кисню, чадного газу, діоксиду вуглецю, а також інших продуктів горіння тощо), тисків та густин.

Рівняння збереження маси може бути представлене через густину [93]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b^m, \quad (2.46)$$

де  $t$  – час;  $\rho$  – густина;  $\vec{u}$  – вектор відносної швидкості,  $\dot{m}_b^m = \sum_a \dot{m}_{b,a}^m$  – швидкість утворення газових компонентів в наслідок випаровування,  $\vec{u}$  –

двохелементний тензор, в матричній системі  $\vec{u} = [u, v, w]^T$ , що представлений тензорним добутком векторів  $u$  та  $u^T$

Рівняння 2.2 можна виразити для індивідуальних газових компонентів (закон збереження окремих компонентів), для цього випадку воно набуває вигляду [93]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_a) + \nabla \rho Y_a u = \nabla \cdot \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a^m + \dot{m}_{b,a}^m, \quad (2.47)$$

де  $Y_a$  – концентрація  $a$ -го компонента реакції горіння,  $D_a$  – дифузійний коефіцієнт  $a$ -го компонента  $D_a = \frac{\mu_a}{\rho S_{ct}}$ ,  $\mu_a$  – молекулярна динамічна в'язкість  $a$ -го компонента,  $S_{ct}$  – турбулентне число Шмідта

Рівняння збереження імпульсу записується як [93]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (2.48)$$

де  $p$  – тиск,  $f_b$  – зовнішня сила, наприклад, такі як опір руху через краплі рідини,  $\tau_{ij}$  – тензор напруги обчислюється за формулою [93]:

$$\tau_{ij} = \mu \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot u) \right); \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}. \quad (2.49)$$

При цьому,  $S_{ij}$  – симетричний тензор швидкості деформації визначається [93]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3, \quad (2.50)$$

де  $\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість.

Рівняння збереження енергії може бути виражене через ентальпію ( $h_s$ ) [109]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \dot{q}^n - \varepsilon, \quad (2.51)$$

де  $h_s$  – ентальпія є функцією температури,  $h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$ ,

$h_{s,a}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,a}(T') dT'$ . З рівняння 2.7 можна отримати [109]:

$$\frac{Dp}{Dt} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p, \quad (2.52)$$

де  $\dot{q}^m$  - швидкість виділення тепла на одиницю об'єму із хімічної реакції;  $\dot{q}_b^m$  - витрачена енергія на випаровування крапель;  $\dot{q}^n$  - конвективні та радіаційні теплові потоки;  $\varepsilon$  - енергія розсіювання  $\varepsilon = \tau_{i,j} \nabla u = \mu (2S_{i,j} S_{i,j} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2)$ .

Конвективні та радіаційні теплові потоки ( $\dot{q}^n$ ) можливо виразити за рівнянням [109]:

$$\dot{q}^n = -k \nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r^n, \quad (2.53)$$

де  $k$  – теплопровідність.

Рівняння стану газу можна записати у вигляді [110]:

$$p = \frac{\rho R T}{\bar{w}} \quad (2.54)$$

де  $R$  – універсальна газова стала.

Обчислення представленої вище математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами газодинаміки може вирішуватись в

програмному комплексу Fire Dynamics Simulator (FDS) [107]. Для візуалізації отриманих результатів моделювання за допомогою програмного комплексу FDS використовується програма Smokeview (SMV) [107].

Базовим алгоритмом розрахунків є схема методу предиктора - коректора другого порядку точності по координатах температури і часу.

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого палива представляють у вигляді узагальненої хімічної вуглеводневої формули  $C_xH_yO_z$  ( $C_6H_6O$ ). Значення теплоти згорання рідкого палива визначають за такою формулою [110]:

$$LHV_{liq,fuel} = h_{liq,fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x+y+16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x+y+16z}, \quad (2.55)$$

де  $h_{lic,fuel}^0$ ,  $h_{CO_2}^0$ ,  $h_{H_2O}^0$  – теплоти утворення, вуглекислого газу й води;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Газова фаза представляє собою суміш із п'яти газів, ттаким чином основна система рівнянь 2.2, 2.4, 2.6 доповнена ще п'ятьма рівняннями для кожного зі складників суміші газів: летких  $C_xH_yO_z$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  і  $CO_2$ , що мають вигляд [111]:

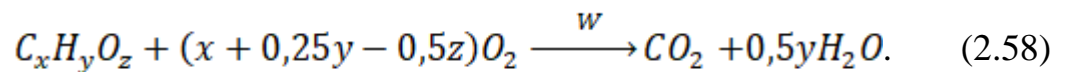
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \nabla(\rho u Y_k) = \nabla \left( \left( \rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{chem}, \quad (2.56)$$

де  $Q_i^{chem}$  - є швидкістю бруто-реакції газофазного горіння для першого рівняння летких, для інших приймається рівний нулю [111]:

$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,in} - m_{i,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.57)$$

де індекс  $i$  відноситься до газового компоненту, а індекс  $j$  – відповідної траєкторії частки;  $N_{pj}$  – кількість часток, що пролітають за секунду по траєкторії;  $\Omega_{cell}$  – об'єм розрахункового осередку.

Модель горіння визначають виходячи із показників витрати палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням [111]:



Швидкість реакції  $W$  визначають за стехіометричним коефіцієнтом. Який має наступний вигляд [111]:

$$\dot{i}_{chem} = \frac{32(x+0,25y-0,5z)}{12x+y+16z}. \quad (2.59)$$

Слід враховувати, що основні диференціальні рівняння газодинамічної моделі описують процеси передачі тепла лише в загальному вигляді. З метою вираження конкретного процесу, який розглядається та вираження його в математичній формі слід до диференціальних рівнянь додати математичний опис всіх особливостей процесу, що розглядається. Дані особливості, які спільно із диференціальними рівняннями дають повний математичний опис процесу передачі тепла називаються граничними умовами і можуть включати в себе:

- умови геометричних (конструктивних) параметрів, що характеризують форми і розміри об'єктів дослідження, зокрема фасадних конструкцій;

- фізичні умови, що характеризують фізичні властивості об'єктів дослідження;

- початкові умови, що характеризують розподіл температур на площині фасаду в початковий момент часу;
- умови, що характеризують умови взаємодії об'єкта дослідження (фрагменту споруди) із навколишнім середовищем [112].

Під час створення математичної моделі основним завданням є максимальне наближення параметрів моделі до реальних умов протікання процесу, що досліджується та взаємозв'язків об'єктів, які беруть участь у зазначеному процесі а саме: відстані між досліджуваними частинами фасадних конструкцій, масштаб об'єкту, матеріали з яких виконано об'єкт, параметри навколишнього середовища, пожежне навантаження модельного вогнища пожежі та їх реакція його горіння, вплив активних та пасивних систем перешкоджання поширення вогню, які інтегровано у фасадні системи, а також тривалість горіння. Сценарій або причини виникнення пожежі не розглядається.

Під час математичного опису геометричних умов задаються форма і лінійні розміри об'єкта дослідження (споруди) у масштабі до відповідних фактичних конструктивних умов. Під час математичного описання фізичних граничних умов задаються фізичні параметри матеріалів об'єкта дослідження, показники його пожежного навантаження та модельного вогнища пожежі, яке розміщене у вогневій камері.

Під час математичного вираження початкових граничних умов задається диктуюча точка, до якої прив'язується системи координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  – ширина, довжина, висота) по якій визначається розподіл температури тіла в початковий момент часу. В базовому вигляді початкові умови в аналітичному вигляді можна виразити [93]:

$$t = f(x, y, z). \quad (2.60)$$

Для випадку рівномірного розподілу температури початкові умови (при  $\tau=0$ ) мають наступний математичний вигляд [93]:

$$t = t_0 = \text{const.} \quad (2.61)$$

Граничні умови, що характеризують взаємодію об'єкта дослідження із навколишнім середовищем можуть бути представлені декількома способами.

Граничні умови першого роду. Задається розподіл температури на поверхні тіла для кожного проміжку часу [93]:

$$\Theta_c = f(x, y, z, \tau), \quad (2.62)$$

де  $\Theta_c$  - температура на поверхні тіла (фасаду);  $x, y, z$  - координати поверхні тіла.

Граничні умови другого роду. Задаються значення теплового потоку для кожної точки поверхні тіла і будь-якого моменту часу.

Це можливо виразити аналітично таким чином [93]:

$$q_n = f(x, y, z, \tau), \quad (2.63)$$

де  $q_n$  - щільність теплового потоку на поверхні тіла.

Для стандартних простих випадків щільність теплового потоку по поверхні і в часі залишається незмінною [93]:

$$q_n = q_0 = \text{const.} \quad (2.64)$$

Гранична умова третього роду описує рівняння закону теплообміну між поверхнею і навколишнім середовищем в процесі охолодження і нагрівання тіла. Для вираження процесів теплообміну між поверхнею тіла і середовищем використовується закон Ньютона-Рихмана, який визначає, що кількість теплоти, яка віддається одиницею поверхні тіла за одиницю часу, пропорційна різниці температур поверхні тіла  $t_c$  і навколишнього середовища  $t_{ж}$  ( $t_c > t_{ж}$ ) [113]:

$$q = \alpha (t_c - t_{ж}), \quad (2.65)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт пропорційності, що називається коефіцієнтом тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і зовнішнім середовищем. Чисельно він дорівнює кількості теплоти, що виділяє або сприймає одиниця поверхні в одиницю часу при різниці температур між поверхнею тіла і навколишнім середовищем, що дорівнює одному градусу. Відповідно до закону збереження енергії кількість теплоти, що відводиться з одиниці поверхні в одиницю часу внаслідок тепловіддачі, дорівнює кількості теплоти, що підводиться до одиниці поверхні в одиницю часу внаслідок теплопровідності, тобто [113]:

$$\alpha(t_c - t_{ж}) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c, \quad (2.66)$$

де  $n$  - нормаль до поверхні тіла; індекс "с" вказує на те, що температура і градієнт відносяться до поверхні тіла (при  $n = 0$ ).

Остаточну граничну умову третього роду можна записати у вигляді [113]:

$$\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t_{ж}). \quad (2.67)$$

Рівняння (2.67) по суті є виразом закону збереження енергії для поверхні тіла. Коефіцієнт тепловіддачі залежить від значної кількості чинників, зокрема матеріалів з яких виготовлено зовнішню огорожувальну конструкцію. Проте для однотипних за конструктивним виконанням частин фасаду коефіцієнт тепловіддачі можна вважати незмінним.

Існують випадки, коли всі перелічені граничні умов задати неможливо, і тоді для визначення теплової взаємодії між джерелом пожежі та поверхнею,



яка її сприймає слід вирішувати споріднену задачу. При вирішенні таких задач повинні виконуватися умови рівності температур і теплових потоків по обидва боки від межі розділу. У загальному випадку умови спорідненості можна записати [114]:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left( \frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma + q_v(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \\ t_1(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases}, \quad (2.68)$$

де  $q_v(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau)$  - джерела теплоти на поверхні межі;  $t_1, t_2, \lambda_1, \lambda_2$  - відповідно температури і коефіцієнти теплопровідності дотичних середовищ;  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  - координати поверхні розділу середовищ.

При відсутності на межі розділу процесів з виділенням або поглинанням теплоти умови спорідненості приймають вид [114]:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left( \frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma \\ t_1(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2(x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases}. \quad (2.69)$$

Розв'язок приведених базових рівнянь теплообміну між об'єктами під час пожежі полягає у апроксимації розрахункової області за допомогою адаптивної локально подрібненої сітки. Апроксимовані для розрахункової області рівняння можна виразити [114]:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST, \quad (2.70)$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)} (CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST, \quad (2.71)$$

де  $t$  – часовий крок;  $TC \cdot f$  – різницева апроксимація конвективного оператора, при цьому  $k=1$  (1-й порядок точності), а  $s=0$  (невраховане перенесення через

грані й вершини осередку);  $\nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1})$  – різницева апроксимація дифузійного оператора.

За результатом проведення низки послідовних ітерацій, отримуємо значення аналізованих функцій для певного моменту часу. Аналогічним чином проводимо розрахунки для кожного моменту часу.

Таким чином чисельна реалізація математичних моделей теплообміну між об'єктами під час пожежі дають змогу точно й ефективно змодельовати процес поширення тепла та температури від зони вогневої камери на поверхню вище розташованої площини фасадної конструкції за рахунок чого можна обґрунтовано визначити параметричним шляхом вплив фасадної протипожежної перешкоди на процеси обмеження поширення пожежі. При цьому можна врахувати тепловий вплив від суміжних площин, які прилягають до основної під певним кутом, а також кут ухилу відносно горизонталі основної досліджуваної площини фрагменту фасаду.

Процедуру обчислення польової математичної моделі тепломасопереносу під час горіння можливо представити в наступному вигляді. Програма FDS використовує кінцево-різницеві наближення другого порядку точності для базових рівнянь (2.2, 2.4, 2.6) на групі прямокутних сіток, що пов'язані між собою. Зміна газового потоку оновлюється в часі із використанням явної схеми Рунге-Кутта другого порядку. Для кожної комірки обчислювальної сітки в початковий момент часу розраховуються такі параметри як щільність, масова доля речовин, швидкостей компонентів та тиску з подальшим розрахунком цих параметрів в наступний момент часу. Після цього, відбувається взаємний обмін величинами на границях сітки із використанням граничних умов та вчислюється їх дивергенція порівнюючи із граничними умовами.

Для обчислення динамічної в'язкості ( $\mu$ ) застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Дані способи

визначають як моделі турбулентності. Найбільше поширення має стандартна  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. Згідно з цією моделлю, динамічну в'язкість визначають за виразом [115]:

$$\mu = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.72)$$

де  $C_\mu = 0,09$  – сталий коефіцієнт;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії;  $k$  – турбулентна енергія.

Для визначення величин  $\varepsilon$  і  $k$  використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса, що мають вигляд [115]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.74)$$

$$\text{де } G = D_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V + \frac{\rho k}{\mu_t}) \delta_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}.$$

Явище турбулентності моделюється за допомогою моделі Смагоринського «Масштабне моделювання вихрів» (LES). Базове чисельне моделювання (DNS) можна виконувати, якщо закладена в основі розрахункова сітка має достатню точність.

Щодо забезпечення визначення променистого теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем та фрагментами, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу. Дана модель ґрунтується на припущенні, що оптичне

середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням [116]:

$$\nabla \left( \frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (2.75)$$

де  $E_r$  – щільність енергії випромінювання;  $E_b$  – рівноважна щільність енергії випромінювання  $\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}$ ;  $\alpha$  – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання  $\alpha = \alpha_m + \alpha_p$ ;  $\beta$  – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання  $\beta = \beta_m + \beta_p$ ;  $\alpha_m$ ,  $\alpha_p$  – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;  $\beta_m$ ,  $\beta_p$  – коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;  $E_{b,m}$ ,  $E_{b,p}$  – рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток. Вказані вище величини визначають за формулами [116]:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (2.76)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (2.77)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.78)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j), \quad (2.79)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана – Больцмана;  $T_{pj}$  – температура  $j$  – тої частки;  $N_j$  – кількість часток у комірці;  $\varepsilon_p$  – ступінь чорноти часток.

Для врахування процесу тепломасопереносу під час пожежі застосовується метод частинок Лагранжа [117]. Згідно із цим методом положення частинки можна описати таким рівнянням [117]:

$$\frac{dx_p}{dt} = u \quad (2.80)$$

Положення частинок визначається за допомоги процедури чисельного інтегрування за схемою метода «предиктор-коректор». Вектор положення частинок визначається [117]:

$$x_p^{(n+1)e} = x_p^n + \delta t \bar{u}^n, \quad (2.81)$$

$$x_p^{n+1} = 0,5(x_p^n + x_p^{(n+1)e} + \delta t \bar{u}^{(n+1)e}). \quad (2.82)$$

Передача теплової енергії шляхом випромінювання визначаються за формулою [118]:

$$x_f = \frac{1}{\delta \Omega^l} \int_0^{\mu^l} \int_0^{\mu^l} \int_{\mu_{d,0}}^{\mu_{d,\pi}} \frac{P_0(\theta_d)}{(1-\mu^2)(1-\mu'^2) - (\mu_d - \mu\mu')^2} d\mu_d d\mu d\mu', \quad (2.83)$$

де  $\mu_d$  – косинус кута розсіювання  $\theta_d$ .

$P_0(\theta_d)$  - фазова функція розсіювання одної краплини [118]:

$$\mu' = \cos(\theta^l) = 1 - \frac{2}{N_\Omega} \quad (2.84)$$

де  $S_1(\theta_d)$  та  $S_2(\theta_d)$  амплітуди розсіювання відповідно до теорії Мі.

Границя інтегрування  $\mu^l$  визначається за формулою [118]:

$$\mu' = \cos(\theta^l) = 1 - \frac{2}{N_\Omega} \quad (2.85)$$

Границі внутрішнього інтеграла визначаються за формулами [118]:

$$\mu_{d,0} = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu'^2}; \mu_{d,\pi} = \mu\mu' - \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu'^2}. \quad (2.86)$$

На першому етапі розраховується температура частинок, а після чого визначається їх поточна маса. Визначені дані додаються до кожної комірки робочої сітки і температура комірок змінюється.

Втрати маси та теплообмін у частинках визначається за рівняннями [119]:

$$\frac{dm_l}{dt} = -Ah_m\rho(Y_l - Y_g); \quad (2.87)$$

$$m_l c_l \frac{dT_l}{dt} = Ah(T_g - T_l) + Ah(T_s - T_l) + q_r + \frac{dm_l}{dt} h_v. \quad (2.88)$$

Кінцеве рівняння залежності в апроксимованому вигляді за методом кінцевих різниць записується у вигляді [119]:

$$\frac{T_l^{n+1} - T_l^n}{\delta t} = \frac{1}{m_l c_l} \left[ Ah \left( T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) - Ah_m \rho \left( \frac{Y_l^{n+1} + Y_l^n}{2} - Y_g \right) h_v \right]. \quad (2.89)$$

Рівноважна масова фракція  $Y_l$  є функція температури і визначається за виразом [119]:

$$Y_l = \frac{X_l}{X_l \left( 1 - \frac{w_a}{w_l} \right) + w_a / w_l}, \quad X_l = \exp \left( \frac{h_v w_l}{R} \left[ \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l} \right] \right) \quad (2.90)$$

Для апроксимації останніх рівнянь використовується вираз [119]:

$$Y_l^{n+1} \approx Y_l^n + \left( \frac{dY_l}{dT_l} \right)^n (T_l^{n+1} - T_l^n) \quad (2.91)$$

Похідна  $\frac{dY_l}{dT_l}$  визначається такими послідовними обчисленнями [119]:

$$\frac{dY_l}{dT_l} = \frac{dY_l}{dX_l} \frac{dX_l}{dT_l} = \frac{w_a/w_l}{(X_l(1-\frac{w_a}{w})+w_a/w)^2} \frac{h_v w_l}{RT_l^2} \exp\left(\frac{h_v w_l}{R} \left[\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l}\right]\right) \quad (2.92)$$

Кількість тепла складає [119]:

$$\delta q = \delta t A h \left( T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) \quad (2.93)$$

Для розв'язання рівняння теплопровідності його апроксимують при цьому застосовують обчислювальний алгоритм за методом кінцевих елементів застосовується вираз, що має такий вигляд [120]:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (2.94)$$

де  $[C_e] = \rho \cdot C_p \int_v \{N\} du$  – матриця теплоємності матеріалів кінцевих елементів

$[K_e] = \int_v [B]^T [D] [B] du$  – матриця теплопровідності матеріалів кінцевих елементів;

$[B] = \{L\} \{N\} \theta$  – матриця розподілення температур в області, що обмежена гранями матеріалів кінцевих елементів;

$\theta = \{N\}^T \{\theta_e\}$  – температура усередині області, що обмежена гранями матеріалів кінцевих елементів;

$\{T_e\}$  – вектор вузлових температур матеріалів кінцевих елементів;

$[D] = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{bmatrix}$  – матриця теплопровідності матеріалу у різних

напрямах;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$  – вектор диференціального оператора;

$\{Q_e\} = qW \int_s \{N\} dS$  – матриця граничних теплових потоків матеріалів кінцевих елементів;

$\{N\}$  - вектор форми кінцевих елементів, який визначає інтерполяційні функціонали в області, що обмежена гранями матеріалів кінцевих елементів.

Для нестационарної задачі теплопровідності можна записати систему нелінійних рівнянь у матричній формі для отримання рішення рівняння (2.94) [121]:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \quad (2.95)$$

де  $[K]$  – еквівалентна матриця теплопровідності, що залежить від об'ємної теплоємності і коефіцієнта теплопровідності матеріалу.

В узагальненому вигляді вираз (2.95) можна записати [121]:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_e\}, \quad (2.96)$$

де  $\{P(\theta)\}$  – вектор внутрішніх вузлових теплових потоків, що визначається через густину теплових потоків елементів.

Наведена система має нелінійні рівняння та обчислюється за допомогою ітераційного методу Ньютона - Рафсона [122]. Під час використання цього методу мінімізується неузгодженість [122]:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \rightarrow \min. \quad (2.97)$$

Метод Ньютона - Рафсона використовує у своїй основі скорочених рядів Тейлора для визначення остаточного вектора неузгодженості. Для умов застосування такого підходу система рівнянь (2.94) стає лінійною та записується у вигляді [122]:

$$[K_T^{(i-1)}] \{\Delta\theta_e^{(i)}\} = \{Q^{(i)}\} - \{P^{(i)}\}. \quad (2.98)$$



Під час реалізації даного алгоритму послідовно виконуються ітерації ( $i=1, 2, 3, \dots$ ), після виконання яких відбувається визначення нових значень температур на кожній ітерації з виразу [122]:

$$\{\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i-1)}\} + \{\Delta\theta^{(i)}\}. \quad (2.99)$$

Послідовне виконання ітерацій продовжується до виконання умови настання заданої точності отриманих результатів.

Коефіцієнти дотичної матриці  $[K_T]$  у рівнянні (2.54) визначаються, як [122]:

$$[K_T^{(i-1)}] \equiv \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}} \right)_{i-1}. \quad (2.100)$$

Після розкладання вектору  $\{\Phi\}$  у скорочений ряд Тейлора вираз для його визначення має вигляд [123]:

$$\{\Phi^{(i)}\} \cong \{\Phi^{(i-1)}\} + [K_T^{(i-1)}] \{\Delta\theta^{(i)}\}, \quad (2.101)$$

де  $\{\Delta\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i)}\} - \{\theta^{(i-1)}\}$  – вектор приросту температури, необхідний для проведення наступної ітерації.

Рівняння (2.55) має складові, що визначаються як:

$\{Q^{(i)}\}$  – вектор вузлових теплових потоків, що визначається під час обчислення вектора зовнішнього заданого теплового потоку  $\{Q_{0n}\}$  та еквівалентної матриці теплопровідності  $[K]$ ;

$\{\bar{P}\}$  – еквівалентний вектор вузлових внутрішніх теплових потоків, що визначається під час обчислення еквівалентної матриці теплопровідності на поточній ітерації з використанням чисельного інтегрування за часом вектору  $\{\Delta\theta^{(i)}\}$  методом Ейлера з використанням формули [124, 125]:

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\dot{\theta}_n\} + \Delta t_n \zeta \{\dot{\theta}_{n+1}\}, \quad (2.102)$$

де  $\Delta t_n$  – крок інтегрування за часом;  $\zeta$  - параметр Ейлера, який дорівнює 0,5. У даному випадку застосовується неявна обчислювальна схема Кранка - Ніколсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності  $[K]$  визначається з рівняння [123]:

$$[K] = \frac{1}{\zeta \Delta t_n} [C_e] + [K_e]. \quad (2.103)$$

Для визначення матриці  $\{Q(\theta)\}$  на поточному кроці інтегрування за часом використовується вираз [123]:

$$\{Q_n(\theta)\} = \{Q_e\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_e] \{[\dot{\theta}]_n\} - [K_e] \{Q_n\}. \quad (2.104)$$

Під час аналізу задачі теплопереносу [126] за рахунок випромінювання для інтегрування рівняння (2.92) був застосований метод ефективного теплового потоку випромінювання. Для цього застосований узагальнений закон Стефана-Больцмана [126]:

$$\sum_{j=1}^N [\delta_{ij} - (1-\varepsilon_i)\varphi_{ij}] \cdot q_j^0 = \varepsilon_i \sigma \theta_i^4, \quad (2.105)$$

де  $q_j^0$  – ефективний тепловий потік від випромінювання поверхні  $j$ -того матеріалів кінцевих елементів.

На основі розв'язання задач ефективного теплового потоку випромінювання, визначається тепловий потік поверхні матеріалів кінцевих елементів, на який потрапляє задане випромінювання за формулою [126]:

$$q_i = q_j^0 - \sum_{j=1}^N \varphi_{ij} q_i^0. \quad (2.106)$$

Враховуючи усі перелічені сукупності поверхонь матеріалів кінцевих елементів, які обмінюються випромінюванням, складається система нелінійних рівнянь у матричній формі, що має наступний вигляд [126]:

$$[G]\{q^0\} = \{S\}. \quad (2.107)$$

Компоненти матриці  $[G]$  визначаються за формулою [126]:

$$G_{ij} = \delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i)\rho_{ij}. \quad (2.108)$$

А компоненти матриці  $\{S\}$  обчислюються за формулою [126]:

$$S_{ij} = \varepsilon_i \sigma \theta^4. \quad (2.109)$$

Система рівнянь (2.94) вирішується для кожної площі різних площин поверхні фасаду, які беруть участь у теплообміні випромінюванням за методом ітерацій відповідно до схеми, яка описується рівнянням [120]:

$$q_i^n = \psi q_i^{k+1} + (1 - \psi) q_i^k, \quad (2.110)$$

де  $\psi$  - релаксаційний коефіцієнт ефективного променистого теплового потоку;  $k$  – номер ітерації.

Приведені залежності очевидним чином трансформується для дво- та одновимірного випадків (температури плоскої області на площині XYZ та стрижнів). Це ж саме рівняння описує процес дифузії в однорідному середовищі: в цьому випадку  $u(t, x, y, z)$  є концентрацією,  $a^2$  є коефіцієнтом дифузії середовища.

## 2.4 Критерії поширення полум'я по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель

Визначення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі залежить від прийнятих критеріїв, що в свою чергу впливають на оцінку можливості поширення полум'я по фасадам. Окремим питанням застосування критеріїв оцінювання поширення полум'я по фасадам є умови застосування фасадних протипожежних перешкод для фасадних систем, що є актуальним питанням дослідження пожежної безпеки будівель та споруд різного функціонального призначення.

Аналіз найбільш поширених методів оцінювання пожежної безпеки фасадних систем представлених у розділі 1 та дослідження [127] показали, що єдиними об'єднуючими критеріями забезпечення обмеження поширення пожежі між поверхами будівель є не перевищення максимального значення теплового потоку в межах 60-80 кВт/м<sup>2</sup> в центрі вікна на поверсі, який розташований над поверхом пожежі або температурний режим в межах 250-450 °С.

Що стосується інших якісних або кількісних показників серед існуючих методів оцінювання забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам на сьогодні в світі не існує єдиних підходів щодо критеріїв, які визначають мінімально необхідні умови, які можуть гарантувати обмеження поширення пожежі на верхні поверхи [128].

Разом із тим, приведений в розділі 1 аналіз існуючих методів визначення ефективності обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі дозволяє узагальнити основні вихідні чинники, які безпосередньо впливають на визначення критичних значень для критеріїв оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадам.

- локація початкового осередку пожежі (в середині будівлі чи зовні фасаду);

- температурний режим, який забезпечує вогнище пожежі;
- тривалість проведення випробувань;
- конструктивне виконання фрагменту фасадної системи, яка проходить оцінювання в частині фізичних властивостей будівельних матеріалів;
- конструктивне виконання фрагменту фасадної системи, яка проходить оцінювання в частині геометричних параметрів фасаду, кутів прилягання, кутів ухилу, розмірів міжповерхових віконних простінків;
- параметри фасадних протипожежних перешкод (активних, пасивних) в разі їх застосування.
- температура руйнування конструкцій заповнення світлових прорізів (вікна, модульні або самонесучі склопрозорі системи);

На основі приведених вихідних чинників та аналізу існуючих методів приведених в розділі 1 визначимо критерії, а саме критичні значення параметрів, які впливають на проведення оцінювання обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

Під час застосування методів комп'ютерної математики шляхом відтворення стандартизованих стендів для дослідження та оцінювання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям (FDS моделювання) або створення випробувального стенду слід розуміти що початковий осередок пожежі може бути як в середині приміщення так і ззовні.

В методиках [28-31;35;67;75;77;82] модельне вогнище пожежі розташовується в середині вогневої камери, що імітує приміщення будівлі. В методиці [129] модельне вогнище пожежі знаходяться ззовні досліджуваного фрагменту фасадної системи або як в методиці [28] одночасно ззовні та в середині на рівні поверху пожежі. В роботі [3] наведено обґрунтування ризиків виникнення фасадних пожеж, зокрема через займання зовнішніх кондиціонерних блоків.

Разом із тим, як правило, пожежне навантаження, яке визначається як кількість теплоти, що може виділитися у разі повного згоряння всіх

матеріалів, що знаходяться в приміщенні (об'ємі), включаючи поверхні стін, перегородок, підлоги та стель [130] для зовнішніх установок розташованих на фасаді будівлі значно менше ніж для пожежного навантаження, яке знаходиться в середині приміщенні.

Також має місце припущення, що пожежне навантаження, яке знаходиться ззовні фасаду будівлі не зможе в разі проведення випробувань забезпечити температурний режим пожежі та тривалість його впливу на тому самому рівні, як пожежне навантаження, яке розміщено в середині об'єму приміщення, роль якого виконує вогнева камера та модельне вогнище пожежі.

Слід враховувати випадки, коли будівля має внутрішній двір утворюючи суцільний замкнутий простір (атріум), в якому в разі виникнення фасадної пожежі тепловий потік та випромінювання може впливати на суміжні площини сторін внутрішніх фасадів. Або випадки коли пожежа відбувається на покрівлі будинку, яка прилягає до суміжно розташованої висотної частини іншого будинку.

Таким чином, доцільно прийняти, як основну локацію розташування пожежного навантаження та відповідно модельного вогнища пожежі саме в середині будівлі (приміщення), при цьому допускається додатково передбачати осередок пожежі на фасаді будівлі під час відтворення реальної пожежної небезпеки фасаду.

Температурний режим, який забезпечує вогнище пожежі є важливим параметром який впливає на якісні показники проведення оцінювання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям. Існуючі методи оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадам будівель передбачають застосування різних типів модельних вогнищ пожежі для відтворення необхідного температурного режиму у вогневих камерах випробувальних стендів. Тип модельного вогнища пожежі (за видом палива) та площі його горіння безпосередньо впливає на температурний режим, як у середовищі горіння так і у середовищі опромінювання. Попередній аналіз

існуючих методик оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадах будівель наведений в розділі 1 показав, що на сьогоднішній день в країнах Європи, Азії, США широко застосовуються модельні вогнища пожежі класів А (горіння твердих речовин, а саме дерева), класів В (горіння рідких речовин, а саме гептану, дизелю тощо) та класу С (горіння газоподібних речовин).

Як правило, для методик [29;31;35] під час проведення натурних вогневих досліджень вільне горіння модельного вогнища має тривати протягом 30 хвилин та забезпечувати стабільну температуру у вогневій камері не менше 600 °С у продовж 20 хвилин із загальних 30 хвилин випробувань. На рис.2.12 наведено приклади вогневих досліджень з оцінки пожежної безпеки фасадних систем при використанні модельних вогнищ пожежі класів А, В та С.

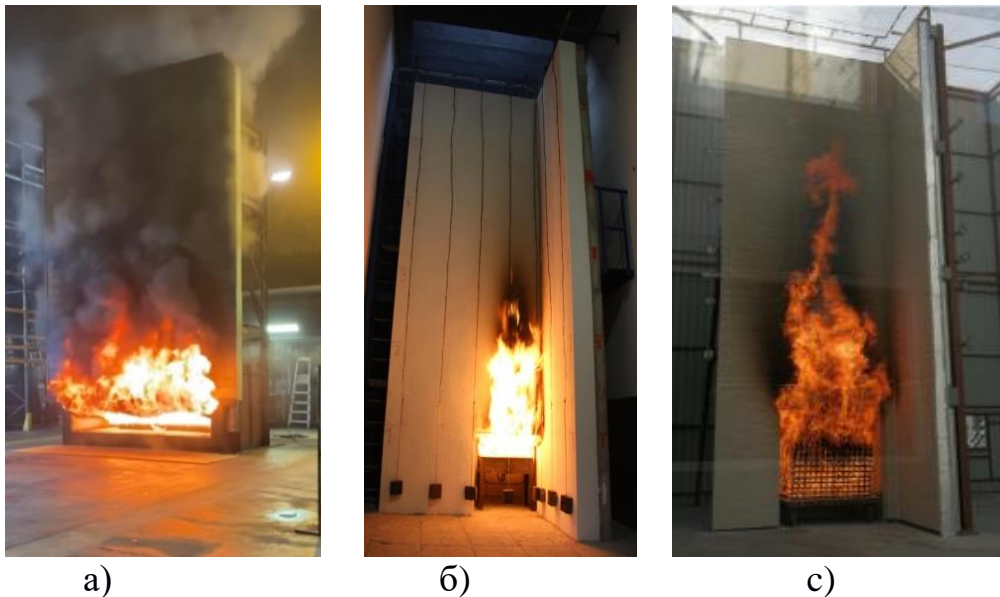


Рисунок 2.12 – Приклади застосування різних типів модельних вогнищ пожежі під час дослідження пожежної небезпеки фасадних систем де: а - метод SP Fire 105 (клас вогнища пожежі В); б - метод DIN 4102-20 (клас вогнища пожежі С) с- BS 8414-2 (клас вогнища пожежі А)

Слід розуміти, що застосування модельного вогнища пожежі класу А, яке виконане із соснових брусків не забезпечує стабільний температурний режим, що пов'язано із відсутністю сталого режиму полуменевого горіння та

неоднорідності його температурних параметрів та динаміки для різних порід дерев та їх віку.

Дослідження [131;132] та порівняльний аналіз температурних режимів модельних вогнищ пожежі класів А та В за стандартизованими методами [29;31;35] показав, що середня температура модельного вогнища пожежі класу А та В на рівні верхнього краю вогневої камери становила 421 °С та 744 °С відповідно. При цьому, максимальне значення температури на рівні верхнього краю вогневої камери для модельного вогнища пожежі класу А становили 1130 °С, але у продовж не більше як 4 хвилин із 20 хвилин випробувань. Для модельного вогнища пожежі класу В такі значення становили теж у межах 1100-1150 °С, проте у продовж не менш як 12 хв. В табл. 2.4 наведено порівняльні дані температурних режимів для [29;31;35] для різних класів модельних вогнищ пожежі.

Таблиця 2.4 - Порівняльні дані температурних режимів у вогневих камерах за досліджуваними методами

Метод випробувань	Середнє значення температурного режиму у вогневій камері для модельного вогнища пожежі класу		Максимальне значення температурного режиму у вогневій камері	
	Клас А	Клас В	Клас А	Клас В
SP Fire	421	660	475	740
BS 8414 – 1	624	806	730	1100
DIN 4102-20	658	779	750	1130

Міжнародна методика [31] та аналіз експериментальних даних приведених в таблиці 1 та дослідження [131] демонструють, що використання модельного вогнища пожежі класу В, а саме, 60 літрів гептану або дизельного палива в квадратному чи круглому деці діаметром 90-100 см є найбільш доцільнішим видом палива для модельного вогнища пожежі. Даний висновок обумовлено забезпеченням стабільного режиму горіння та



відповідно забезпеченням необхідного температурного режиму впливу (не менше ніж  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  у продовж 20 хвилин) на досліджуваний фрагмент фасаду. Окрім цього, аналіз температурного режиму у вогневій камері за методикою [31] при використанні 60 літрів гептану чи дизельного палива та графіку стандартного температурного режиму за [23] демонструє, що при застосуванні даного типу модельного вогнища пожежі створюються набагато жорсткіші умови температурного режиму для проведення випробувань. Тобто, якщо максимальне значення температури за стандартним температурним режимом ц вогневій камері згідно з [23] не перевищує  $842\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то при застосуванні модельного вогнища пожежі класу В згідно даних табл.2.2 цього розділу може складати  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2.13 наведено графіки термопар із температурними кривими під час проведення випробувань за методикою [31] при використанні модельного вогнища пожежі класу В та графік стандартного температурного режиму пожежі за [23].

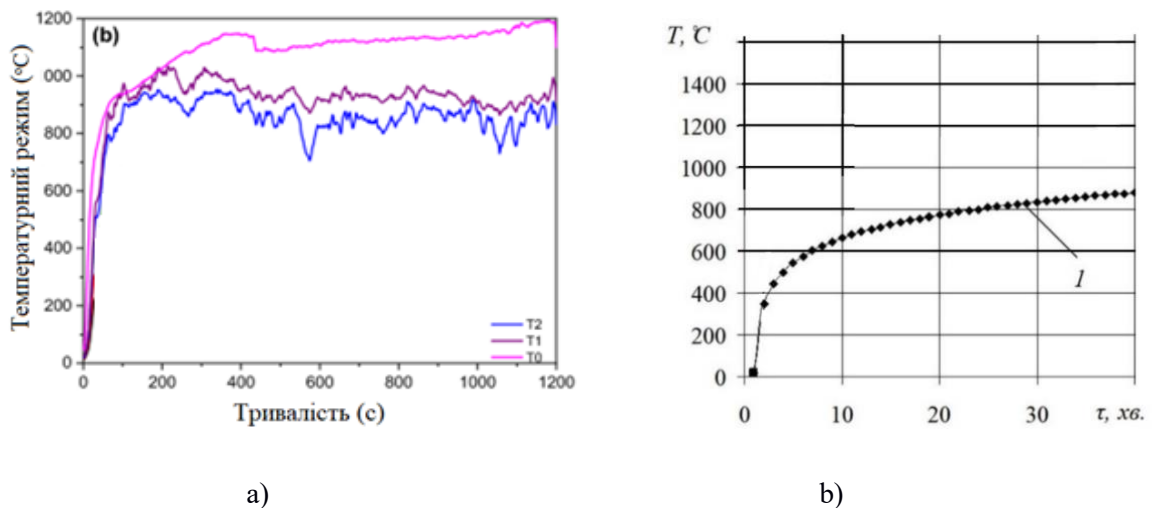


Рисунок 2.13 - Графіки температурних режимів: а - графіки термопар із температурними кривими під час проведення випробувань за методикою [31] при використанні модельного вогнища пожежі класу В; б – графік стандартного температурного режиму згідно з [23].

Що стосується температурного режиму зовнішньої пожежі, то згідно з дослідженнями [133] та норм [44] його умови є значно помірнішими у порівнянні навіть із температурними умовами стандартного температурного режиму, а тому їх застосування під час проведення оцінювання можливості поширення пожежі по фасаду будівель є недоцільним. На рис. 2.14 наведено графік температурного режиму зовнішньої пожежі, то згідно [44].

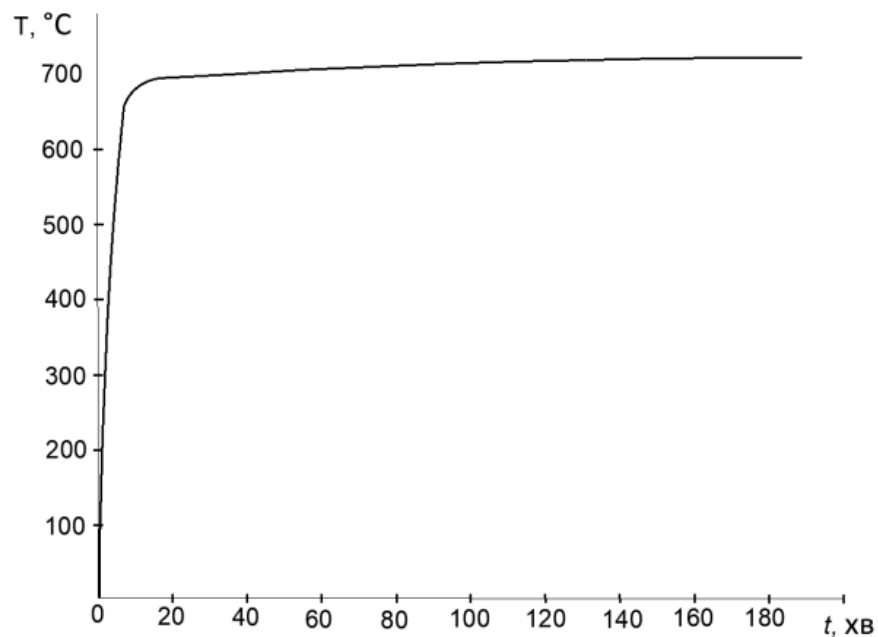


Рисунок 2.14 - Графік температурного режиму зовнішньої пожежі

Враховуючи вищенаведені дані, під час проведення оцінювання обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям доцільно прийняти в якості джерела відтворення температурного режиму пожежі модельне вогнище пожежі класу В, яке забезпечить температурний режим не меншині ніж стандартний згідно з [44]. Площа горіння становитиме не менше  $1 \text{ м}^2$ , що забезпечить умови при яких площа горіння становитиме не менше 70% від площі вогневої камери. Для забезпечення таких параметрів доцільно використовувати деко модельного вогнища пожежі 34В.

Тривалість проведення випробувань є визначальним параметром, що впливає на процес оцінювання поширення пожежі по зовнішнім

огороджувальним конструкціям, а також при дослідженні ефективності застосування фасадних протипожежних перешкод. На сьогоднішній день вимоги чинних нормативних документів у галузі будівництва не містять вимог щодо максимальної чи мінімальної тривалості у продовж якої має бути забезпечено обмеження поширення пожежі.

Як приклад, під час нормування вогнестійкості тої чи іншої будівельної конструкції визначальним критерієм є граничне значення межі, тобто тривалості у продовж якої конструкція має зберегти свою несучу, цілісну ізолювальну здатність.

У вітчизняних нормах [14,26] визначено вимоги тільки для протипожежних карнизів з мінімальним класом вогнестійкості EI 90. Тобто, ця вимога стосується цілісності та ізолювальної здатності самої конструкції карнизу, але не містить вимог до критеріїв, які цей карниз має забезпечити в разі пожежі і протягом якої тривалості.

Серед можливих варіантів критеріїв, які можливо визначити в частині забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадам будівель можливо прийняти критерій, що конструкція фасадних систем повинна забезпечувати обмеження поширення пожежі на суміжні поверхи (як верхні так і нижні) та суміжні приміщення по фасаду будинку у продовж часу, який відповідає значенню, що не менше за межу вогнестійкості зовнішньої огороджувальної конструкції.

Тобто, як приклад, для будинків I ступеню вогнестійкості згідно [13] враховуючи мінімальний клас вогнестійкості конструкції зовнішніх ненесучих стін E30, тривалість гарантованого обмеження поширення пожежі по фасаду на верхній поверх повинна складати не менше 30 хвилин. Таким чином відповідно обґрунтовується мінімальна необхідна тривалість проведення випробувань під час оцінювання ефективності обмеження поширення пожежі для зовнішніх огороджувальних конструкцій.

Враховуючи аналіз існуючих методик наведених в розділі 1 в частині тривалості проведення випробувань під час оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель є за доцільне використовувати значення критерію тривалості досліджень не менше 30 хвилин, що відповідно відповідатиме найбільшому значенню межі вогнестійкості для конструкції зовнішніх ненесучих стін.

Під час реалізації проведення оцінювання поширення пожежі по фасадам будівель важливим аспектом є забезпечення повноцінного конструктивне відтворення фрагменту фасадної системи. До таких конструктивних параметрів слід відносити такі елементи як міжповерхові віконні простінки, кути прилягання суміжно розташованих фасадів, кути ухилу фасаду будівлі по вертикалі.

Під час дослідження ефективності заходів щодо обмеження поширення пожежі по фасадам слід повноцінно відтворювати фрагменти фасадних протипожежних перешкод (активних, пасивних), які планується застосовувати. В разі застосування активних фасадних протипожежних перешкод у функціонуванні яких передбачено використання водяних зрошувачів, їх витратна характеристика повинна та алгоритм спрацювання повинен цілком відповідати реальним умовам експлуатації.

Однією із основних причин поширення пожежі не тільки по вертикальним зовнішнім огорожувальним конструкціям але і в середину приміщення є руйнування конструкцій заповнення світлових прорізів, а саме вікон. На сьогоднішній день, як правило, світлові прорізи заповнюються металопластиковими вікнами, що є ефективною енергозберігаючою конструкцією, яка є легкою в монтуванні та простою під час експлуатації. Разом із тим, аналіз конструкції та типів матеріалів металопластикових вікон [134,135] показав, що до складу вікон входять наступні горючі матеріали, які створюють передумови для поширення пожежі в середину приміщень через їх руйнування: пластмаса (полівінілхлорид), гума, алюміній, дерево,

склопластик, герметик, а також комбіновані матеріали, які включають перелічені.

Слід відмітити, що найнижча температура самозаймання у герметика, який є полімерною композицією, яка спучується при температурі від 150 °С та займається при температурі 210-230 °С. Також пожежонебезпечним є пластиковий ущільнювач-замок склопакетів, який не має металевого каркасу та легко деформується під впливом температури починаючи від 250°С [136].

В роботі [137] досліджувалося питання критичної температури руйнування найбільш застосованих типів склопакетів із різною товщиною скла. За результатом даних досліджень було визначено наступні дані щодо критичних температур руйнування.

Таблиця 2.5 - Зведені дані щодо руйнувань вікон в результаті зовнішнього впливу від температури

Товщина скла, (мм)	Температура, (Т°С)	Час руйнування, (t хв)
3	350-360	6-7
4	400-450	7-8
6	470-590	7-8
10	570-600	12-14

В роботі [138] проведено ряд натурних досліджень присвячених руйнуванню скло прозорих фасадних систем в результаті пожежі. На рис. 2.15 наведено фото фрагменту випробувань.

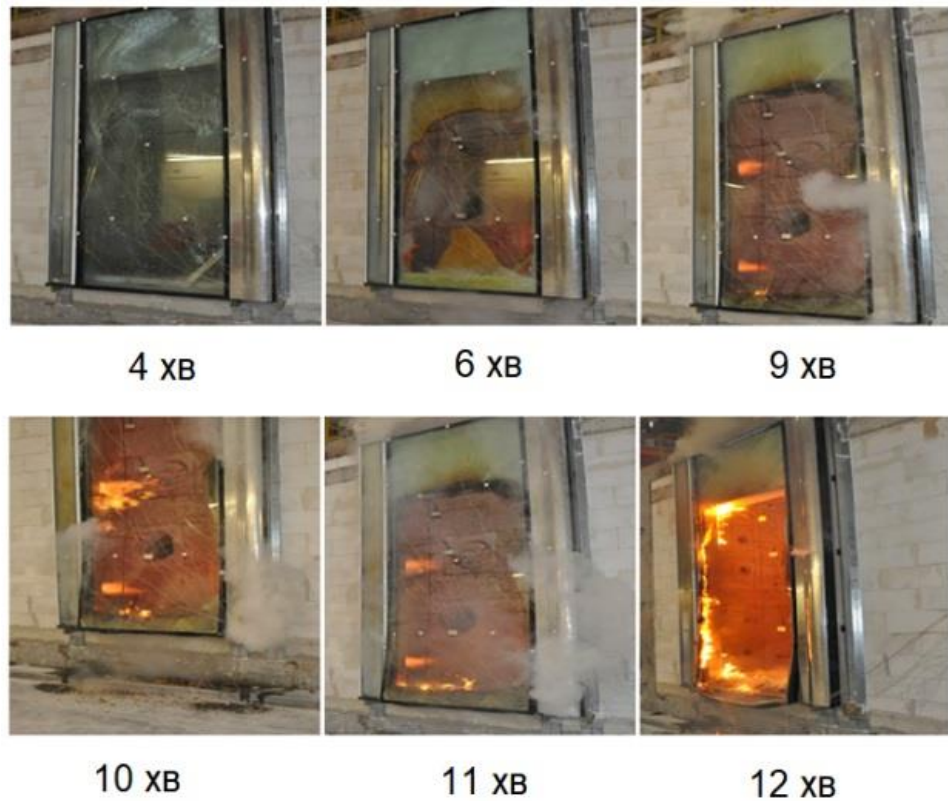


Рисунок 2.15 – Фото фрагментів випробувань щодо стійкості в умовах пожежі склопрозорої фасадної системи

За результатом серії випробувань відзначено, що в середньому руйнування таких склопрозорих систем із використанням алюмінієвих елементів кріплення відбувалося у продовж 11-12 хвилин, при цьому критична деформація конструкції відбувалася вже при температурах 240-260 °С.

Таким чином, можна зробити висновок, що незалежно від типу фасадної системи основним критерієм поширення пожежі на вище розташований поверх (зокрема в середину його приміщення) є температура руйнування конструкції світлопрозорого елемента (вікна).

Аналіз проведених досліджень показав, враховуючи вищенаведені дані, доцільно прийняття наступних температурних критеріїв оцінки забезпечення обмеження поширення пожежі для фрагменту досліджуваної фасадної системи виконаної з негорючих матеріалів (в тому числі облицювання):

- для будівель в конструкції зовнішніх огорожувальних конструкцій яких є міжповерхові віконні простінки на кожному поверсі виконані із штучних кам'яних чи кlinkерних негорючих матеріалів (або їх аналогів з температурою початку деформації не нижче 1000 °С) руйнування світлопрозорого елемента відбувається при температурному впливі не нижче 350 °С протягом 6-7 хвилин;

- для суцільних або комбінованих світлопрозорих фасадних систем руйнування конструкції світлопрозорого елемента відбувається при температурному впливі не нижче 250 °С протягом 12 хвилин;

- для інших типів фасадних систем в якості критерію поширення пожежі слід приймати найнижчу температуру деформації одного із її елементів, яка впливає на даний елемент протягом 5 хвилин. У випадку використання протипожежних вогнестійких фасадних елементів за критерій допускається приймати значення межі його вогнестійкості за стандартним температурним режимом.

Окремо слід відзначити, що проведення будь якого оцінювання щодо обмеження поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям передбачає застосування виключно негорючих будівельних матеріалів, як в конструкції фасаду так і його облицювання. Оцінювання поширення пожежі по фасадам та оцінювання характеристик виробів "реакція на вогонь" для виробів фасадів/зовнішніх стін (у тому числі шари ізоляції тощо) слід проводити згідно із чинними національними та міжнародними стандартами та іншими НД.

## **2.5 Висновки до розділу 2**

За результатом проведених досліджень щодо можливості оцінювання заходів з обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям за допомогою обчислювальних методів комп'ютерної математики визначено основні механізми та математичні алгоритми, які застосовуються при моделюванні процесів поширення пожежі, при цьому:

1. Обґрунтовано параметри та умови, які мають найбільший вплив під час проведення оцінювання можливості поширення пожежі або її обмеження за допомогою інтегрованих у фасадні системи протипожежних перешкод.

2. Узагальнено та систематизовано математичні описи початкових граничних умов, пожежного навантаження модельного вогнища пожежі та реакції його горіння, кількості теплоти, що виділяє або сприймає одиниця поверхні в одиницю часу, а також математичні описи просторово-часового розподілу температури і швидкостей газового середовища.

3. Обґрунтовано розрахункові сценарії утворення початкового осередку пожежі, а саме:

- в середині приміщення будівлі з подальшим поширенням на фасад;
- ззовні у фасадній частині будівлі,
- пожежа відбувається в середині або у фасадній частині будинку з внутрішнім замкнутим двором (атріумом) з подальшим поширенням пожежі на протилежно розташований фасад;
- пожежа відбувається на покрівлі будівлі, яка суміжно розташована з іншою висотною частиною будівлі;
- фасадна пожежа поширюється із зовнішніх вертикальних огорожувальних конструкцій на покрівлю будівлі.

4. Визначено в якості основного критерію поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям на вище розташовані поверхи прийняти температуру руйнування світлопрозорих конструкцій чи вікон, а саме:

- для будівель в конструкції зовнішніх огорожувальних конструкцій яких є віконні міжповерхові простінки на кожному поверсі виконані із штучних кам'яних чи клінкерних негорючих матеріалів (або їх аналогів з температурою початку деформації не нижче 1000 °С) руйнування



світлопрозорого елемента відбувається при температурному впливі не нижче 350 °С протягом 6-7 хвилин;

- для суцільних або комбінованих світлопрозорих фасадних систем руйнування конструкції світлопрозорого елемента відбувається при температурному впливі не нижче 250 °С протягом 12 хвилин;

- для інших типів фасадних систем в якості критерію поширення пожежі слід приймати найнижчу температуру деформації одного із її елементів, яка впливає на даний елемент протягом 5 хвилин. У випадку використання протипожежних вогнестійких фасадних елементів за критерій допускається приймати значення межі його вогнестійкості за стандартним температурним режимом.

5. Під час реалізації проведення оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадах будівель за допомогою інтегрованих фасадних протипожежних перешкод запропоновано використовувати значення критерію тривалості досліджень не менше 30 хвилин, що відповідатиме найбільшому значенню межі вогнестійкості для конструкції зовнішніх ненесучих стін будівель I ступеню вогнестійкості.

6. Визначено, що під час проведення натурних досліджень для забезпечення необхідного температурного режиму у вогневій камері слід застосовувати деко модельного вогнища пожежі класу 34В, що забезпечить площу горіння у вогневій камері не менше 70% площі вогневої камери.

7. Запропоновано критерій оцінки, який полягає в тому, що конструктивне виконання фасадних систем повинне забезпечувати обмеження поширення фасадної пожежі в середину суміжних поверхів (як верхні так і нижні) та суміжні приміщення на поверсі будинку у продовж тривалості, яка повинна бути не менше значення межі вогнестійкості зовнішньої огороджувальної конструкції.

8. В подальших дослідженнях під час проведення оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадах будівель пропонується

застосовувати ієрархічну структуру розрахункових методів, що включає в себе, табличні, спрощені та уточнені методи, що забезпечить реалізацію параметричних підходів у розрахункових процедурах.

### **РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГАЗО- ГІДРОДИНАМІКИ**

#### **3.1 Моделювання процесів поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям при її зовнішньому осередку утворення**

Для обґрунтованості запропонованих обчислювальних гідродинамічних моделей тепломасопереносу, яку чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків під час горіння слід провести їх верифікацію. На основі систематизованих основних чинників, які безпосередньо впливають на проведення оцінювання обмеження поширення пожежі по фасадам або дослідження ефективності застосування інтегрованих фасадних протипожежних перешкод (активних чи пасивних) реалізовано вирішення польової математичної моделі тепломасопереносу за допомогою FDS моделювання [139].

На основі прийнятих сценаріїв утворення початкового осередку пожежі проведено дослідження її потенційного впливу на процеси поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям будівлі.

Під час проведення моделювання процесів поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям розрахункове значення пожежного навантаження в середині приміщення та швидкість поширення пожежі визначено за національною класифікацією згідно з [44].

На першому етапі перевірки розрахункових методів на здатність відтворювати реальні процеси поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям прийнято сценарій виникнення пожежі на зовнішній поверхні фасадної системи. Визначені гідродинамічні моделі тепломасопереносу за допомогою FDS моделювання проведемо для пожеж,

які виникають в середині об'єму приміщення та мають різні сценарії поширення по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

### **3.1.1 Загальний опис сценарію аварійної ситуації та розрахункові параметри**

Серед небезпечних чинників, які можуть впливати на поширення пожежі фасадними системами, є порушення норм влаштування зовнішніх інженерних установок, зокрема кондиціонерних блоків.

Зовнішній кондиціонерний блок є пожежонебезпечним виробом, оскільки до складу його конструкції входять компоненти, які у своїй сукупності складають суттєве пожежне навантаження. Відсутність нормативних вимог щодо встановлення кондиціонерних блоків створює передумови для непослідовного накопичення пожежонебезпечних горючих компонентів на фасадних системах, які в разі пожежі створюватимуть додаткові ризики швидкого поширення пожежі [140]. На рис. 3.1 наведено приклад неправильного влаштування зовнішніх кондиціонерних блоків на фасаді будівлі а також наслідки пожежі зовнішнього кондиціонерного блоку.



Рисунок 3.1 – Фото розміщення зовнішніх кондиціонерних блоків та наслідки пожежі

Загальні вимоги з пожежної безпеки до конструкцій зовнішніх кондиціонерних блоків під час їх експлуатації визначено в [22]. Норми визначають, що зовнішній простір та стіни будинків навколо кондиціонерів мають бути розчищені від гілок дерев, витких рослин та інших предметів і конструкцій із горючих матеріалів у радіусі не менше ніж 1,5 метра.

Об'єктом досліджень є процеси критичного нагрівання поверхні фасадів будівель в результаті зовнішньої пожежі, а також подальше прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що виявлені закономірності розвитку фасадної пожежі будівлі в разі виникнення пожежі зовнішнього кондиціонерного блоку дозволять визначати безпечні параметри встановлення зовнішніх кондиціонерних блоків, запобігаючи тим самим розвитку можливої фасадної пожежі в разі їх загоряння.

Під час проведення моделювання враховано результати аналізу вимог нормативних актів у галузі будівництва до класу реакції на вогонь матеріалу зовнішнього облицювання, згідно з [141]. Під час визначення критеріїв впливу температурних режимів на фасаді враховано підходи наукових досліджень [142-144] з врахуванням вимог європейських нормативних документів.

Для моделювання та дослідження поширення висхідного теплового потоку під час пожежі кондиціонеру по фасаді будинку за допомогою FDS моделювання, створено фрагмент фасаду будинку. В основі матеріалу конструкції будинку було обрано клінкерну повнотілу цеглу, як найбільш поширеніший матеріал заповнення зовнішніх огорожувальних конструкцій, в тому числі для монолітно-каркасних будинків із залізобетону. Густина цегли  $1900 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $0,8 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $0,65 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Світлові прорізи (вікна) будинку заповнені склом, густиною  $2500 \text{ кг/м}^3$ , з питомою теплоємністю  $0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю

0,061 Вт/(м·К). Облицювальний матеріал фасаду в моделі фрагменту будівлі не враховується для отримання теплових розподілів по фасаді виключно від впливу зовнішнього чинника пожежі. Крок розрахункової сітки FDS моделі складає 25 см<sup>2</sup>, що обумовлено геометричними розмірами моделі фрагменту будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів зовнішнього блоку кондиціонеру.

Зовнішній блок кондиціонеру влаштовано у спеціальній корзині, яка кріпиться до фасаду будівлі та закрита ззовні декоративними алюмінієвими композитними панелями, які відповідно до [13] пожежної класифікації відносяться до будівельних матеріалів групи Г1 (низької горючості). На рис. 3.2 наведено приклад фасадної системи, обладнаної корзинами для зовнішніх блоків кондиціонерів. Даний тип фасадів із алюмінієвою композитною панеллю, що використовуються для декоративного зовнішнього схову блоку кондиціонеру, взято за основу під час створення FDS моделі.



Рисунок 3.2 - Приклад фасадної системи обладнаної корзинами для зовнішніх блоків кондиціонерів з декоративною алюмінієвою композитною панеллю

Клас горючості Г1 властивий речовинам та матеріалам, які не можуть горіти без джерела запалювання, але у відповідних умовах вони здатні виділяти гази, що утворюють дим. Низькогорючі матеріали групи Г1 мають температуру димових газів не більше 135 °С, ступінь пошкодження по довжині зразка не більше 65 %, ступінь пошкодження за масою зразка не більше 20 %.

Окремо слід відзначити, що наявність суцільної декоративної панелі навколо кондиціонерного блоку є найбільш небезпечним конструктивним виконанням, через стримання теплового впливу в горизонтальній площині та направлення його на верхній поверх. Під час створення моделі використано типовий вузол кріплення конструкції зовнішнього блоку кондиціонера, що наведено на рис.3.3

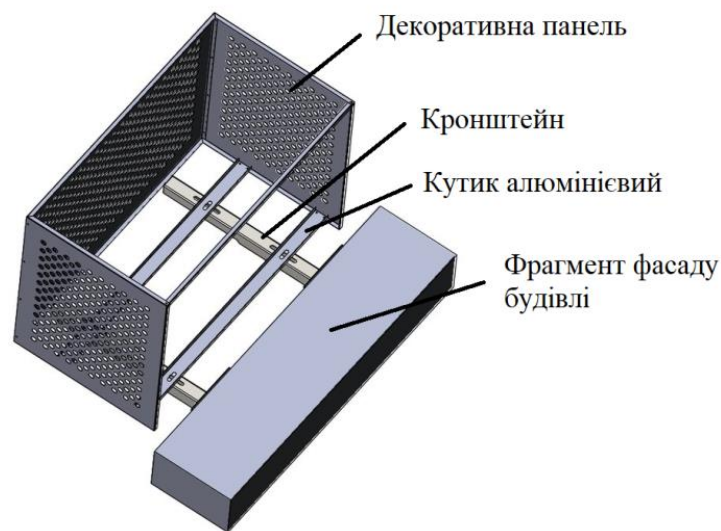


Рисунок 3.3 - Приклад конструктивного виконання зовнішньої корзини кондиціонеру із декоративною алюмінієвою композитною панеллю

Алюмінієві композитні панелі для фасадів представляють собою багатошаровий матеріал, який складається з двох листів алюмінію і поліетиленового наповнювача. Фізичні характеристики панелей було прийнято наступні:

– коефіцієнт теплового розширення 0,024 мм/м t° (°С)

- модуль пружності  $E$  70 000 Н/мм<sup>2</sup>;
- відносне подовження  $>5$  %;
- ударостійкість 50 кг/см;
- термостійкість від  $-50$  °С до  $+80$  °С;
- коефіцієнт теплопередачі 5,45 Вт/м<sup>2</sup>;
- гігроскопічність 0,01 % (матеріал не гігроскопічний).

Під час створення 3D моделі зовнішнього блоку кондиціонеру було вивчено перелік стандартних складових елементів, які входять до його конструкції та орієнтовно прийнято наступні вихідні фізичні дані:

- тип холодоагенту – R32;
- вага холодоагенту 1,15 кг;
- габарити, висота-ширина-глибина: 960×700×396 мм;
- загальна вага 43,5 кг, яка включає:
- метал – 32 кг;
- гума – 2,3 кг (пожежне навантаження 33,5 МДж/кг);
- полівінілхлорид – 6,2 кг (пожежне навантаження 33,5 МДж/кг);
- паперово-шаруватий пластик – 1,1 кг (18 МДж/кг);
- склопластик – 0,75 кг (5 МДж/кг);
- фреон типу R32a – R290 – 1,15 кг (65,6 МДж/кг).

Окрім цього, під час створення моделі важливою частиною відтворення пожежі є визначення реакції горіння, яка є невід'ємною складовою початкових причин пожежі. Дослідження [145;146] показали, що серед основних причин пожежі у зовнішніх блоках кондиціонерів слід відмітити витік фреону, що складає 42,6 %. Серед інших причин зафіксовано порушення правил експлуатації та обслуговування, що складає 43,4 % та механічне пошкодження дротової ізоляції, що складає близько 10 %.

За сценарій змодельованої пожежі прийнято займання зовнішнього кондиціонерного блоку в результаті витоку фреону, що спричинило реакцію горіння з максимальною температурою 1170 °С. Зовнішній блок кондиціонеру розташовано між двома вікнами на відстані 15 см від площини



фасаду. Зменшення інтенсивності горіння (затухання) відсутнє. Питоме тепловиділення склало  $230 \text{ кВт/м}^2$ . Лінійна швидкість поширення полум'я не розглядається як предмет дослідження, та приймається  $0,05 \text{ м/с}$  для візуального відтворення горіння на основі аналізу реальних випадків пожеж.

Для можливості візуального оцінювання теплових розподілів, зовнішня поверхня фасаду має можливість візуалізації зміни температури прогріву поверхні протягом всієї тривалості моделювання.

Для більш точного визначення значень розповсюдження висхідного теплового потоку під час пожежі уздовж корпусу зовнішнього блоку кондиціонеру від центру і в кожную сторону із кроком  $20 \text{ см}$  влаштовано теплові вимірювачі в газовому середовищі. Дані вимірювачі фіксуватимуть зміну значень температури конструкції алюмінієвої композитної панелі з часом.

Під час моделювання вітровий вплив не моделюється, як такий, що створює зменшення густини і однорідності теплового потоку та зменшує висоту факелу пожежі. Крім того, вітер, що має направлення в сторону будівлі, створюватиме підпір та зону підвищеного тиску, при якому холодне повітря через завихрення потраплятиме в зону прогріву фасаду і відповідно буде охолоджувати стіну будівлі.

### **3.1.2 Результати розрахунку для моделі із зовнішнім джерелом пожежі**

За результатом розроблення моделі відтворено фрагмент типового фасаду будівлі висотою в три поверхи. Окрім зовнішнього матеріалу облицювання, відтворено основні конструктивні елементи будівлі, а саме вікна, балконні двері та декоративні алюмінієві композитні панелі.

Під час введення вихідних параметрів для початку розрахунку прийнято, що пожежа розповсюджується до максимальної площі протягом всього часу моделювання, а саме  $720 \text{ секунд}$  ( $12 \text{ хв}$ ). При цьому вікна в усіх

приміщеннях зачинено, що відповідає вимогам правил експлуатації кондиціонерів. Розрахункова тривалість моделювання пожежі обґрунтована часом нормативного прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста згідно [147], що становить 10 хв та додаткового часу (2 хв) на розгортання сил та засобів.

На рис. 3.4 наведено візуалізацію створеної 3D FDS моделі фасаду будинку.

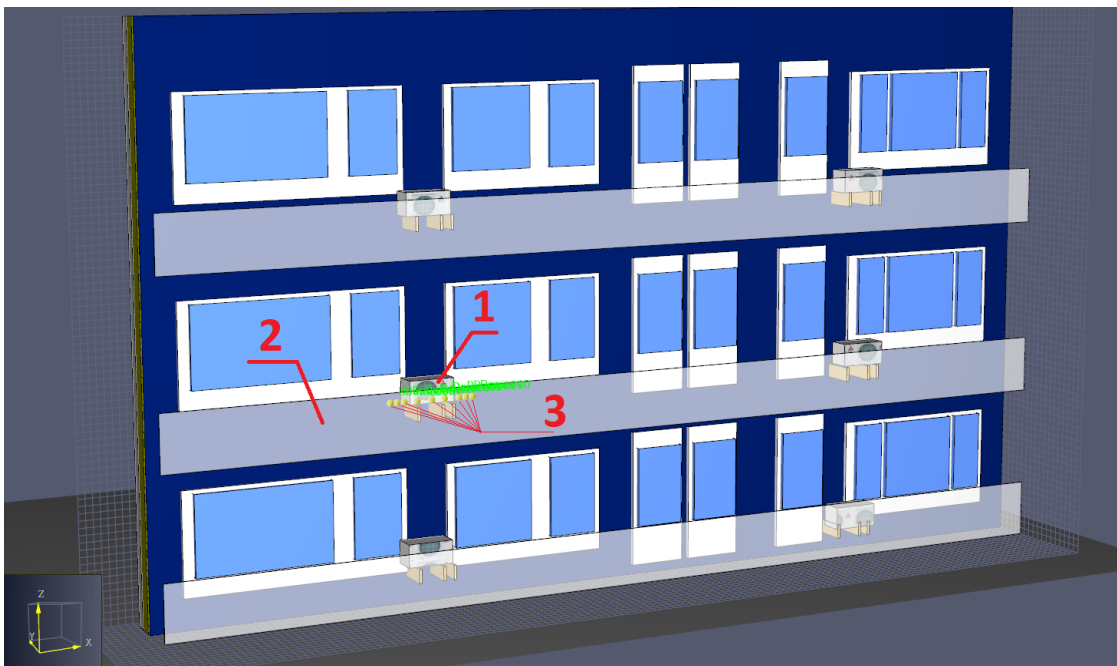


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд моделі фрагменту фасаду будинку та зовнішніх кондиціонерних блоків де: 1 – зовнішній кондиціонерний блок, що також є розрахунковим початковим осередком пожежі; 2 – суцільна горизонтальна декоративна алюмінієва композитна панель; 3 – теплові вимірювачі в газовому середовищі, які фіксують зміну значень температури конструкції алюмінієвої композитної панелі з часом

За критерії неюезпеки, а саме, критичне значення температури прогрівання поверхні фасаду будинку прийнято значення 250 °С, що відповідає температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме ущільнювальні конструкції

металопластикових вікон (герметик та полімерний ущільнювач) згідно з даними [138]. Для суміжних зовнішніх блоків кондиціонеру критичним значенням температури прийнято 75 °С прогріву корпусу, що відповідає аварійній температурі відключення зовнішнього блоку кондиціонеру через високу ймовірність короткого замикання в середині корпусу. Для алюмінієвих композитних панелей критичною температурою займання та відповідно руйнування конструкції є значення 350 °С [148].

За результатом моделювання визначено температурні розподіли по зовнішній частині фасаду будівлі, а також отримано динамічні показники датчиків, які розміщено на поверхні алюмінієвих композитних панелей для фасадів та на корпусі кондиціонеру, який розташовано безпосередньо над поверхом пожежі. На рис. 3.5 наведено графіки усереднених значень температури на поверхні кондиціонерного блоку та на поверхні алюмінієвих композитних панелей для фасадів, які розміщені безпосередньо над поверхом пожежі.

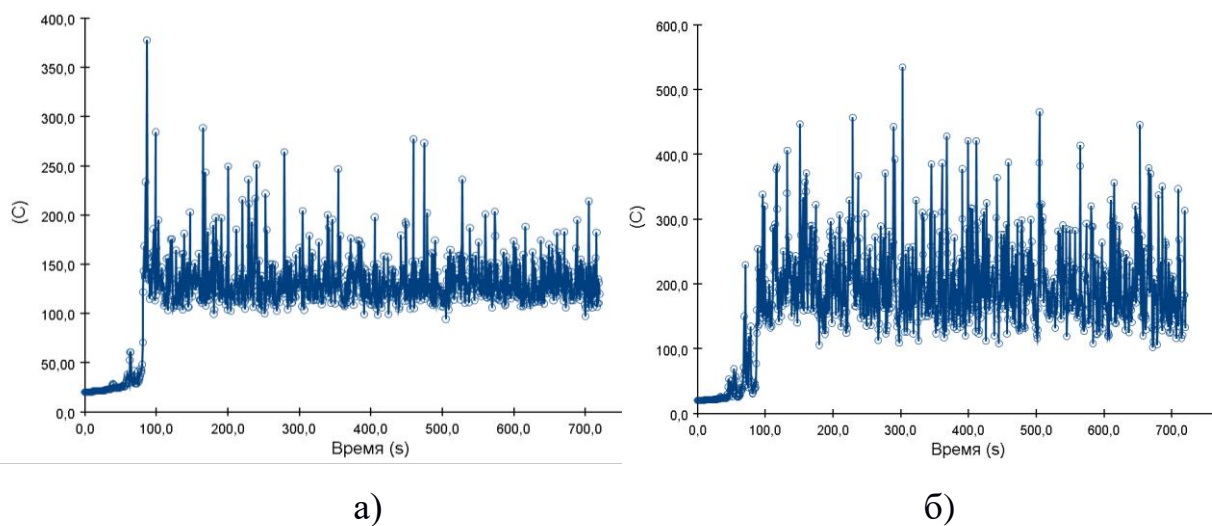


Рисунок 3.5 - Графіки усереднених значень температури на поверхні у продовж всієї тривалості моделювання: а – графік температури на поверхні алюмінієвих композитних панелей для фасадів; б – графік температури на поверхні вище розташованого зовнішнього кондиціонерного блоку

За результатом аналізу динаміки розвитку пожежі та дослідженню даних щодо інтенсивності тепловиділення визначено, що найбільша інтенсивність тепловиділення відбувається у проміжок між 120 та 720 секундах моделювання. Результати розрахунку відображені у візуалізації теплових розподілів на поверхні фасаду в часі, що наведено на рис. 3.6

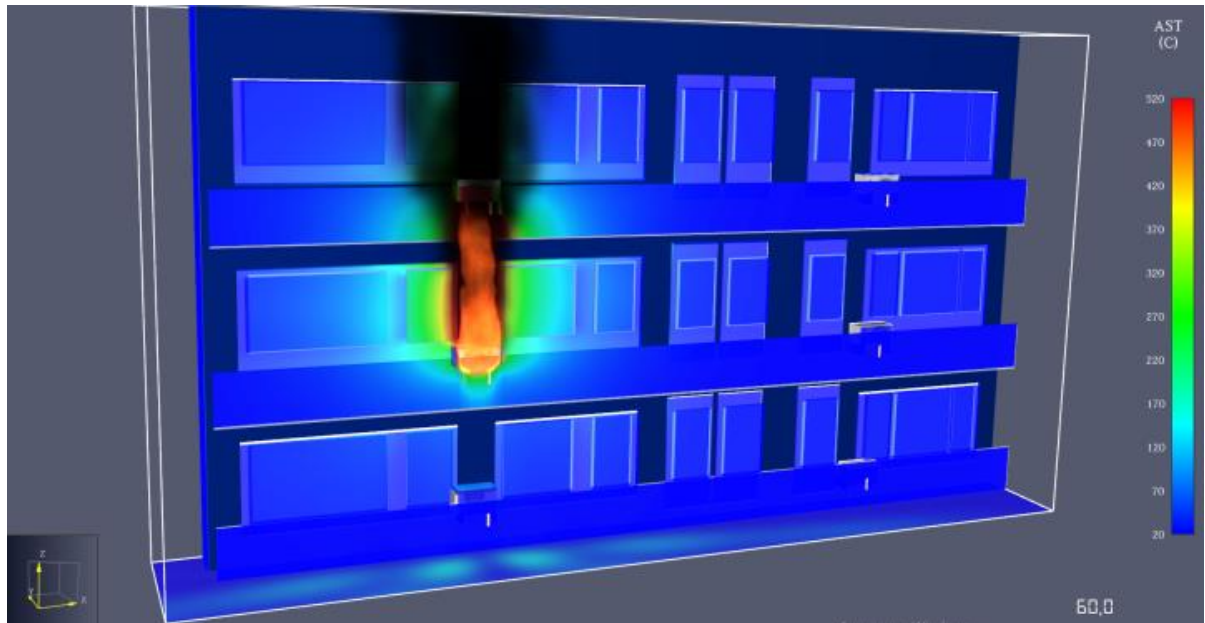


Рисунок 3.6 - Візуалізація пожежі зовнішнього блоку кондиціонера та зміна температурного розподілу по фасаду на 60 секунді

За результатами моделювання встановлено, що наявне пожежне навантаження забезпечує сталу температуру горіння зовнішнього кондиціонерного блоку в межах 700–710 °С з 140 секунди та до 720 секунди включно. При цьому тепловий розподіл прогріву поверхні фасаду для алюмінієвих композитних панелей збільшувався у продовж всієї тривалості моделювання. Вертикальна проекція теплового розподілу по поверхні фасаду свідчить, що горіння кондиціонерного блоку забезпечує вертикальний прогрів поверхні фасаду в межах 250–265 °С шириною від 1,2 м до 1,7 м. Висота теплового розподілу склала близько 7,8–8,1 м. Візуалізація описаних результатів наведено на рис. 3.7.

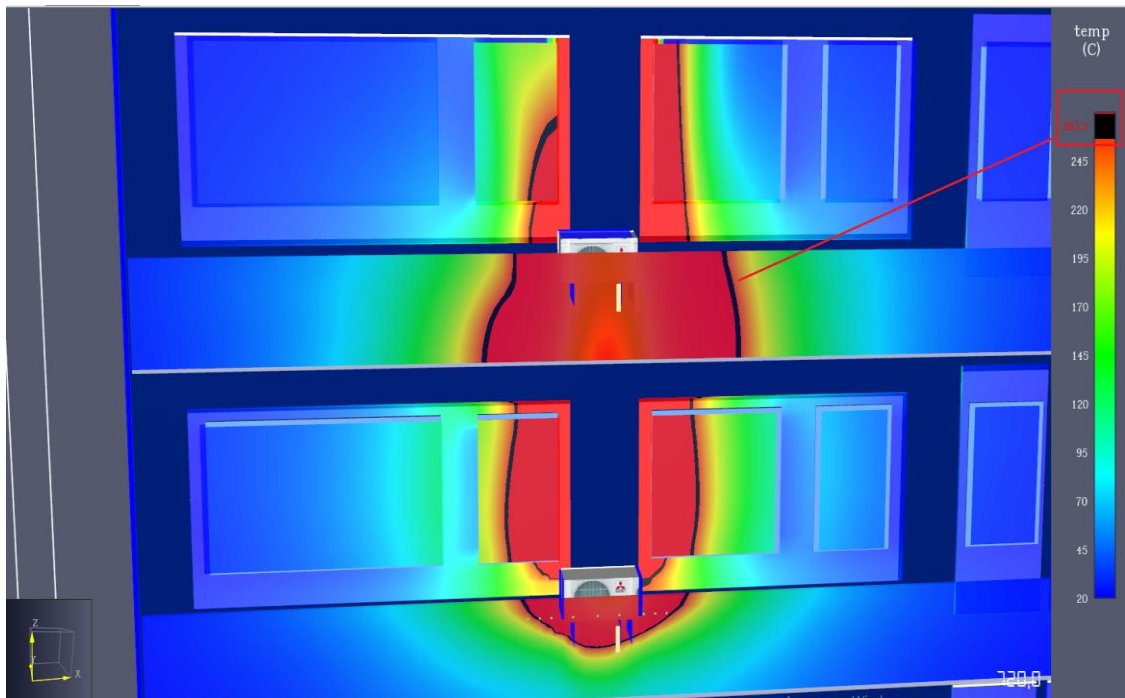


Рисунок 3.7 - Візуалізація температури висхідного потоку від горіння зовнішнього кондиціонерного блоку на 720 секунді моделювання

Дані, приведені на рис. 3.6-3.7 дозволяють провести аналіз критичних температур прогріву фасадних систем, а також визначити мінімально необхідні протипожежні відстані між зовнішніми кондиціонерними блоками.

Отримані залежності розподілу критичних температур прогріву фасаду на даній моделі будинку показав високу ймовірність руйнування зовнішніх алюмінієвих композитних панелей, як на поверсі пожежі так і для поверху, що розташований над ним. При цьому встановлено, що займання кондиціонерного блоку, який знаходиться над поверхом пожежі, відбувається в період 220–240 секунд моделювання. Результати аналізу горизонтальних температурних розподілів від пожежі зовнішнього блоку кондиціонеру показує, що мінімальна протипожежна відстань між зовнішніми кондиціонерними блоками по горизонталі в одній осі має становити не менше 2,5 м.

Разом із тим, горизонтальна відстань розташування зовнішнього блоку кондиціонера, який розташований над поверхом, на якому відбулася пожежа в кондиціонерному блоці має становити не менше 4,5 м від осі по вертикалі.

Дана вимога обумовлена більшою проекцією горизонтального розподілу теплового впливу для поверху, який знаходиться над поверхом пожежі.

Аналіз графіків температурного режиму, які наведені на рисунку 3.5 показав, що на рівні фасаду, який знаходиться над поверхом пожежі, температура прогріву поверхні корпусу кондиціонеру складає в межах 240–270 °С. Сталий характер температурної кривої можна пояснити тим, що даний тип пожежі можна віднести одночасно до категорій В (горіння рідких речовин) та С (горіння газоподібних речовин). Металева конструкція корпусу зовнішнього блоку кондиціонеру створює чіткий вектор вертикального поширення теплового потоку на вище розташований зовнішній блок, що відображено на візуалізації рисунків 3.6-3.7. Враховуючи значення критичної температури в 75 °С для корпусу кондиціонеру, можна припустити високу ймовірність займання вище розташованого кондиціонерного блоку, що, як наслідок, сприятиме подальшому розвитку фасадної пожежі.

Окрім цього, температурний режим пожежі від кондиціонерного блоку може спричинити руйнування конструкцій заповнення світлових прорізів згідно температурних критеріїв [138], та, як наслідок, спричинити поширення пожежі в середину приміщень будівлі. Проте, дослідження даної гіпотези потребує окремого аналізу та натурних випробувань для більш обґрунтованого розкриття висвітленої проблеми.

Практичне значення і реалізація отриманих результатів полягає у виявленні особливостей потенційно небезпечного впливу пожежі зовнішнього кондиціонерного блоку на пожежну безпеку споруди. Отримані температурні розподіли дозволять оцінити потенційну небезпеку, яка може спричинити фасадну пожежу, а також передбачити перспективні заходи щодо її обмеження.

Слід враховувати, що потенційний вплив на фасадні системи від можливої пожежі може змінюватися в залежності від типів зовнішніх кондиціонерних блоків та кількості пожежного навантаження, яке вони включають. Тобто подальші дослідження та натурні випробування можуть

дозволити визначити залежність зміни геометричних параметрів фасадів для безпечного розташування зовнішніх кондиціонерних блоків в залежності від їх типу. Окрім цього, постає актуальне завдання перегляду методик випробування фасадних систем на поширення пожежі із врахуванням можливої наявності додаткового пожежного навантаження розміщеного ззовні, яке раніше не враховувалося.

Серед аналогічних ситуацій виникнення зовнішньої пожежі та поширення її по зовнішнім огорожувальним конструкціям доцільно розглядати випадки встановлення зарядних станцій для електромобілів, а також влаштування самих місць паркування-заряджання електромобілів. В роботах [149-150] представлено результати, що за даних сценаріїв температурний вплив від пожежі може бути набагато потенційно небезпечніший.

Окремо слід відзначити, що отримані дослідження потребують натурних випробувань та верифікації для можливості порівняння результатів теоретичних досліджень та моделювання з реальними умовами пожежі. В тому числі доцільно провести дані дослідження для фасадних систем різного типу конфігурації та матеріалів конструкцій.

### **3.2 Моделювання процесів поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціях при її внутрішньому осередку утворення**

Відповідно до вимог [151] та чинного [14] будинки з умовною висотою від 73,5 до 100 м необхідно поділяти за висотою на протипожежні відсіки, які слід відокремлювати один від одного протипожежним перекриттям з класом вогнестійкості не менше REI 180 або технічним поверхом із протипожежними перекриттями класом вогнестійкості не менше REI 120. Крім того, умовна висота протипожежного відсіку не повинна перевищувати 50 м, а на межі протипожежних відсіків (на рівні протипожежного

перекриття) слід передбачати протипожежні карнизи по контуру будинку, які виступають за межі фасаду не менше ніж на 0,75 м.

Зазначена вимога є важливою складовою комплексу протипожежного захисту для висотних будинків в частині обмеження можливого поширення пожежі по фасаду та її розповсюдження на верхній протипожежний відсік. Проте слід відзначити, що на сьогоднішній день не досліджувався вплив конструктивних параметрів таких карнизів на ефективність протипожежного захисту та обмеження поширення пожежі по фасаду висотного будинку.

Для виявлення впливу конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів (пасивних фасадних протипожежних перешкод), які встановлено на межі протипожежних відсіків для запобігання поширення пожежі у висотних будинках, здійснено аналіз вимог до конструктивних рішень протипожежних карнизів. На основі визначених вихідних даних розроблено типову модель висотного будинку та фасадного протипожежного карнизу на межі вертикальних протипожежних відсіків за допомогою програмного комплексу FDS. За результатом розрахунку наведено висновок щодо ефективності конструктивних параметрів протипожежних фасадних карнизів на межі протипожежних відсіків та можливих шляхів подальшого удосконалення їх конструкції для запобігання поширення пожежі у висотних будинках.

В основу розрахунку покладено сценарій, що пожежа виникає в приміщенні квартири висотного будинку. У місці безпосереднього її виникнення вікна відчинені, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікон квартири. Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем пожежогасіння або димовидалення, тобто пожежа вільно розвивалася у продовж всієї тривалості моделювання.



### 3.2.1 Загальний опис сценарію пожежі та розрахункові параметри моделювання

Для можливості проведення порівняльного аналізу на першому етапі дослідження поширення температури по фасаді висотного будинку проведено моделювання пожежі при умові відсутності протипожежного карнизу [142].

Для цього було створено модель 23 поверхового будинку. В основі матеріалу конструкції будинку було обрано монолітний бетон типу «бетон важкий» густиною  $2280 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $2,04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $1,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Світлові прорізи (вікна) будинку заповнені склом, густиною  $2500 \text{ кг/м}^3$ , з питомою теплоємністю  $0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $0,061 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Характеристики облицювального матеріалу фасаду моделі висотного будинку не враховувалися, умовно приймаючи, що відповідно до вимог [13-14] вони, згідно з вітчизняною класифікацією будівельних матеріалів, для висотних будинків повинні відповідати класу НГ (негорючі). Крок розрахункової сітки FDS моделі складає  $25 \text{ см}^2$ , що обумовлено геометричними розмірами моделі будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів самого карнизу. За сценарієм змодельованої пожежі вона виникає на 17 поверху в приміщенні квартири. У місці безпосереднього її виникнення вікна відчинені, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікон квартири. На рівні 17 та 18 поверхів розміщено вимірювачі температури в газовому середовищі, для отримання порівняльних графіків теплового режиму. Окрім того, поверхню фасадної стіни прийнято як анімовану поверхню з відображенням її температури прогрівання [152-153]. На рис. 3.8 наведено FDS модель будинку без протипожежного карнизу та місця встановлення вимірювачів в газовому середовищі.

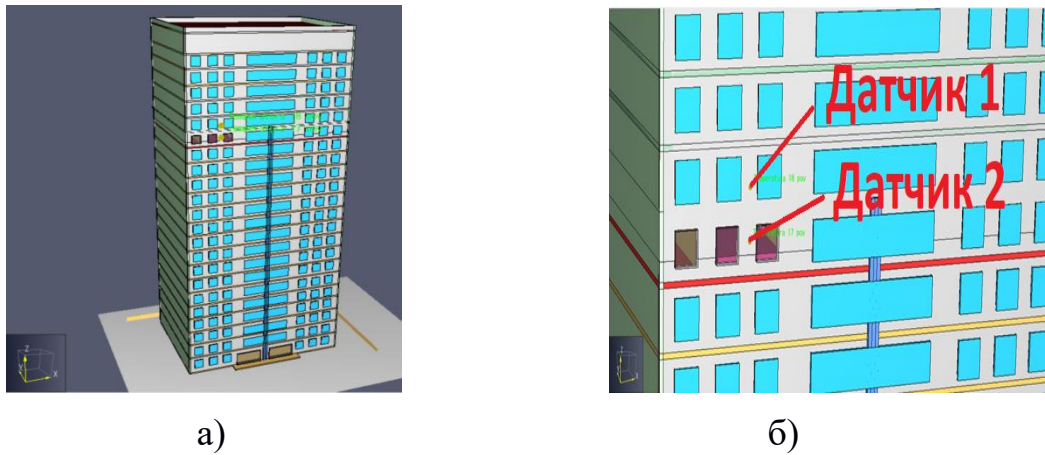


Рисунок 3.8 - Модель висотного будинку без карнизу де: а – зовнішній вигляд моделі, б – місця встановлення датчиків температури

В якості пожежного навантаження, а саме початкового горючого матеріалу, в квартирі обрано займання пінополіуретанового виробу (зазвичай складає 60-70% складу для м'яких меблів) та шерсті. Пожежа виникає на рівні 17-го поверху і знаходиться в центрі кімнати та умовно рівновіддалена від всіх стін приміщення, пожежне навантаження якого складає  $365 \text{ кВт/м}^2$  із максимальною температурою горіння  $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поширення полум'я по поверхні кімнати відбувається із швидкістю  $0,22 \text{ м/с}$  згідно рекомендацій [92]. Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем пожежогасіння або димовидалення, тобто пожежа вільно розвивалася у продовж всієї тривалості моделювання. Дане рішення обумовлено тим, що врахування роботи систем протипожежного захисту не дозволить відтворити найгірші умови розвитку пожежі [154].

Другим етапом моделювання було створення моделі висотного житлового будинку з аналогічними об'ємно-планувальними рішеннями, але обладнаного по всьому контуру на межі 17-го та 18-го поверху прямокутним протипожежним карнизом з виступом за межі фасаду  $0,75 \text{ м}$  правильної прямокутної форми товщиною  $0,5 \text{ м}$  із негорючих матеріалів, що відповідає встановленим вимогам [14]. В якості негорючого матеріалу протипожежного карнизу прийнято легкий бетон з густиною  $450 \text{ кг/м}^3$  та теплопровідністю

0,35 Вт/(м·К). На рівні 17 та 18 поверхів розміщено вимірювачі температури в газовому середовищі.

На рис. 3.9 наведено другу FDS модель висотного житлового будинку обладнаного карнизом по контуру, який виступає за межі фасаду на 0,75 м прямокутної форми.

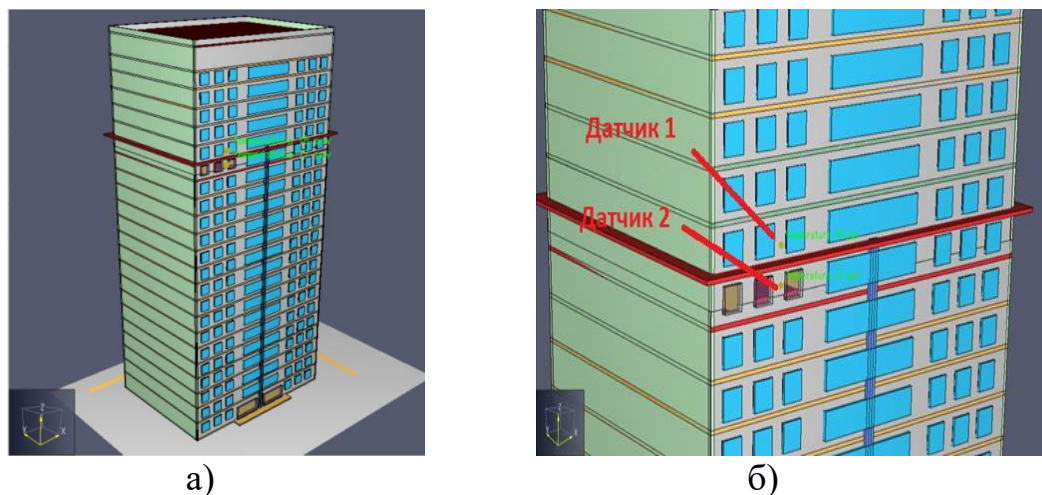


Рисунок 3.9 – Модель висотного будинку з прямокутним протипожежним карнизом де: а – зовнішній вигляд моделі будинку, б – місця встановлення датчиків температури під карнизом та над ним.

Загальна тривалість розрахунків складала 1200 с, що обумовлено нормативним часом прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста (10 хв) згідно з [147], а також додатковий запас часу на розгортання сил та засобів для ліквідації пожежі (також 10 хв).

### 3.2.2 Результати розрахунку для моделі із зовнішнім джерелом пожежі

За результатом моделювання побудовано усереднені порівняльні графіки температури на рівні 17 та 18 поверхів для обох варіантів змодельованого висотного будинку (з протипожежним карнизом та без). На рис. 3.10-3.11 наведено графіки температурних залежностей в часі за результатами розрахунків.

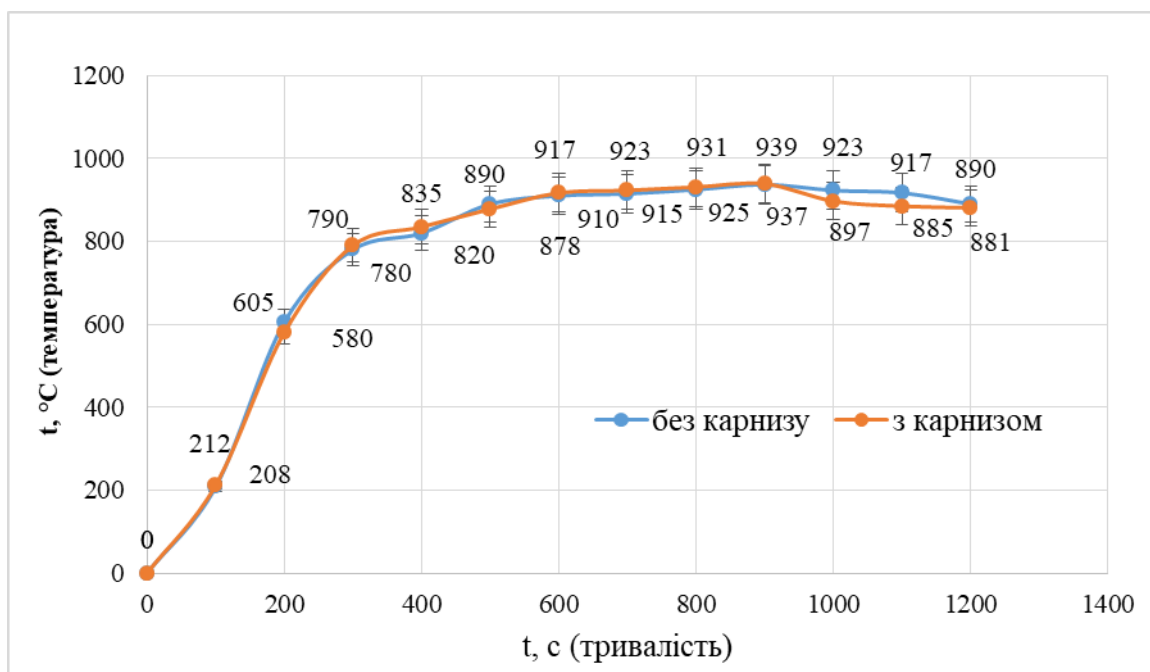


Рисунок 3.10 – Графік залежності середніх значень температури від часу на рівні вікна 17-го поверху при наявності протипожежного карнизу (жовта лінія) та без нього (синя лінія)

На рис. 3.11 наведено графік температурних залежностей від часу для 18-го поверху висотного будинку.

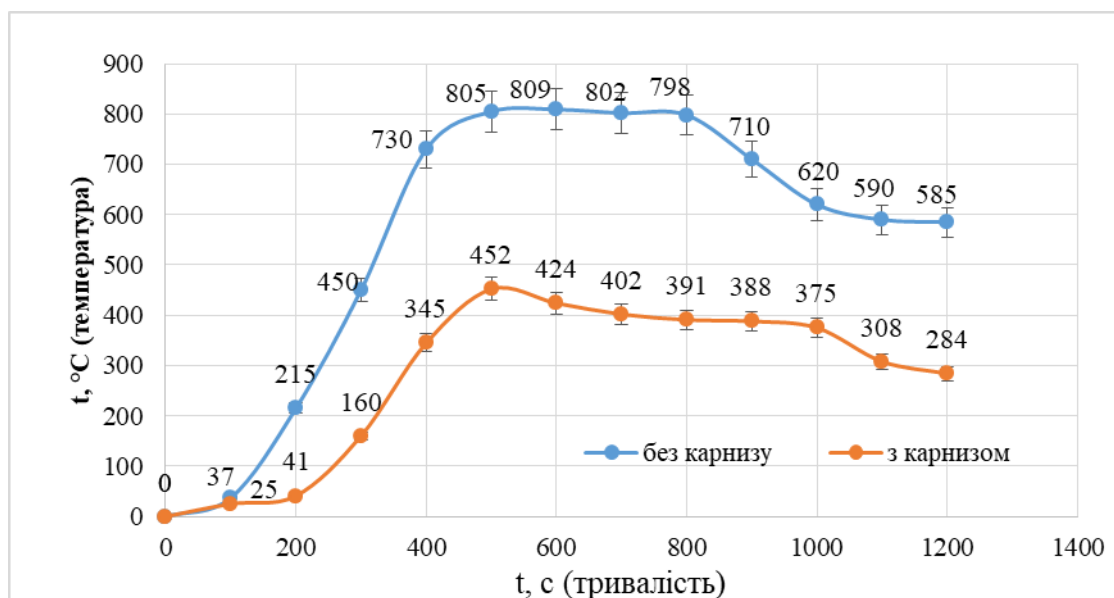


Рисунок 3.11 - Графік середніх значень температурного режиму в часі на рівні вікон 18-го поверху при наявності протипожежного карнизу (жовта лінія) та без нього (синя лінія)

За результатом отриманих даних можна зробити попередні висновки, що дійсно, наявність протипожежного карнизу для даного випадку конструктивного виконання будинку забезпечує зниження температури на рівні 18 поверху з 790-810 °С до значень в 420-455 °С в однаковий час моделювання, тобто забезпечує зниження температури на рівні верхнього поверху фактично на 45-47%. Дане явище можна обґрунтувати зменшенням безпосереднього контакту полум'я умовної пожежі з фасадом, а також створення «резервуару» повітряного охолодження простору безпосередньо над карнизом на рівні 18 поверху. Проте дана температура в 420-455 °С все одно є критичною через високу ймовірність руйнування рам віконних прорізів та поширення пожежі у верхні квартири через займання штор, віконних жалюзі або інших горючих предметів, що можуть знаходитись в зоні вікон. На рис. 3.12 наведено візуалізацію характеру поширення полум'я змодельованої пожежі вздовж запропонованих типів фасадів будинку за однакового проміжку часу.

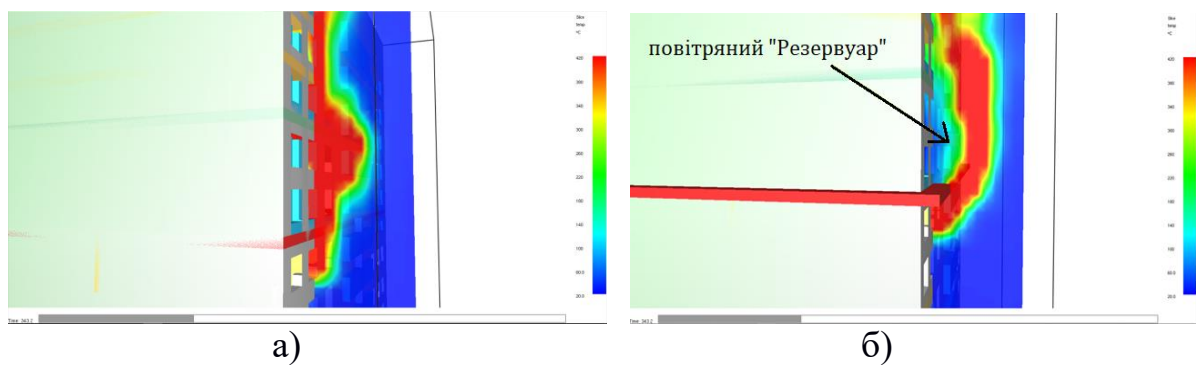


Рисунок 3.12 – Порівняльна візуалізація характеру поширення пожежі по фасаді будинку

Під час проведення FDS моделювання було виявлено інше явище спричинене наявністю протипожежного карнизу, а саме закономірність поширення теплового розподілення по ширині фасаду будинку внаслідок завихрення по горизонталі турбулентного теплового потоку через прямий контакт з протипожежною перешкодою у вигляді протипожежного карнизу

прямокутної форми. Зазначене явище є негативним, так як збільшує площу прогрівання поверхні фасаду будинку з  $242 \text{ м}^2$  за умови відсутності карнизу до значення  $384 \text{ м}^2$ . За критерій граничного значення температури прогрівання поверхні фасаду будинку прийнято значення  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , що відповідає температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції металопластикових вікон згідно з [136]. Тобто, основною вимогою поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях на вище розташований поверх, є у мови руйнування заповнення віконного прорізу та, як наслідок, поширення пожежі в середину приміщення.

На рис. 3.13-3.14 наведено візуалізацію температурних розподілів прогріву фасаду за однаковий час при наявності протипожежного карнизу та без нього.

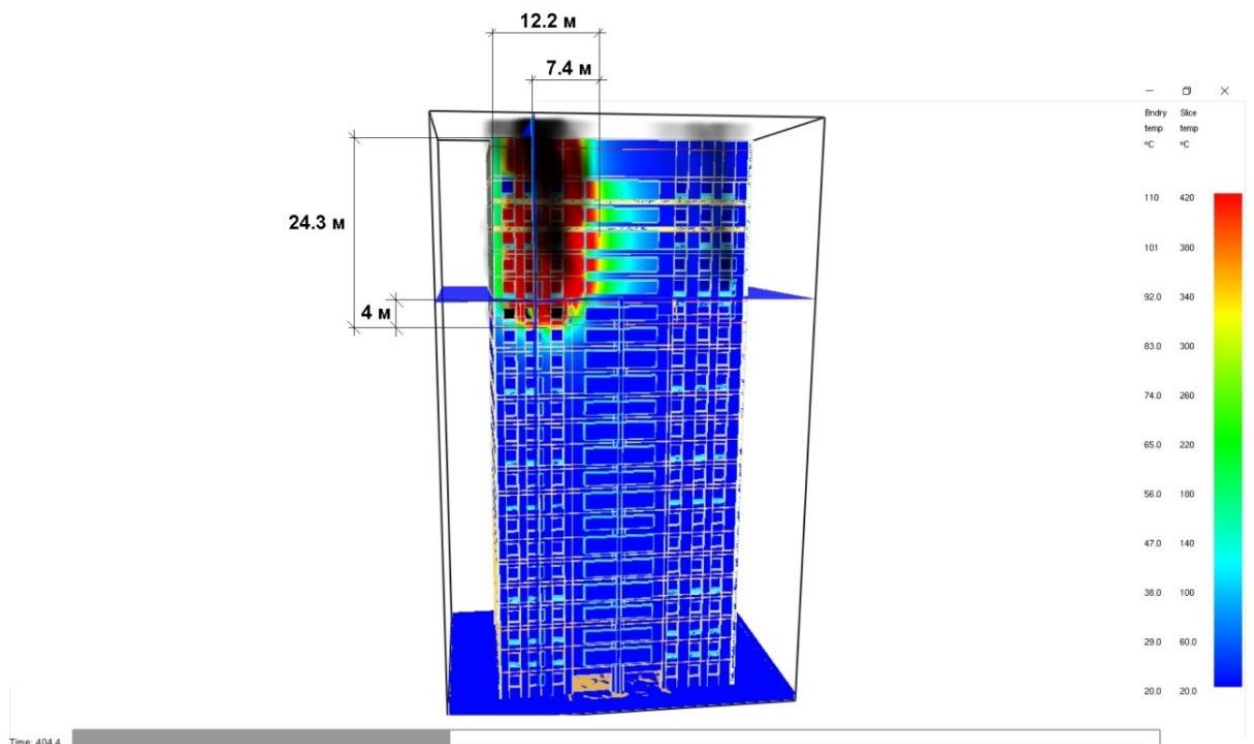


Рисунок 3.13 - Температурні розподілення прогріву по фасаду, який не обладнано протипожежним карнизом

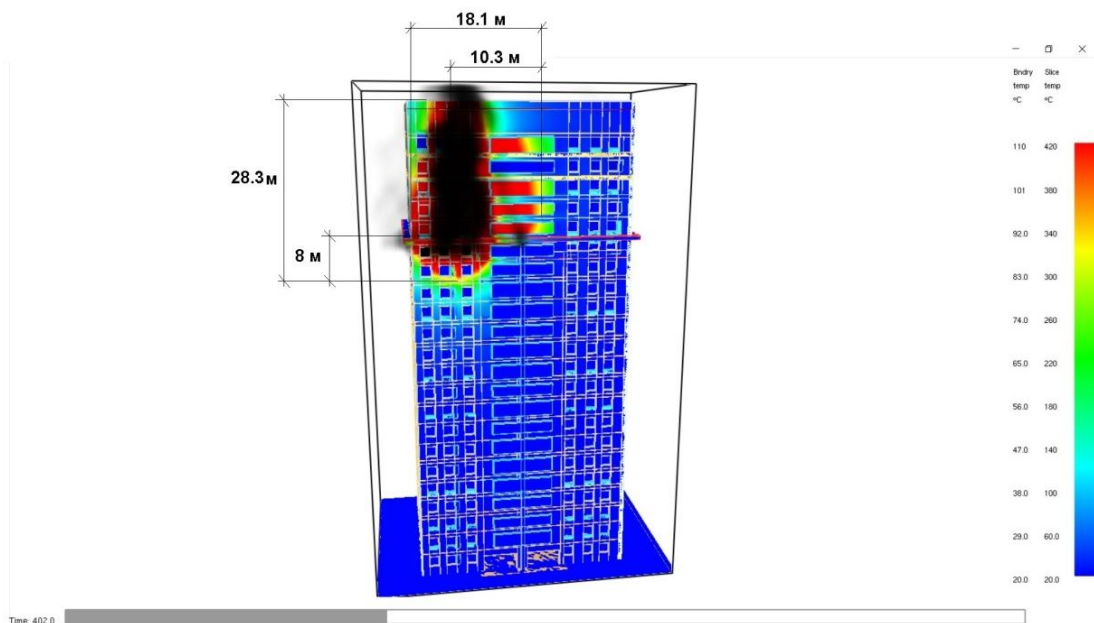


Рисунок 3.14 - Температурні розподілення прогріву по фасаді, який обладнано протипожежним карнизом

Аналіз отриманих теплових розподілів свідчить, що сама наявність протипожежного карнизу на фасаді висотного будинку фактично не запобігає повному поширенню теплового впливу під час пожежі, як по вертикальному так і по горизонтальному розподілу температури, а лише зменшує його максимальне значення та час прогрівання поверхні фасаду, при цьому збільшуючи площу критичного прогріву фасаду будинку.

Таким чином, за даних умов моделювання пожежі та об'ємно-конструктивних параметрів будинку, наявність протипожежного карнизу знижує фактичну температуру на рівні верхнього поверху під яким виникла пожежа, проте збільшує площу температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду фактично на 30-35 % за даних умов моделі будинку. Враховуючи зазначені причини утворення завихрень, а саме прямий контакт турбулентного теплового потоку від пожежі з перешкодою необтікаючої форми, створюються передумови дослідження впливу форми протипожежних карнизів на процеси теплового розподілу прогріву по фасаді будинку. Також залишається актуальним питанням дослідження залежності різних форм та типів протипожежних карнизів та різних типів фасадних

систем будівель на ефективність протипожежного захисту висотних будинків, в тому числі з різними типами фасадів.

Таким чином, визначення залежностей ефективності форми протипожежного карнизу може є предметом подальшого дослідження та може впливати на забезпечення ефективного обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

### **3.2.3 Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширення пожежі по фасадним конструкціям висотних будинків**

Попередні результати показали, що наявність протипожежного карнизу, який відповідає вимогам [14] знижує фактичну температуру на рівні верхнього поверху під яким виникла пожежа фактично до 45%. Разом із тим, під час проведення досліджень, було виявлено збільшення площі температурного розподілу та прогріву конструкції поверхні фасаду на 30-35 %, що є безперечно негативним явищем, та може бути пояснене прямим контактом полум'я пожежі з перешкодою необтікаючої форми.

Попередній проведений аналіз зарубіжних будівельних норм або наукових досліджень ефективності протипожежних карнизів показав, що на сьогоднішній день відсутні рекомендації або єдиний підхід щодо конструктивних параметрів протипожежних карнизів, які передбачаються на фасаді висотної будівлі [155].

Разом із цим, постало питання дослідження не тільки найбільш ефективного значення довжини карнизу, саме його форми, як потенційної складової на запобігання поширення пожежі та зменшення площі температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду.

Для моделювання та дослідження поширення температури по фасаді висотного будинку при різних типах протипожежних карнизів було створено базову модель фрагменту будинку. В основі матеріалу конструкції будинку



було обрано монолітний бетон типу «бетон важкий» густиною  $2280 \text{ кг/м}^3$ , питома теплоємність  $2,04 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $1,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Світлові прорізи (вікна) будинку заповнені склом, густиною  $2500 \text{ кг/м}^3$ , з питомою теплоємністю  $0,67 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  та теплопровідністю  $0,061 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Характеристики облицювального матеріалу фасаду моделі висотного будинку не враховувалися, умовно приймаючи, що відповідно до вимог будівельних норм вони мають бути негорючі. Крок розрахункової сітки FDS моделі складає  $25 \text{ см}^2$ , що обумовлено геометричними розмірами моделі будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів самого карнизу. За сценарієм змодельованої пожежі вона виникає на поверсі, що розташований безпосередньо під протипожежним фасадним карнизом, при цьому у приміщенні відкрите одне вікно, а утворюваний тепловий потік та полум'я вільно поширюються із вікон квартири.

Прийнято, що пожежа виникає в центрі кімнати та умовно рівновіддалена від всіх стін приміщення, пожежне навантаження якого складає  $365 \text{ кВт/м}^2$  із максимальною температурою горіння  $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поширення полум'я по приміщенню відбувається із швидкістю  $0,22 \text{ м/с}$  згідно рекомендацій [107] та досліджень [156-157]. Під час проведення розрахунків не враховувалась робота систем пожежогасіння або димовидалення, тобто пожежа вільно розвивалася у продовж всієї тривалості моделювання.

На рис. 3.15 наведено базову модель фрагменту висотної будівлі та модель приміщення із пожежним навантаженням в якому змодельована пожежа.

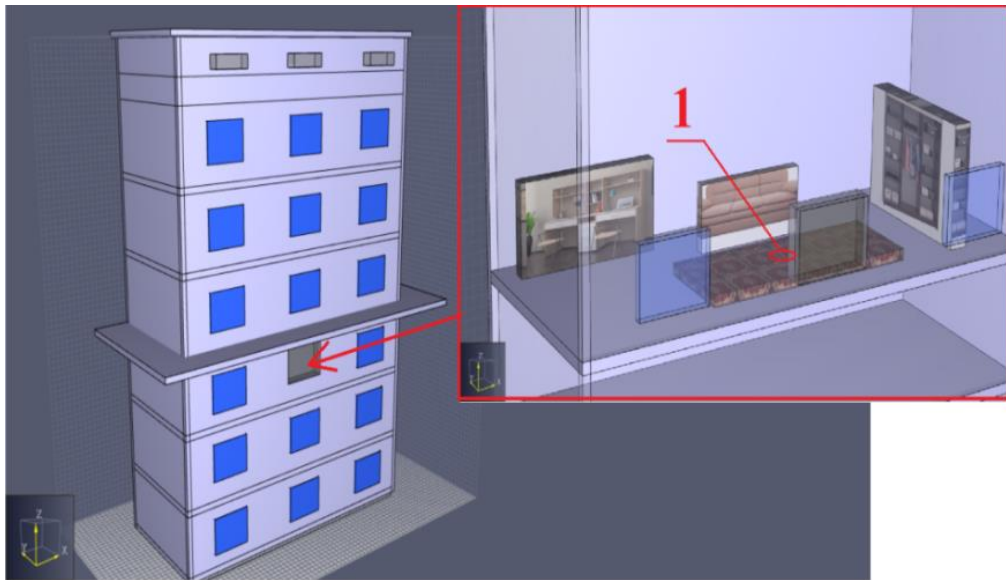


Рисунок 3.15 - Модель будівлі та місце початкового осередку пожежі під час проведення досліджень, де: 1 – осередок пожежі в приміщенні

За критерій граничного значення температури прогрівання поверхні фасаду будинку прийнято значення  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відповідає нижчій температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції металопластикових вікон згідно з даними [138].

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

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

Всі типи протипожежних карнизів виконуються з негорючих матеріалів, а також модель не передбачає їх деформацію чи руйнування в наслідок вогневого впливу.

На рис. 3.16 наведено досліджувані типи фасадних протипожежних карнизів.

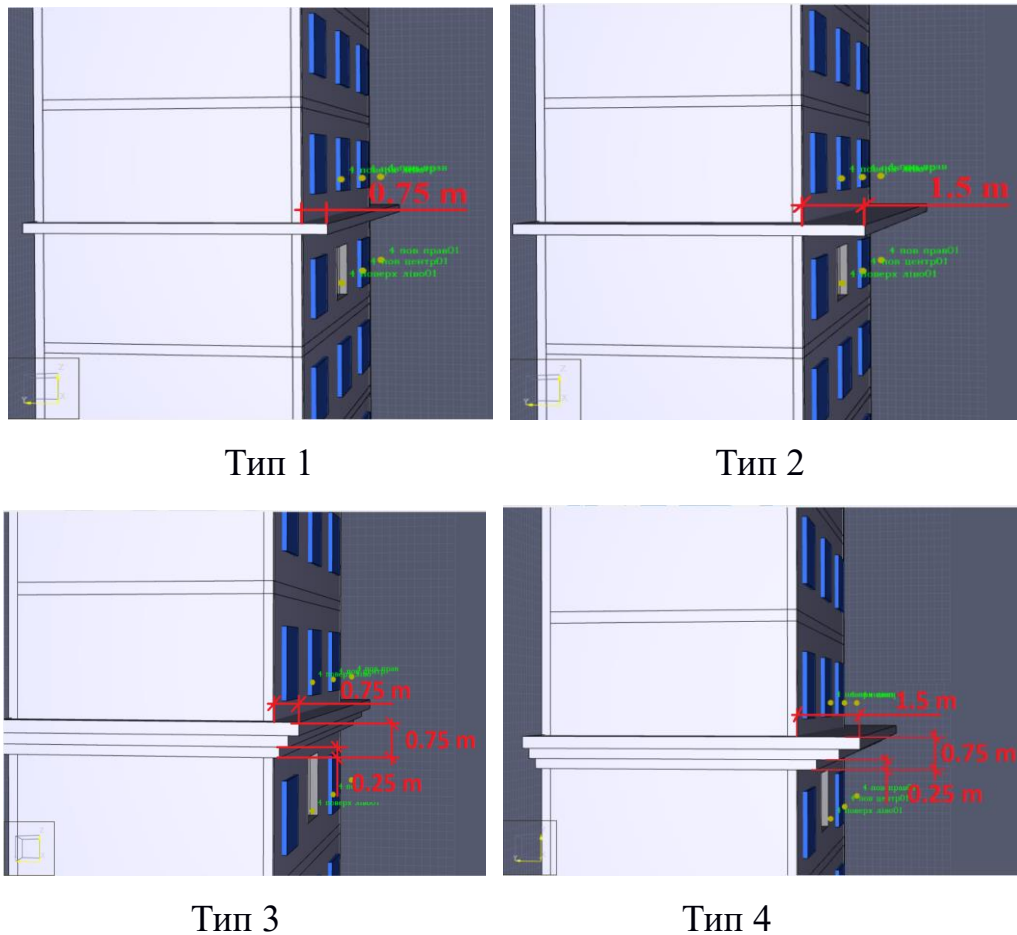


Рисунок 3.16 – Моделі досліджуваних типів фасадних протипожежних карнизів

Загальна тривалість розрахунків складала 1200 с, що обумовлено нормативним часом прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста (10 хв) згідно з [147], а також додатковий запас часу на розгортання сил та засобів пожежно-рятувальних підрозділів для ліквідації пожежі (також 10 хв). За результатами моделювання, побудовано температурні розподіли прогріву

фасаду розрахункової моделі. Результати моделювання, а також візуалізацію пожежі наведено на рис. 3.17.

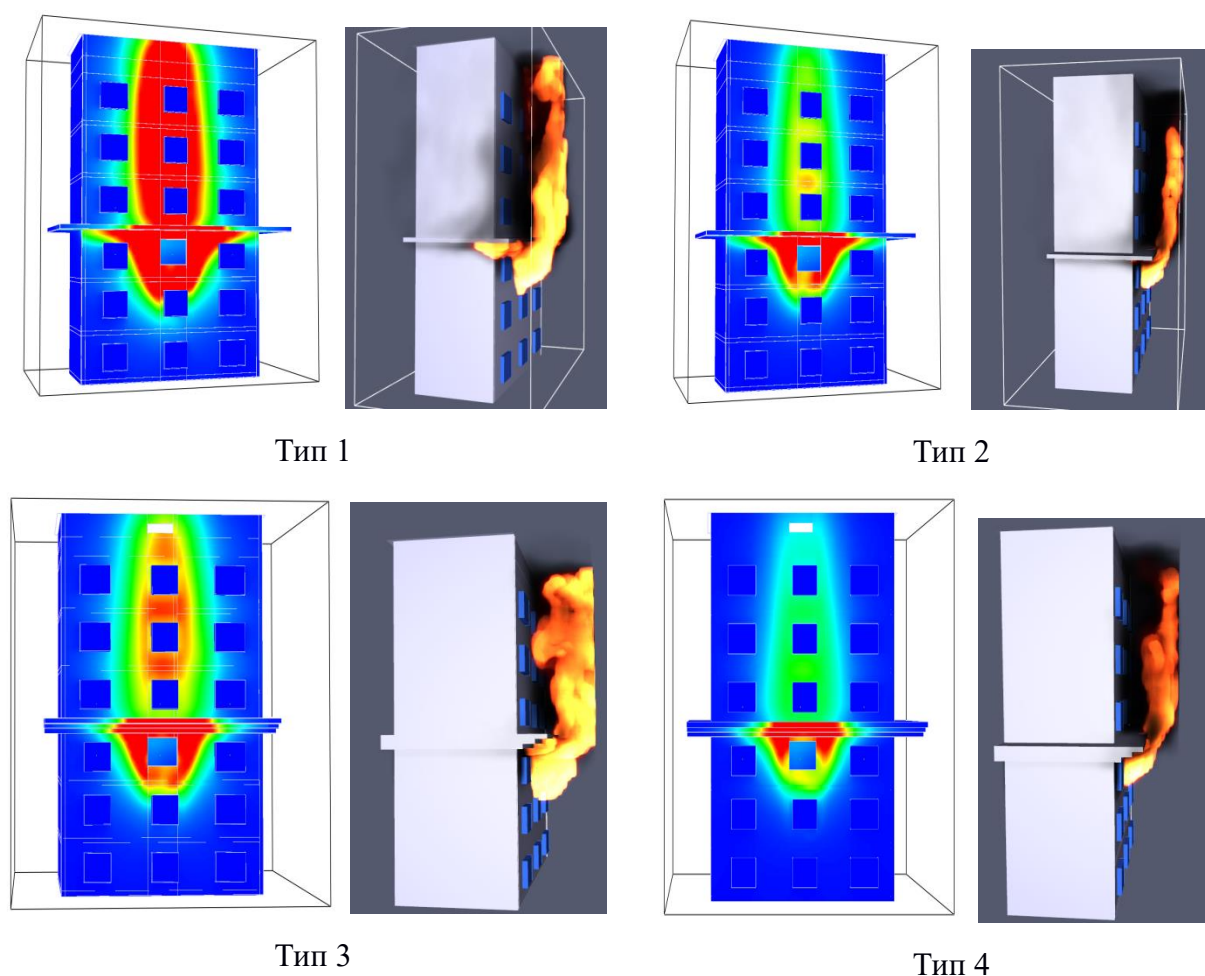


Рисунок 3.17 - Результати отриманих температурних розподілів прогріву фасаду для розрахункових моделей

За результатами моделювання виявлено закономірність збільшення площі прогріву фасаду для прямих типів карнизів не обтічної форми, при цьому наявність протипожежного карнизу на фасаді будівлі прямої форми не запобігає повному поширенню теплового впливу під час пожежі, як по вертикальному так і по горизонтальному розподілу температури, але значно зменшує її максимальне значення та збільшує тривалість прогрівання поверхні фасаду. Також підтверджено припущення викладене в [152], що прямий контакт турбулентного теплового потоку від пожежі з перешкодою необтічної форми збільшує площу критичного прогріву фасаду будинку під

протипожежним карнизом та над ним фактично на 30-35 % за даних умов моделей будинку.

На рис. 3.18 наведено зведені графіки залежностей зміни температурного режиму над поверхом пожежі в часі з врахуванням типів протипожежних карнизів.

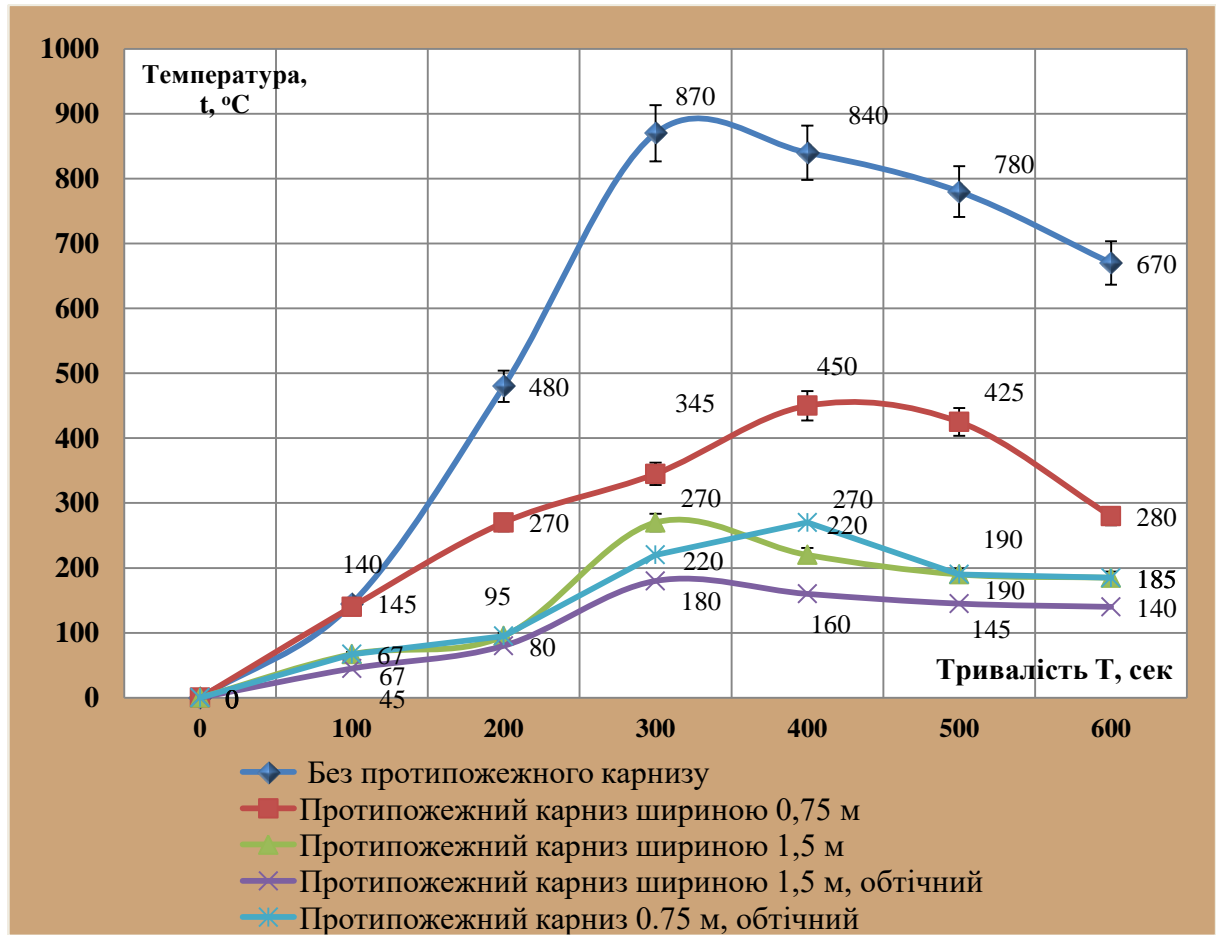


Рисунок 3.18 - Зведений графік температурних залежностей при застосуванні різних типів протипожежних карнизів

Результати даного моделювання демонструють наявність значного впливу форми протипожежних фасадних карнизів на ефективність запобігання поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями, а саме застосування карнизів обтічної форми є найбільш ефективним конструктивним заходом.

Таким чином, за даних умов моделювання, встановлено, що наявність протипожежного фасадного карнизу з виступом 0,75 м та 1,5 м є ефективним

заходом, що може обмежувати температурний вплив від пожежі на рівні верхнього поверху під яким вона виникла з 870 °C до 450 °C та 270 °C відповідно. Разом із тим, пряма форма протипожежного фасадного карнизу збільшує площу температурного розподілу прогріву конструкції поверхні фасаду в межах на 30-35 % за даних умов моделювання та для даних об'ємно-планувальних рішень фасаду висотного будинку. Виявлено, що за даних умов моделювання температура поверхні фасаду для верхнього поверху, який розташований над поверхом де виникла пожежа за наявності протипожежного карнизу обтічної форми знижується з 270 °C ( $\pm 30$  °C) до 180 °C ( $\pm 10$  °C), що може суттєво впливати на забезпечення умов обмеження подальшого поширення пожежі.

### **3.3 Моделювання впливу пожежі у фасадній частині будинку з внутрішнім замкнутим двором (атріумом) на протилежно розташований фасад**

Одним із найнебезпечніших типів пожеж, які поширюються зовнішніми огорожувальними конструкціями є її поширення по зовнішнім огорожувальним конструкціям у внутрішньому дворовому просторі будівлі. В даному випадку велику роль відіграє кутовий коефіцієнт опромінення протилежно розташованої площини фасаду, та площин фасадів, які суміжно розташовані у замкнутому просторі (або частково замкнутому просторі) внутрішнього двору [158-160]. Кутовий коефіцієнт опромінення вказує частку загального теплового потоку від заданої випромінюючої поверхні, яка досягає заданої поверхні, що приймає тепловий потік. Тепловий потік не є прямою величиною, яка може бути асоційована із причинами поширення та охоплення пожежею суміжних фасадів будівель або протилежно розташованих площин фасадів. Зазначене обмежує можливості використання зазначеного критерію як єдиного правильного, тому для оцінювання протипожежних відстаней більш доцільно використовувати критерій, який

забезпечує умову прямої фіксації можливості утворення пожежі на суміжній площині фасаду будинку, враховуючи природу матеріалів, що в ньому використовуються, а саме температурний критерій [83].

Таким чином, сутність завдання полягає у співставленні реальної утворюваної температури на поверхні суміжно розташованих площин фасаду внутрішнього двору з максимально допустимою згідно з прийнятими критеріями. Просторово-часові розподіли температури на конструкції фасаду внутрішнього двору об'єкту під час можливої пожежі, а також її візуалізація, дадуть змогу отримати дані, на основі яких можна зробити висновки про вплив запропонованих інженерних заходів на запобігання поширенню пожежі та оцінити ефективність їх застосування.

### **3.3.1 Опис конструктивних особливостей Об'єкту та формування сценарію пожежі**

Для проведення комп'ютерного моделювання поширення пожежі та динаміки її впливу у фасадній частині будинку з внутрішнім замкнутим двором (атріумом) на протилежно розташований фасад та перевірки обґрунтованості запропонованих обчислювальних гідродинамічних моделей тепломасопереносу обрано проект будівлі готелю. Модель базується на реальних об'ємно-конструктивних рішеннях будівлі з врахуванням матеріалів, які використовуються у конструкції фасадної системи. Особливістю проекту є наявність замкнутого внутрішнього двору з шириною вільного простору до протилежної сторони фасаду в 4 м. В якості заповнення світлових прорізів використовуються трьох-камерні склопакети та навісні панелі. На рис. 3.19 наведено план типового поверху готелю із внутрішнім двором, контури якого позначено червоним кольором та зовнішній вигляд будівлі.

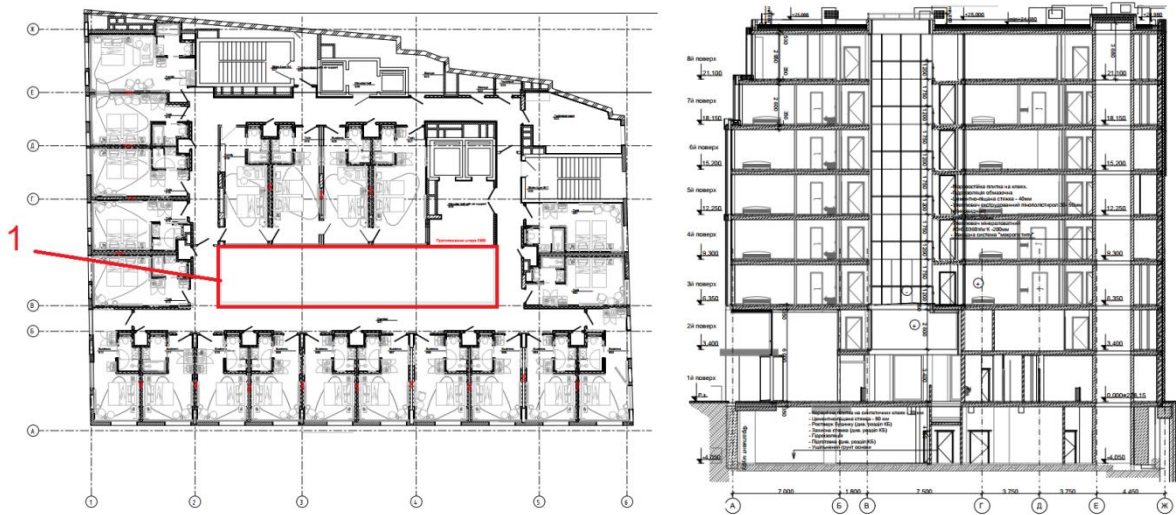


Рисунок 3.19 – планувальні рішення розрахункового об’єкту  
 де: 1 - внутрішній відкритий простір, який обмежений з чотирьох боків  
 внутрішнім фасадом будинку

Під час створення моделі Об’єкту відтворено внутрішні об’ємно-планувальні рішення на поверхах, що може впливати на поширення пожежі, тривимірної та двовимірної візуалізації результатів моделювання динаміки розвитку пожежі.

Серед досліджуваних об’єктів розглядається будівля готелю, його об’ємо-планувальні рішення та передбачені системи протипожежного захисту. Каркас будівлі готелю виконується в монолітному залізобетонному каркасі, з без балочним перекриттям. Зовнішні огорожувальні конструкції - вертикальні несучі залізобетонні елементи з навісною фасадною системою, у якості утеплювача прийнято мінеральну вату, зовнішню поверхню - керамограніт світлих кольорів.

Фасад внутрішнього простору передбачено із суцільних (без прорізів) світлопрозорих (скляних) конструкцій. Внутрішні перегородки - цегляні та гіпсокартонні. Матеріали внутрішнього оздоблення приміщень та шляхів евакуації обумовлене функціонально-технологічними вимогами з урахування показників пожежної небезпеки згідно [13].



Прийнята архітектурна концепція передбачає влаштування у будинку готелю внутрішнього відкритого простору, який обмежений: - з чотирьох боків внутрішнім фасадом будинку із суцільних світлопрозорих (скляних) конструкцій; - на рівні перекритті між 2 та 3 поверхом, відм. 6.350 - світлопрозорим суміщеним покриттям (скляний світловий ліхтар). Розмір простору складає (д/ш/в) 19 x 3.8 x 19 м.

В якості пожежного навантаження, а саме початкового горючого матеріалу, в готельному номері обрано займання пінополіуретанового виробу (зазвичай становить 60-70 % складу для м'яких меблів) та шерсті. Пожежа виникає в центрі кімнати та умовно рівновіддалена від усіх стін приміщення, пожежне навантаження якого становить  $350 \text{ кВт/м}^2$  із максимальною температурою горіння  $1190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поширенню полум'я по поверхні кімнати відбувається вільно із швидкістю  $0,022 \text{ м/с}$ , згідно з рекомендаціями [107]. Зменшення інтенсивності горіння (затухання) відсутнє.

За результатом аналізу об'ємно-конструктивних рішень об'єкту та аналізу найбільш небезпечного сценарію пожежі, прийнято початковий осередок пожежі в одній із кімнат готельних номерів на 3-му поверсі в осях (В-Д) 2-4, яка вільно поширюється у коридор через відкриті двері, які заблоковані. Даний сценарій забезпечує найбільш несприятливі умови для внутрішнього простору готелю, що може спричинити поширення пожежі по фасаді на інші поверхи та частини будинку, а також заблокувати евакуаційні шляхи для людей небезпечними чинниками пожежі.

Розрахункова тривалість вільного горіння пожежі обґрунтована часом нормативного прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста (10 хвилин) згідно з [147]. Також закладаємо 2 хвилини на розгортання сил та засобів безпосередньо на місці пожежі.

Для кращої візуалізації, конструкції фасаду будівлі виконано напівпрозора, а зовнішня та внутрішня поверхня фасаду має анімовану властивість відтворення теплового поширення в результаті пожежі протягом всієї тривалості моделювання [161].

Крок розрахункової сітки FDS-моделі становив  $25 \text{ см}^2$ , що обумовлено геометричними розмірами моделі будівлі та кратності розміру комірки сітки відносно геометричних параметрів конструкцій фасаду [162-163].

За критерій граничного значення температури прогрівання поверхні фасаду Готелю прийнято значення  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , що відповідає температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції склопрозорих пакетів згідно з даними [138].

### 3.3.2 Результати моделювання впливу фасадної пожежі у внутрішньому замкнутому дворовому просторі будівлі

За результатом аналізу об'ємно-конструктивних та планувальних рішень відтворено 3-D модель восьмиповерхового готельного комплексу з адміністративними та торговими приміщеннями а також його внутрішній простір. На рис. 3.20 наведено зовнішній вид моделі будівлі готелю.

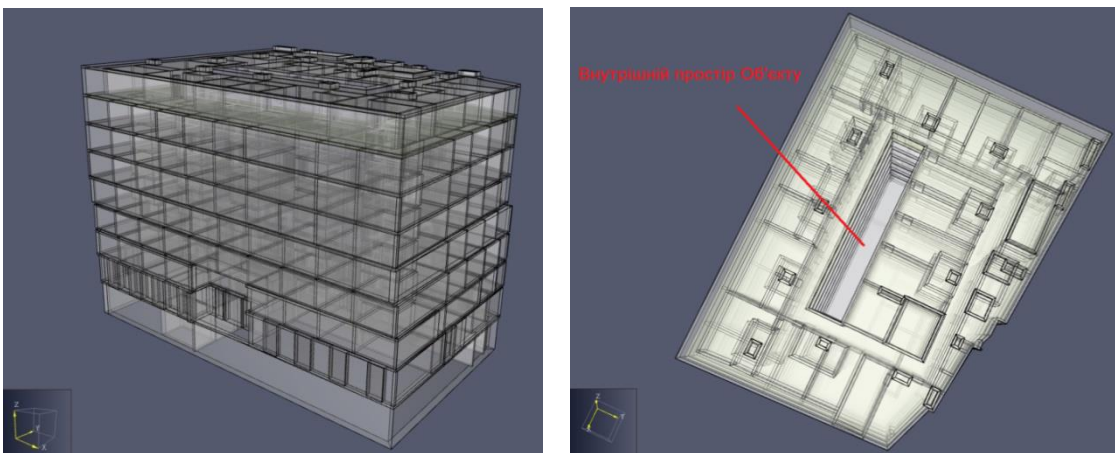


Рисунок 3.20 – Зовнішній вигляд відтвореної моделі будівлі

За результатами моделювання встановлено, що руйнування віконних світлопрозорих конструкцій в результаті пожежі, що виникає в номері готелю відбувається в період на 7-8 хвилині. Полум'я, продукти горіння та небезпечні чинники пожежі вільно поширюються в об'ємі приміщень, коридорі та поверхах протягом всієї тривалості моделювання. На

рис. 3.21 наведено візуалізацію пожежі та її поширення в середині об'єму приміщень та ззовні у внутрішній дворовий простір на 720 секунд.

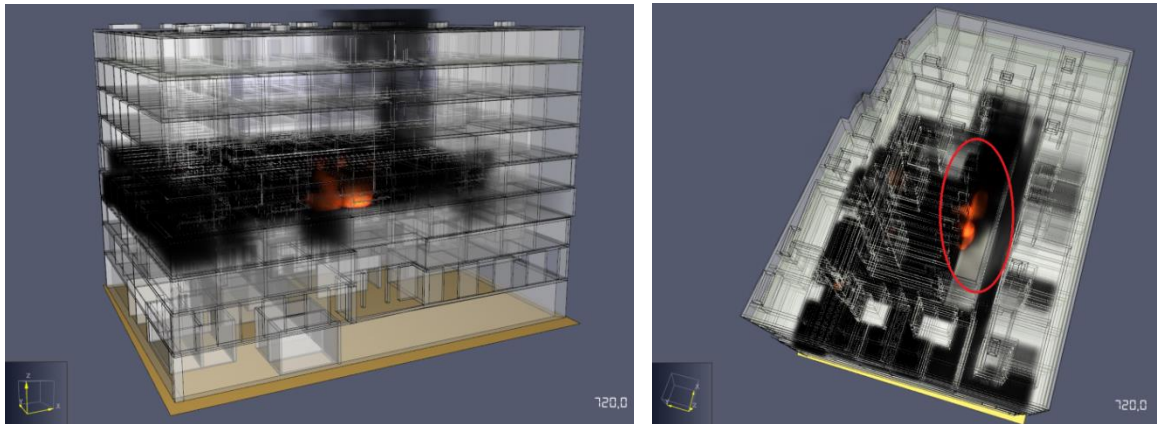


Рисунок 3.21 – Візуалізація змодельованої пожежі та її поширення

На основі закладених теплофізичних властивостей матеріалів конструкції будівлі готелю та фасадної системи (густина, агрегатний стан, питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт поглинання та випромінювання, температура самозаймання матеріалів) отримано температурні розподіли прогріву поверхні фасаду із внутрішньої сторони двору та побудовано температурні криві в часі. На рис. 3.22 наведено візуалізацію температурних розподілів на рівні 3-го та 4-го поверхнях фрагменту моделі будівлі, які знаходилися в зоні найбільшого температурного впливу.

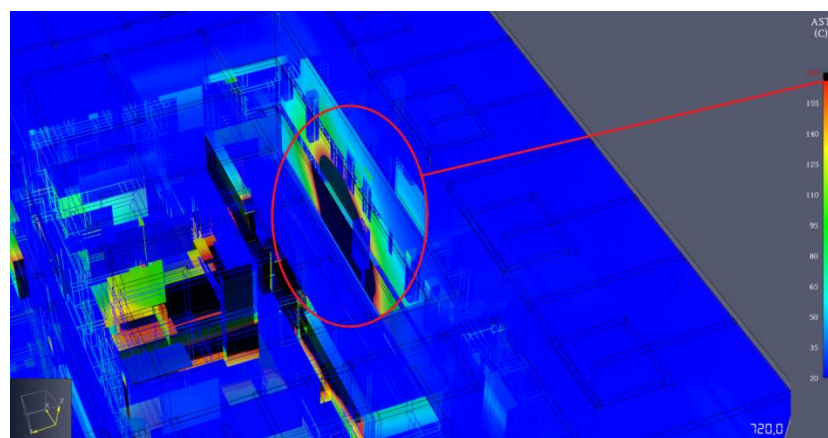


Рисунок 3.22 – Температурний розподіл на протилежній площині фасаду відносно площини фасаду де виникла пожежа

Таким чином, максимальне значення температури на поверхні протилежно розташованого фасаду внутрішнього дворового простору готелю склало 176 °С. На рис. 3.23 наведено графік залежності утворення температури на поверхні протилежно розташованого фасаду внутрішнього дворового простору готелю в часі.

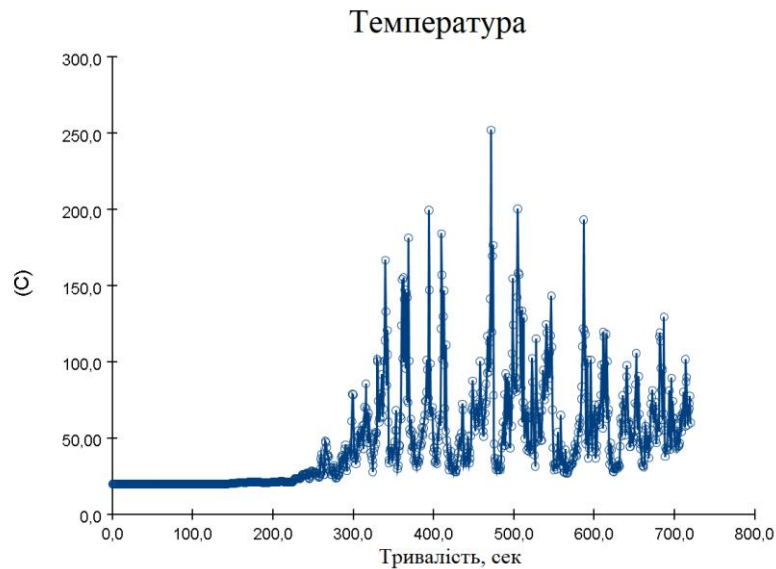


Рисунок 3.23 – Графік залежності утворення температури на поверхні протилежно розташованого фасаду будівлі в часі

За результатом проведених обґрунтувань протипожежних рішень щодо забезпечення непоширення пожежі по фасаду в об'ємі внутрішнього простору об'єкту встановлено, що пожежа та її небезпечні чинники не досягають своїх критичних значень температури прогрівання поверхні фасаду готелю у 250 °С, що відповідає температурі деформації конструкції матеріалу з найменшим температурним опором, а саме конструкції склопрозорих пакетів. Для стіни фасаду 3-го поверху із протилежної сторони відносно зони осередку поширення пожежі максимальне значення теплових розподілів склало 176 °С. Для стіни фасаду 4-го поверху із протилежної сторони відносно зони осередку поширення пожежі максимальне значення теплових розподілів не перевищило 90-135 °С. Таким чином, граничні умови руйнування склопрозорої фасадної системи, з протилежної сторони відносно

зони осередку поширення пожежі, не досягаються. Разом із тим, екрануючий ефект від пожежі в замкнутому просторі може сприяти більш швидкому поширенню пожежі на верхні поверхи та створити передумови для її поширення на суміжні фасади будівлі, що може бути предметом подальших досліджень.

### **3.4 Моделювання обмеження поширення пожежі за допомогою активних фасадних протипожежних перешкод**

Серед впровадження перспективних систем перешкоджання поширення пожежі по фасадах будівель важливе місце займають активні фасадні протипожежні перешкоди, зокрема протипожежні карнизи обладнані дренчерними зрошувачами. На сьогоднішній день в світі існують приклади влаштування водяних систем пожежогасіння або охолодження зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель, проте їх застосування в більшій мірі стосується промислових споруд або установок [164]. Серед прикладів споруд, які підлягають додатковому активному захисту можна відмітити склади зберігання вибухо-пожежонебезпечної продукції, резервуари зберігання нафтопродуктів, трансформаторні підстанції тощо. На рис. 3.24 наведено фото споруд обладнаних активними системами водяного пожежогасіння зовнішніх огорожувальних конструкцій.



Рисунок 3.24 – Фото систем водяного екранування від пожежі зовнішніх огорожувальних конструкцій

Разом із тим, на сьогоднішній день відсутні методики розрахунків з обґрунтування параметрів для активних систем обмеження поширення пожежі цивільних об'єктів (житлових, громадських, адміністративних будівель), зокрема інтегрованих протипожежних карнизів обладнаних системами дренчерного пожежогасіння, що є актуальним завданням.

З метою визначення обґрунтованості запропонованих обчислювальних гідродинамічних моделей тепломасопереносу для активних систем перешкоджання поширення вогню для фасаду будівель відтворено 3-D модель 17-ти поверхового житлового комплексу. Згідно з прийнятим сценарієм розрахунку, пожежа виникає та поширюється в середині першого, другого та третього поверхів нижнього протипожежного відсіку у приміщеннях громадського призначення. Житловий будинок, згідно з нормами [21] розділений на протипожежні відсіки, тобто житлова частина відокремлена від громадської частини протипожежними перешкодами. В якості заходів, щодо обмеження поширення пожежі по фасаду будинку між нижнім громадським протипожежним відсіком та верхнім житловим протипожежним відсіком передбачено влаштування протипожежного карнизу шириною 0,75 м.

Серед можливих розрахункових сценаріїв прийнято два варіанти, а саме перший варіант, коли будинок обладнаний протипожежним карнизом на межі протипожежних відсіків. За другим сценарієм, аналогічний будинок обладнаний фасадною протипожежною перешкодою активного типу, а саме протипожежним карнизом із системою водяного дренчерного пожежогасіння, яка активується під час пожежі.

В якості обґрунтування витратних характеристик системи дренчерного пожежогасіння, прийнято рекомендації [165-166], як для розрахунку засобів пожежогасіння технологічних площадок промислових об'єктів. Враховуючи вимоги [167], а також з врахуванням наукових робіт [168-169] запропоновано передбачити витрату води з кожного дренчерного зрошувача в кількості 49 л/хв.

На кожному із двох водоводів передбачено не менше 13 дренчерів з витратою води не менше 1,5 л/с кожний. Загальна кількість рівномірно розташованих водяних дренчерів інтегрованих в протипожежний карниз складає 18 одиниць. Прийнято, що під час розрахунку за другим сценарієм пожежі система дренчерного пожежогасіння активується через 10 хвилин після початку розвитку пожежі. На рис. 3.25 наведено візуалізацію створеної моделі житлового комплексу.

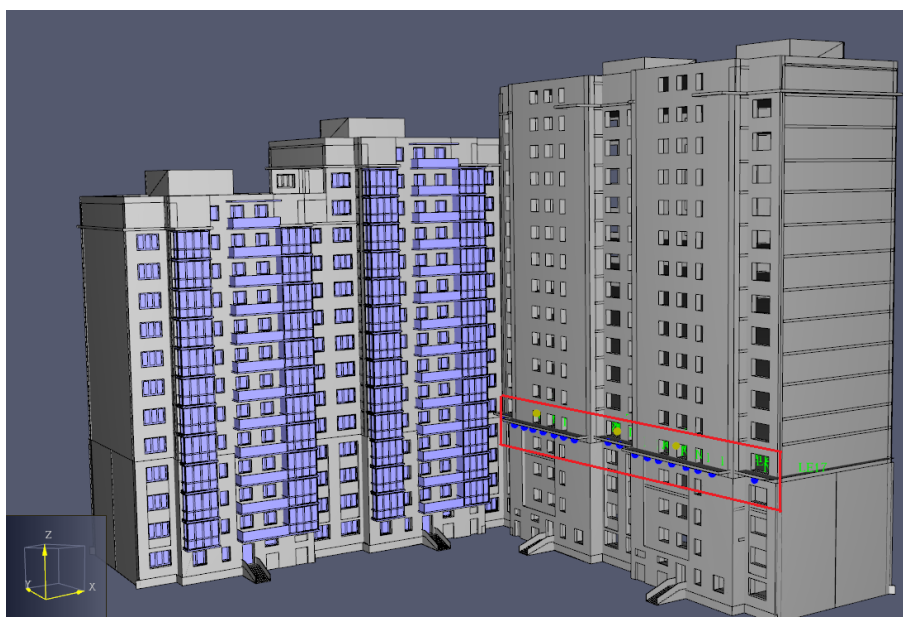


Рисунок 3.25 – модель житлового комплексу, який обладнано протипожежним карнизом з дренчерною системою водяного пожежогасіння (зону обведено червоним прямокутником)

Під час створення моделі житлового комплексу враховано теплофізичні властивості матеріалів конструкції будівлі, а саме густина, агрегатний стан, питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт поглинання та випромінювання, температура самозаймання матеріалів. За результатом проведених розрахунків отримано температурні розподіли прогріву поверхні фасаду протипожежного відсіку житлової частини будинку, який знаходиться на відсіком де відбулася пожежа за умови активації дренчерної системи яка

інтегрована в протипожежний карниз та без неї. На рис. 3.26 наведено теплові розподіли по фасаді будинку за першим сценарієм пожежі.

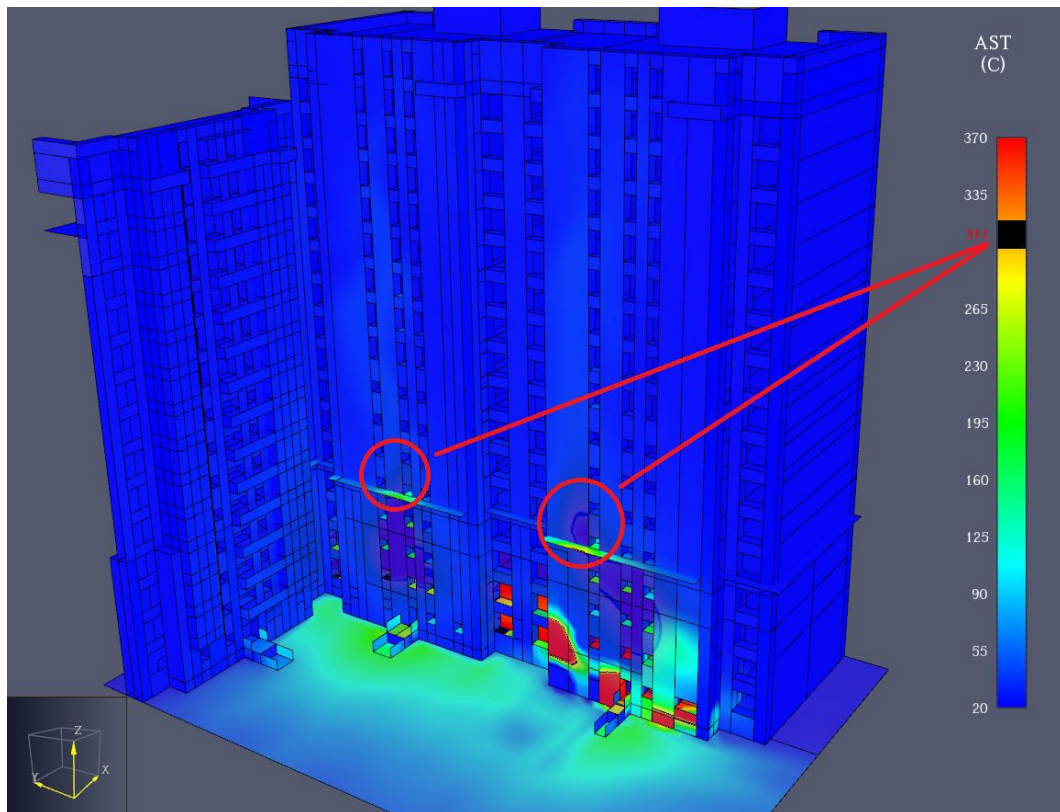


Рисунок 3.26 – Візуалізація теплових розподілів на фасаді верхнього протипожежного відсіку захищеного протипожежним карнизом

За результатом аналізу результатів моделювання за першим етапом досліджень встановлено, що за даних умов моделювання та для даного типу конструктивного виконання будівлі діапазон температурних значень на поверхні фасаду вище розташованого протипожежного відсіку над поверхами пожежі нижнього протипожежного відсіку в середньому становить в діапазоні 290-330 °С.

На рис. 3.27 наведено результати другого етапу моделювання та візуалізація температурних розподілів по фасаді будинку, який обладнаний фасадною протипожежною перешкодою активного типу, а саме протипожежним карнизом з дренчерними зрошувачами.



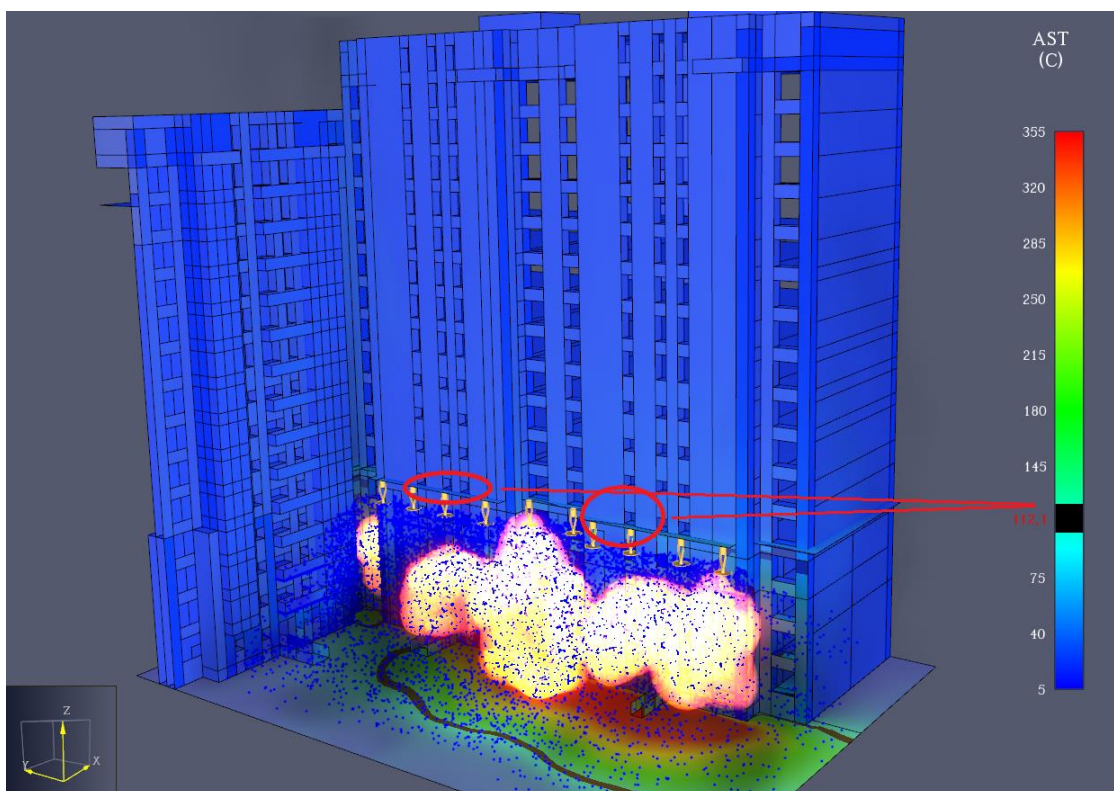


Рисунок 3.27 – Візуалізація теплових розподілів на фасаді верхнього протипожежного відсіку захищеного протипожежним карнизом з дренчерними зрошувачами

За результатом аналізу результатів моделювання за другим етапом досліджень встановлено, що за даних умов моделювання та для даного типу конструктивного виконання будівлі та фасадної протипожежної перешкоди діапазон температурних значень на поверхні фасаду вище розташованого протипожежного відсіку над поверхами пожежі нижнього протипожежного відсіку в середньому становить в діапазоні 90-120 °С. Тобто, фасадна протипожежна перешкода активного типу (обладнана системою дренчерного пожежогасіння) значно впливає на процеси поширення пожежі на вище розташовані поверхи, а також знижує ймовірність прогріву облицювальних матеріалів фасаду та елементів конструкції фасадної системи до критичних значень, що може запобігти її руйнуванню.

### 3.5 Висновки за розділом 3

За результатом проведених досліджень та валідації запропонованих обчислювальних гідродинамічних моделей тепломасопереносу для різних сценаріїв пожежі та розрахункових параметрів моделювання можна зробити наступні висновки:

1. За результатами здійсненого моделювання процесів поширення пожежі підтверджено можливість реалізації дослідження запропонованих сценаріїв фасадних пожеж за допомогою гідро-динамічних комп'ютерних моделей, які забезпечують досить точні прогнози щодо характеру поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям з врахуванням застосування активних та пасивних фасадних протипожежних перешкод.

2. Встановлено, що вразі займання зовнішніх інженерних установок (зовнішніх кондиціонерних блоків) питоме тепловиділення пожежі яких становить від  $230 \text{ кВт/м}^2$  забезпечується вертикальний прогрів поверхні негорючого фасаду виконаного із бетону в межах  $250\text{--}265 \text{ }^\circ\text{C}$  шириною від 1,2 м до 1,7 м та на висоту  $7,8\text{--}8,1$  м, що є критичним з точки зору можливості займання вище розташованих інших кондиціонерних блоків або руйнування конструкції вікон. Потенційний вплив на фасадні системи від можливої пожежі може змінюватися в залежності від типів зовнішніх кондиціонерних блоків та кількості пожежного навантаження, яке вони включають.

3. Визначено, що наявність протипожежного карнизу може забезпечувати зниження температури на рівні вище розташованого поверху над поверхом пожежі в межах на 45-50%. При цьому, необтічна форма протипожежного карнизу може збільшити площу температурного розподілу прогріву по конструкції поверхні фасаду на 30-35 % через прямий контакт турбулентного теплового потоку від пожежі з перешкодою необтікаючої форми.

4. Встановлено, що ширина та форма протипожежного карнизу є параметрами, які впливають на ефективність обмеження поширення пожежі

по зовнішнім огорожувальним конструкціям, проте отримані залежності є нелінійними та не прямо пропорційними.

5. Встановлено, що поширення пожежі для будинку з пожежним навантаженням в середині приміщень до  $350 \text{ кВт/м}^2$  при наявності внутрішнього замкнутого двору на протилежно розташований фасад є малоймовірним при забезпеченні протипожежної відстані між протилежно розташованими фасадами не менше 4 м.

6. Встановлено, що при пожежі в будинку з пожежним навантаженням в середині приміщень до  $350 \text{ кВт/м}^2$  та обладнанні його активною водяною системою дренчерного пожежогасіння, яка інтегрована в протипожежний карниз забезпечує температурні розподіли на поверхні фасаду вище розташованого поверху в межах  $90\text{-}110 \text{ }^\circ\text{C}$ , що на 2,5-3,0 рази менше ніж при застосування протипожежного карнизу без водяної системи дренчерного пожежогасіння.

7. Доведена ефективність гідродинамічних комп'ютерних моделей для дослідження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям або оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження, що дозволяє врахувати основні чинники, які впливають на дані процеси, та має значний економічний ефект, що доводить перспективи їх застосування.

## **РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ПО ЗОВНІШНІМ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМ КОНСТРУКЦІЯМ**

На основі аналізу переваг та недоліків існуючих методів оцінювання поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям, а також систематизації типів фасадних систем будівель та заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі по ним розроблено програму експериментальних досліджень запобігання поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям. В основу методики покладено дослідження процесів теплообміну при змінних параметрів полум'я, яке поширюється з отвору у зовнішній огороджувальній конструкції.

### **4.1 Обґрунтування характеристик та конструктивних параметрів випробувальної установки**

На основі аналізу існуючих методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення по фасадам будівель, визначено основні конструктивні характеристики, яким повинна відповідати установка з врахуванням недоліків методик описаних в розділі 1. Розроблюване обладнання для проведення натурних вогневих досліджень, а саме установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель повинна мати наступні удосконалені характеристики [170]:

- мати рамно-каркасну основу для можливості монтажу фасадних систем різних типів та способів конструктивного виконання;
- досліджуваний фрагмент фасадної системи повинен мати змогу змінювати кут площини фасаду відносно вертикалі для імітації кутів ухилу фасадів будівель;

- установка повинна включати бокову рухоми площину, що прилягає до основної частини фасадної системи з можливістю зміни кута прилягання для імітації кутових фасадів. Зазначена прилегла площина повинна змінювати кут прилягання від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

- установка повинна включати можливість кріплення протипожежних карнизів для обмеження поширення пожежі;

- установка повинна включати можливість відтворення реальних параметрів міжповерхових віконних простінків (як мінімальну так і максимальну нормативну відстань) згідно з вимогами діючих будівельних норм.

Слід відзначити, що на сьогоднішній день відповідно до вимог [21,22], висота житлових або громадських приміщень повинна складати не менше 2,7 м від чистого рівня підлоги до рівня нижньої відмітки міжповерхового перекриття. Вимоги ряду Європейських будівельних вимог, а саме [171,172] визначають, що мінімальна висота житлових приміщень повинна складати не менше 2,75 м. Як виключення, допускається зменшувати висоту приміщень до 2,4 м, за умови обладнання приміщень стаціонарними системами кондиціонування. Максимальні висоти приміщень житлового та громадського призначення фактично не обмежені, проте слід розуміти економічні аспекти, що стримують забудовників від збільшення висоти поверхів у будівлях. Окрім того, збільшення висоти поверхів збільшує відстань між нижніми та верхніми краями їх вікон, а відповідно може позитивно впливати на обмеження швидкості поширення фасадних пожеж. Таким чином, під час створення випробувальної установки слід обґрунтувати мінімально допустимі відстані між вікнами поверхів, як один із критеріїв, який впливає на швидкість поширення пожежі по зовнішнім фасадам будівель. Відповідно до [173] мінімальні розміри вікон не повинні становити менше 1470 мм в ширину та 1460 мм у висоту. На рис. 4.1 наведено мінімальні параметри вікон.

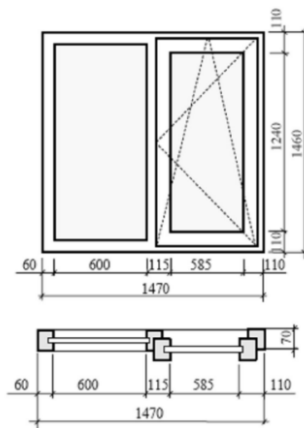


Рисунок 4.1 – Мінімальні геометричні розміри вікна для будівель житлового та громадського призначення

Тобто, з врахуванням товщини міжповерхового перекриття значення висоти міжповерхових віконних простінок має становити не більше 1440 мм. Разом із тим, слід розуміти, що на сьогоднішній день мають місце скляні світлопрозорі фасади із прорізами у зовнішніх стінах, які фактично не мають міжповерхових віконних простінок, а конструкція вікна виконує роль не несучої зовнішньої стіни, яка лише обмежує простір приміщення. Таким чином, під час створення установки слід забезпечити максимальну відстань між верхнім краєм вікна приміщення де відтворюється пожежа та вікном поверху, що розташовано над ним в межах 1400-1500 мм. На рис. 4.2 наведено принципову схему описаного параметру з максимальними та мінімальними геометричними розмірами.



Рисунок 4.2 – Схематичні приклади поверхових міжповерхових віконних простінків, де: а – максимальне значення висоти простінку, б – мінімальні значення висоти простінку виконаного для світлопрозорих фасадних систем

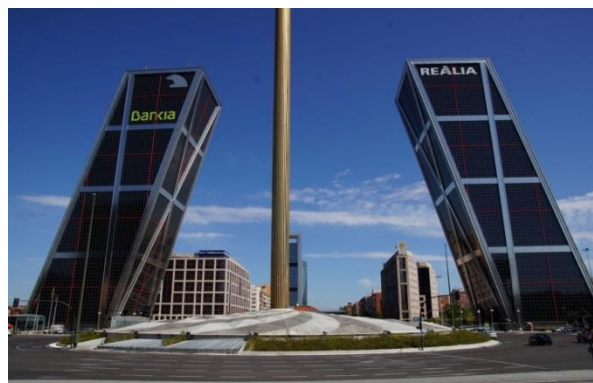
Аналіз існуючих методів оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі не передбачає наявність можливих ухилів у фрагментах фасаду, або взагалі не враховує можливість виконання всієї фасадної системи під кутом відносно вертикальної площини. Разом із тим, сучасна архітектура поєднує в собі широкий діапазон нових стилів та форм фасадних систем. Аналіз найбільш незвичайних сучасних будівель показує, що кути ухилу площини фасаду становлять в межах 15-20 градусів, а для більш поширених типових проектів будівель торгово-розважальних центрів або офісних будівель становить в межах 5-8°, як для Європи, США та Азії так і для України.

Як приклад, відомий Падаючий хмарочос (Capital Gate) в Абу-Дабі (ОАЕ) має кут нахилу будівлі 18 градусів. Для порівняння: кут нахилу Пізанської вежі дорівнює всього 4 градусам, тобто фактично у 4,5 рази менше [174]. Будівлі офісних хмарочосів висотою 114 метрів відомі під назвою «Ворота Європи» (Puerta de Europa) розташованих на в Мадриді (Іспанія) мають ухил в 14,3 градусів [175]. Штаб квартира центрального телебачення Китаю із висотою будівлі 234 м має максимальне значення ухилу фасаду відносно вертикалі 6 градусів [176], а відомий Bella Sky Hotel, який розташований в Копенгагені (Данія), має максимальний ухил фасаду 15 градусів.

Тобто, ухил фасаду будинку не є виключенням серед різноманітних існуючих форм фасадів та може мати важливе значення для зовнішнього вигляду будівлі, а також функціональності. Зовнішні огорожувальні конструкції фасаду з ухилом можуть забезпечити кращу інсоляцію, забезпечуючи більше природного світла у будівлі [177]. На рис. 4.3 наведено зовнішній вигляд описаних унікальних будівель, що мають максимальні кути ухилу фасадних систем.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.3 – Приклади будівель офісних, які мають ухил площини фасаду, де: а – будівля «Падаючий хмарочос»; б - будівля «Ворота Європи»; в – будівля штаб квартира центрального телебачення Китаю; г - будівля «Bella Sky Hotel»

Таким чином, під час створення конструкції установки слід забезпечити можливість зміни ухилу площини фасаду, для можливості відтворення реальних параметрів фасадних систем будівель в межах  $\pm 20^\circ$ . Враховуючи, що на сьогоднішній день відсутні дані щодо температурних розподілів від пожежі для фасадів із різним кутом ухилу площини, під час створення установки доцільно забезпечити його ухил в межах від  $70^\circ$  до  $110^\circ$  відносно вертикалі. Серед однієї із особливих конструктивних характеристик для окремих існуючих установок в рамках діючих методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем є наявність прилеглої фасадної площини під кутом  $90^\circ$ . Ширина прилеглої площини для



середньомасштабних методик, зокрема методики [61], становить 600 мм, а для повномасштабних методик, зокрема BS 8414, DIN 4102-20, ÖNORM B 3800-5 в межах 1200-1800 мм. Враховуючи середньомасштабні розміри установки, доцільно прийняти ширину прилеглої площини 600 мм. Слід враховувати, що приведені вище методи випробувань мають дані теплових розподілів по досліджуваним фасадам тільки для прямого кута прилеглої площини.

У практиці багатоповерхового будівництва найпоширеніші будинки за розташуванням в плані секцій можуть бути рядовими, торцевими, поворотними й кутовими. Поворотні секції можуть мати різну форму: Г-подібну, Т-подібну, хрестоподібне, Z-подібну й ускладнену [178-180].

Блокування різних типів секцій створює можливість проектувати різноманітні за формою фасадів будинки, планувальне рішення яких дозволяє одержати різноманітне планування квартир з покращеними умовами інсоляції. Планувальна структура секцій з ускладненим периметром має низку функціональних переваг і дозволяє більш повно здійснювати архітектурні задуми. З практичної точки зору, більш складний план секції дає можливість, не подовжуючи комунікацій в середині секції, збільшити кількість квартир, що поліпшує техніко-економічні показники будівлі в цілому. Тобто, існує безліч різних форм будівель, і вони можуть бути класифіковані за різними критеріями, такими як геометрична структура, функціональне призначення, стиль архітектури та інші показники. Для односекційних будинків характерним є застосування різноманітних планувальних схем: у формі трилисника, квадрата, хреста, трикутника, кола й більш складних форм. На рис. 4.4 наведено типові форми односекційних багатоповерхових будинків зі складною формою фасаду.

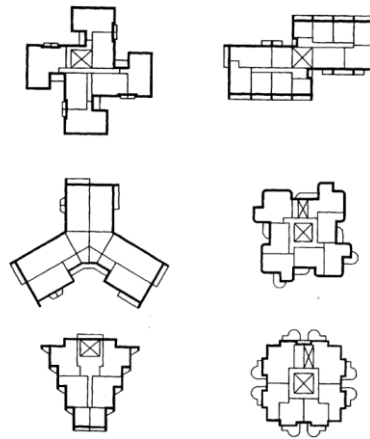


Рисунок 4.4 – Приклади типових складних форм фасадів односекційних будівель

Серед багатосекційних будівель, характерним є наявність непрямих кутів повороту примикання секцій, в тому числі зі спеціальними вставками, що наведено на планах на рис. 4.5.

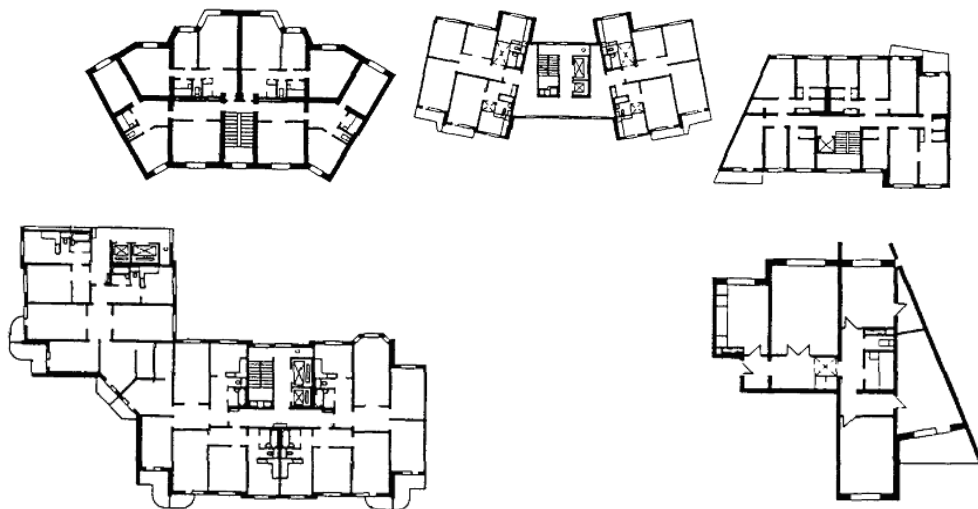


Рисунок 4.5 - Приклади блокування багатосекційних будівель під різними кутами прилягання суміжних фасадів секцій

На сьогоднішній день існуючі підходи щодо оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення по фасадам будівель не враховують особливості складних форм компонування секцій та можливість їх суміжного прилягання під різними кутами.

Таким чином, конструкція новоствореної установки повинна забезпечити можливість дослідження зміни залежностей теплових розподілів по фасаду в залежності від кута прилягання суміжної площини фасадів. Отримані дані дозволять створити передумови для комплексної оцінки пожежної небезпеки фасадів різних типів та форм та дозволить спрогнозувати необхідні параметри заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі [170].

Враховуючи вищевикладене, на основі аналізу недоліків існуючих методик оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та заходів щодо обмеження поширення пожежі, визначено основні конструктивні характеристики, яким повинна відповідати удосконалена випробувальна установка. Серед удосконалених характеристик слід забезпечити універсальну рамно-каркасну основу установки для можливості монтажу фасадних систем різних типів, а також забезпечити можливість змінювати кути площини фасаду відносно вертикалі та горизонталі для імітації різноманітних форм будівель. Установка повинна включати можливість кріплення протипожежних карнизів для обмеження поширення пожежі та включати можливість відтворення реальних параметрів міжповерхових віконних простінків (як мінімальну так і максимальну нормативну відстань) між поверхами будівлі.

#### **4.2 Програма експериментальних досліджень з оцінки обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на зовнішні огорожувальні конструкції**

*Обладнання для експериментальних досліджень.* Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: установку для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель та дослідження закономірностей зміни температур на поверхні вертикальних будівельних конструкцій, модельне вогнище пожежі класу В, фрагмент досліджуваної

конструкції фасадної системи, змінні протипожежні карнизи різних типів за конструктивним виконанням, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

Дана методика може застосовуватись для експериментальних досліджень оцінки ефективності конструктивних параметрів будівельних конструкцій щодо обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на фасадні систем, які виконані із негорючих матеріалів [1].

*Модельне вогнище пожежі класу В.* Під час досліджень, в якості модельного вогнища, яке встановлено в об'ємі вогневої камери установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель на поверхні вертикальних будівельних конструкцій використовують модельне вогнище пожежі класу В [2], що представляє собою металеве деко модельне вогнище пожежі класу 34В з діаметром  $1170 \pm 10$  мм, висотою борта  $230 \pm 5$  мм та товщиною стінки борта  $2,0 \pm 0,5$  мм, у яке заливають 60 л дизельного палива або синтетичного мастила для трансформаторів. Допускається застосовувати інший альтернативний рідкий вид палива у кількості, яка забезпечує горіння в даному типі дека у продовж 30 хвилин із робочим діапазоном температури в межах  $700-1200^{\circ}\text{C}$ . Значення теплового потоку модельного вогнища, що буде потрапляти на одиницю площі поверхні складатиме не менше  $140 \text{ кВт/м}^2$  згідно розрахунків за [181]. Під час проведення випробувань модельне вогнище пожежі має створювати сталий температурний режим пожежі в межах  $800^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 50^{\circ}\text{C}$ ) не менше ніж у продовж 1200 секунд із загальних 1800 секунд випробувань, що контролюється термопарою, яка розміщена у вогневій камері [182].

*Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель.* Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель є сталеву збірно-каркасною конструкцію, яка дозволяє влаштувати фрагмент зовнішньої не несучої огорожувальної конструкції поверху будинку виконаної із негорючих матеріалів, загальною висотою 2000 мм та шириною 2300 мм включаючи прилеглу кутову площину. Установка включає вогневу

камеру для встановлення модельного вогнища пожежі розміром  $1800 \times 1350 \times 800$  мм (ширина, глибина, висота), рухому основну раму висотою 2000 мм та шириною 1800 мм для кріплення фрагменту фасадної системи, а також прилеглу кутову раму розмірами  $500 \times 2000$  мм, яка може змінювати кут прилягання до основної частини для імітації куткових фасадів. Кут площини встановлення основної рами фіксується за допомогою регулюючої опірної планки та фіксуючих гвинтів, що дозволяє змінювати кут основної та кутової площин рам від  $70^\circ$  до  $110^\circ$  відносно вертикалі. На рис. 4.6 наведено зовнішній вигляд установки у фронтальній та профільних площинах.

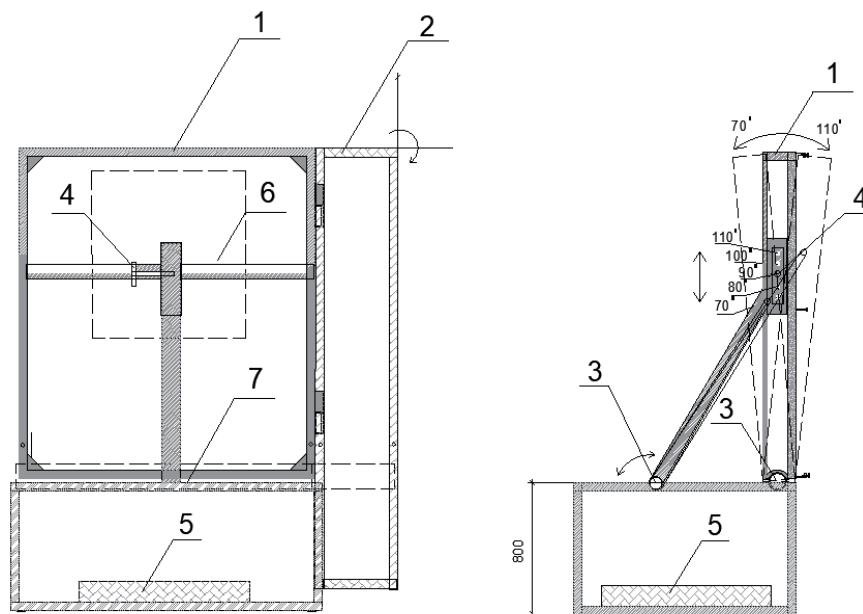


Рисунок 4.6 - Габаритні розміри установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель де: 1 – основна рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 2 – кутова рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 3 - шарнір для регулювання кута встановлення площини фрагменту фасадної системи; 4 – фіксуючий гвинт; 5 – металеве деко модельного вогнища класу 34 В; 6 – орієнтовна зона влаштування віконного прорізу; 7 – зона влаштування протипожежного карнизу.

На рис. 4.7 наведено загальне аксонометричне зображення дослідної установки.

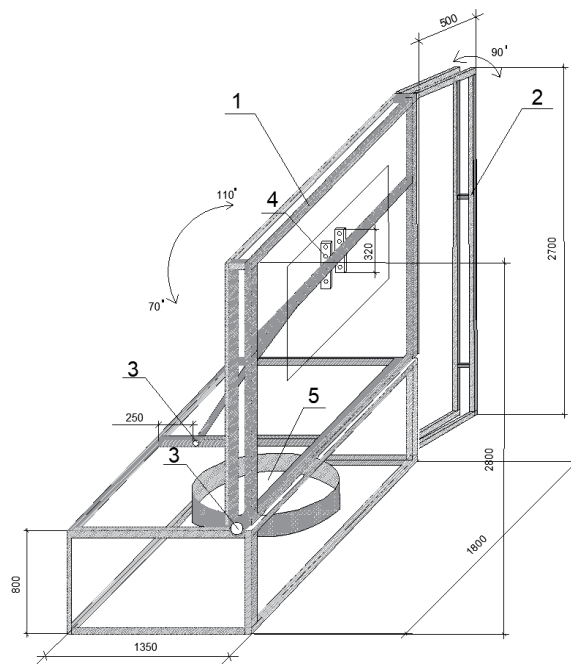


Рисунок 4.7 - Загальне аксонометричне зображення установки де: 1 – основна рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 2 – кутова прилегла рама для кріплення фрагменту фасадної системи; 3 - шарнір для регулювання кута встановлення площини фрагменту фасадної системи; 4 - фіксуючий гвинт; 5 - металеве деко модельного вогнища класу 34В; 6 – орієнтовна зона влаштування віконного прорізу; зона влаштування протипожежного карнизу.

Простір вогневої камери з геометричними розмірами  $800 \times 1350 \times 1800$  мм (висота, глибина, ширина) закривається негорючою термостійкою конструкцією з трьох сторін, залишаючи отвір для поширення полум'я на досліджувану фасадну систему. Вогнева камера повинна забезпечувати свою цілісність у продовж 30 хв.

Досліджуваний фрагмент фасадної системи має загальні розміри  $2300 \times 2000$  мм (ширина, висота) є змінним елементом установки, який виготовляється в залежності від типу фасадної системи та фіксується на рамі за допомогою кріпильного приладдя (гвинтів кріплення, скоб, фіксуючих пластин тощо). Фрагмент фасадної системи, як приклад, може бути виконаний із газобетону, цегли або скляним модулем, що імітує різні типи

фасадних систем виконаних з негорючих матеріалів, а саме: сухий фасад, мокрий фасад, поліфасад, світлопрозорий фасад. Для типів дослідних зразків фасадів, а саме сухий фасад, мокрий фасад, поліфасад - фрагмент фасадної системи включає світловий проріз (вікно) що влаштовується на певній відстані від вогневої камери.

Під час влаштування вікна дотримуються принципу відтворення реальних параметрів міжповерхових віконних простінків та ширини найбільшого віконного світлового прорізу відповідно до проекту досліджуваного фасаду. В разі, якщо ширина вікна перевищує загальну ширину установки, ширина вікна приймається на всю ширину установки, а саме 2300 мм включаючи прилеглу площину.

Відстань від верхнього краю отвору вогневого боксу до нижнього краю вікна визначається на основі реальної відстані між краями вікон розташованих один над одним на різних поверхах відтвореного фасаду, який проходить оцінювання.

По периметру вікон допускається влаштування віконної рами без влаштування скло пакету або склопакет із вікном, що забезпечує відкривання не менше ніж на 50% від загальної площі скління. Конструкція вікна (рама, ущільнювач склопакету) може виконувати роль одного із індикаторних елементів, на основі руйнування яких робиться заключення про забезпечення обмеження поширення пожежі.

Для дослідження закономірностей зміни температур для світлопрозорих фасадних систем можуть використовуватися скляні модулі прозорого двухкамерного склопакету з розміром, який відповідає реальним параметрам відтвореного фасаду.

На рис. 4.8 наведено приклад фрагменту фасадної системи виконаної із цегли (сухий фасад).

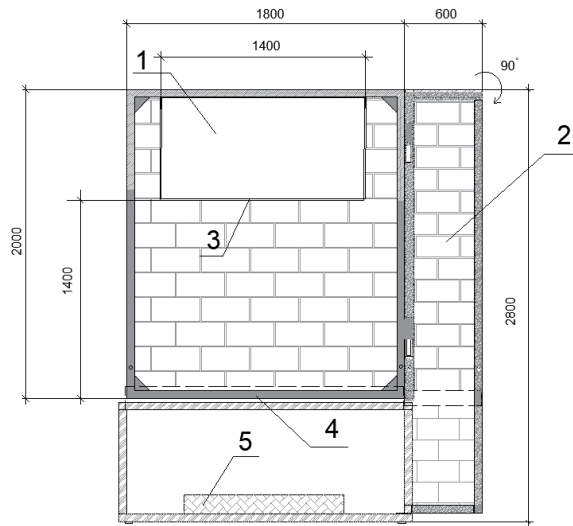


Рисунок 4.8 - Приклад фрагменту фасадної системи, де: 1 – віконний проріз; 2 – кутова прилегла частина фасаду; 3 – верхній край віконного простінку; 4 – зона влаштування протипожежного карнизу; 5 – деко модельного вогнища пожежі класу 34В

*Протипожежні карнизи.* Під час проведення досліджень з визначення ефективності обмеження поширення пожежі за допомогою протипожежних карнизів, на фрагмент фасадної системи на рівні 0,15 м від нижнього краю вогневої камери кріпиться фасадна протипожежна перешкода відповідного типу, яка досліджується. На рис. 4.9 наведено основні типи протипожежних карнизів, які виконують функцію фасадних протипожежних перешкод та їх габаритні розміри відносно вимог [14, 26].

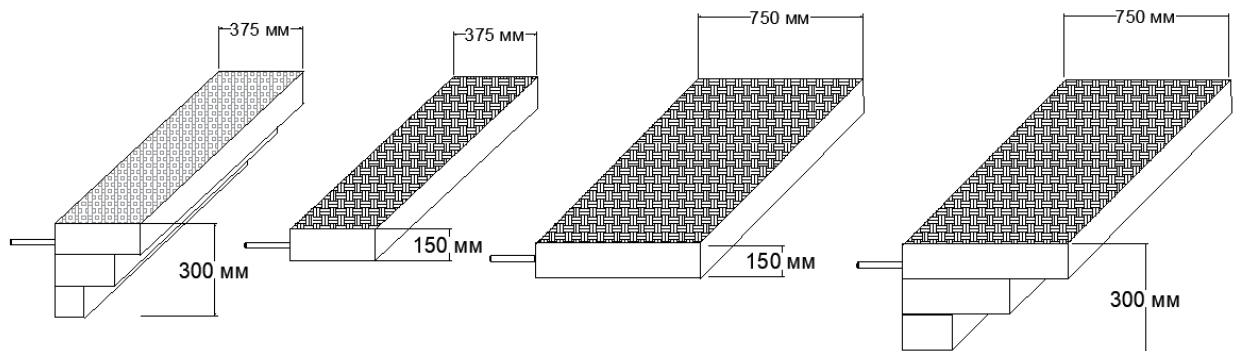


Рисунок 4.9 - Зовнішній вигляд та габарити типових прикладів протипожежного карнизу



Протипожежний карниз, який виконує функцію фасадних протипожежних перешкод виконується з цегляних піноблоків, магнезійної плити або іншого мінерального негорючого матеріалу, який повинен забезпечувати цілісність карнизу протягом всієї тривалості випробувань.

Для вимірювання температури на поверхні фрагменту фасадної системи на відстані від площини в межах 1÷2 мм встановлюються термопари, на рівнях від краю вогневої камери 400 мм, 800 мм, 1400 мм на фасаді, що забезпечить визначення найбільш точних даних температурного режиму біля поверхні досліджуваного зразка фрагменту фасадної системи. На основі даних від термопар, що фіксують температурний режим будуються графіки температурних залежностей. Також температура фіксується на рівні верхнього краю вогневої камери та на рівні нижнього краю вікна досліджуваного фрагменту фасаду. Значення рівня встановлення термопар на краю вікна є змінним параметром в залежності від досліджуваної відстані від верхнього краю отвору вогневого боксу до нижнього краю вікна (розміру міжповерхового віконного простінку).

Схема улаштування термопар по відношенню до віконного прорізу фрагменту фасадної системи наведена на рис. 4.10.

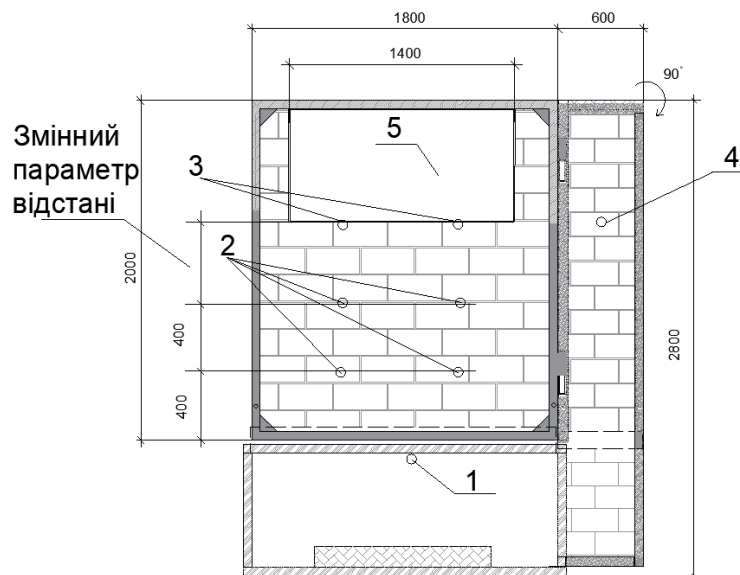


Рисунок 4.10 - Схема улаштування термопар на площині досліджуваного зразка фрагменту фасадної системи, де: 1 – термопара, що

контролює температурний режим на верхньому краю вогневої камери;  
 2 – термопари, що контролюють температурний режим на відстані 400 та 800 мм від краю вогневої камери; 3 – термопари, що контролюють температурний режим на рівні нижнього краю світлового прорізу (вікна);  
 4 - термопара, що контролює температурний режим на поверхні кутової прилеглої площини; 5 – світловий проріз.

*Засоби вимірювальної техніки.* Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час експериментальних досліджень, а також їх технічні характеристики приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Перелік засобів та вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування і тип ЗВТ	Характеристика	Діапазон вимірювання	Клас точності, похибка ЗВТ
1.	Рулетка	лінійні розміри	від 0 до 5000 мм	2 клас точності, $\Delta = \pm 1$ мм
2.	Термопара	температура	від 0 до 1200 °С, від 0 до 333 °С, від 334 °С до 1200 °С	$\Delta = \pm 2,5$ °С, $\Delta = \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}}$
3.	Секундомір	тривалість часу	від 0 до 60 с, від 60 с до 3600 с	2 клас точності, $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с, $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$
4.	Інформаційно-вимірювальна система	температура	від 0 до 1200 °С	$\Delta = \pm 0,6$ %
5.	Термогігрометр	температура; вологість	від 0 до 50 °С, від 2% до 98%	$\Delta = \pm 0,5$ °С, $\Delta = \pm 3$ %
6.	Барометр-анероїд	атмосферний тиск	від 600 мм.рт.ст. до 800 мм.рт.ст.	$\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.,
7.	Мірна ємність	об'єм	від 0 до 10 дм <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 0,05$ дм <sup>3</sup>
8.	Анемометр	швидкості потоку повітря	від 0,3 м/с до 5 м/с	$\Delta = \pm 1$ м/с
9.	Набір кутових мір	кут	Діапазон вимірювання 10°; 15°; 30°; 45°; 90°	$\Delta = \pm 30''$

Для проведення експериментальних досліджень допускається використання інших ЗВТ з негіршими метрологічними характеристиками ніж ті, які наведено в таблиці 4.1.

В якості допоміжного засобу вимірювальної техніки для вимірювання температури на поверхні зразку досліджуваного фрагменту фасаду також допускається використання тепловізора [183-185].

*Вимоги до проведення досліджень.* Монтаж зовнішньої огорожувальної конструкції на Установку здійснюються у відповідності до нормативно правових актів, технічних умов заводів-виробників, технічних описів та технічних інструкцій з монтажу.

Дослідження у вогневому боксі проводяться не менше трьох разів для кожного типу фрагменту фасадної системи.

*Підготовка до проведення досліджень:*

1. Перевіряється цілісність та геометричні параметри випробувального зразку фрагменту фасадної системи.

2. У випробувальному боксі встановлюється установка.

3. Установлюються засоби вимірювальної техніки, а саме термопари, згідно із схемою наведеною на рисунку 5 та влаштовується тепловізор на штатив на відстані 5 м від установки таким чином, щоб уникнути можливості його падіння.

4. Термопари з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою, для вимірювання значення температури і перевіряється їх працездатність.

5. Готується обладнання для проведення фото- та відео зйомок та встановлюється з навпроти установки.

6. Влаштовується протипожежний карниз відповідного досліджуваного типу.

7. Виставляються кути площин установки відносно вертикальної площини.

8. Влаштовується модельне вогнище пожежі класу 34В у вогневій камері.

9. Готуються первинні засоби пожежогасіння та перевіряється цілісність захистного одягу особи, що проводить вогневі роботи.

*Послідовність проведення досліджень:*

1. Проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, відносної вологості повітря, значення атмосферного тиску.

2. Монтується фрагмент фасадної системи, яка досліджується.

3. Після фіксації фрагменту фасадної системи на рамі за допомогою фіксуючих гвинтів слід закріпити кріплення шарніру, що регулює кут встановлення площини фрагменту фасадної системи в межах від  $70^\circ$  до  $110^\circ$  відносно вертикалі за допомогою лазерного кутоміра.

4. За необхідності на установку влаштовується протипожежний карниз досліджуваного типу, який фіксується за допомогою фіксуючих гвинтів. В разі застосуванні активного протипожежного карнизу, він підключається до системи подавання водної вогнегасної речовини.

5. Проводиться контрольне вимірювання і реєстрація початкових значень температур за показниками усіх термопар.

6. Вмикається запис процесу вимірювання температури інформаційно-вимірювальною системою та тепловізором;

7. Вмикається обладнання для проведення фото- та відео зйомок.

Обладнання для проведення фото- та відео зйомок встановлюється навпроти установки. На рис. 4.11 наведено схему розміщення вимірювальної техніки (вид зверху).

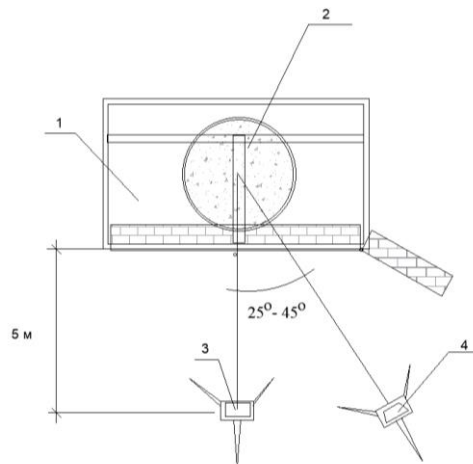


Рисунок 4.11 - Схема розміщення вимірювальної техніки, де: 1 - установка для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель; 2-

металеве деко модельного вогнища класу 34В; 3 – тепловізор; 4 – камера для фото-відео фіксації.

8. Деко модельного вогнища заповнюється паливом.

9. За командою керівника проведення досліджень, паливо в деці підпалюють факелом та одночасно вмикають секундомір. Наявність даного об'єму палива забезпечує час його горіння не менше 1800 секунд, що контролюється секундоміром. Дослідження тривають до повного вигорання пального у модельному вогнищі пожежі класу 34В.

10. Реєстрація температури проводиться з інтервалом не більше, ніж 10 сек. За результатами досліджень для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначають температуру  $t$  поверхні дослідного зразка фрагменту фасадної системи. Також проводиться фотофіксація характеру поширення полум'я по досліджуваному фрагменту фасаду.

11. В разі дослідження ефективності активного протипожежного карнизу обладнаного дренчерною водяною системою пожежогасіння, систему слід активувати через 10 хвилин після початку горіння модельного вогнища пожежі.

12. По закінченню вільного горіння модельного вогнища за командою керівника проведення досліджень захисним щитом або кошмою накривається модельне вогнище пожежі. В разі застосування активної фасадної протипожежної перешкоди її активація припиняється. Зберігаються отримані дані на засобах вимірювальної техніки та відеоапаратурі.

13. Експериментальні дані заносяться до протоколу первинних даних.

*Оцінка результатів досліджень.* Для визначення ступеня розсіювання значень випадкової величини ( $x_i$ ) відносно її математичного сподівання ( $\bar{x}_i$ ) та мінливості вибірки обчислено середнє квадратичне відхилення результатів досліджень за формуло 4.1 [186-188]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}}. \quad (4.1)$$

Для визначення середніх відхилень значення  $i$ -го дослідження від середнього значення всіх досліджень визначено середнє абсолютне відхилення за формулою 4.1 [188]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n}. \quad (4.2)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках та з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 4.3 [188]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\%. \quad (4.3)$$

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 4.4 [188]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{s_j}. \quad (4.4)$$

За результатом розрахункових операцій значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [188], які для чотирьох досліджень відповідно становлять 1,496 та 1,481.

У графічній формі будуються залежності зміни температур на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду від тривалості теплового впливу. Умовою позитивного проведення дослідження та забезпечення обмеження пожежі при

використанні фасадних протипожежних перешкод будь якого типу є виконання одночасно наступних вимог:

- не перевищення максимального значення температури в 350 °С на рівні нижнього краю вікна у продовж всієї тривалості досліджень. В разі досліджень склопрозорого типу фасаду критичне значення температури становить 250 °С на рівні нижнього краю вікна у продовж всієї тривалості досліджень;

- у продовж усієї тривалості досліджень полум'я чи температурний вплив від пожежі не повинні призвести до руйнування будь якого фрагменту конструкції фрагменту фасадної системи чи установки.

- у продовж усієї тривалості досліджень протипожежний карниз повинен зберігати свою цілісність. Окремі дефекти на поверхні карнизу, прогин його каркасу в межах до 100 мм та тріщини цегли в межах від 100 мм до 150 мм не враховується.

За результатом проведення випробувань, заповнюється протокол результатів проведених випробувань, приклад якого наведений в табл. 4.2.





*Вимоги безпеки.* Під час проведення досліджень слід керуватись настановами [189], інструкціями ІДУ НД ЦЗ, якими встановлено вимоги з безпеки праці безпосередньо на робочому місці, іншими нормативними документами з безпеки праці.

Серед персоналу, що проводить дослідження, повинна бути присутня особа, яка відповідає за охорону праці. До проведення досліджень мають допускатися особи, які пройшли загальний інструктаж з охорони праці, ознайомились з порядком проведення досліджень, отримали інструктаж з уточненням функцій кожного учасника досліджень.

До проведення досліджень необхідно позначити попереджувальним знаком небезпечну зону на відстані не менше 10 м від вогнища пожежі класу В, в яку стороннім особам входити заборонено.

До проведення досліджень необхідно забезпечити наявність первинних засобів пожежогасіння для гасіння вогнища пожежі класу В із площею горіння 1 м<sup>2</sup>, а саме двома переносними порошковими вогнегасниками ВВ-5 [190-191].

Під час проведення досліджень оператор має бути екіпірований захисним одягом пожежника, пожежною каскою та поясом, захисними рукавицями та взуттям.

Забороняється подавати воду в осередок вогнища пожежі класу В [192-193].

### **4.3 Створення експериментальної установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель**

Під час створення експериментальної випробувальної установки для проведення досліджень з оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення по фасадам будівель (далі - Випробувальна установка) виготовлено основну несучу раму. Несуча рама установки, окрім функції опорної основи має виконувати функцію каркасу вогневої камери, де

розміщується модельне вогнище пожежі. В якості матеріалу каркасу взято сталеві газоводопровідні труби діаметром 50 мм з товщиною стінки 2,5 мм, які відповідають вимогам [194]. Вибір даного типу матеріалу для виготовлення основи випробувальної установки обумовлено високою міцністю виробу (номінальний тиск до  $160 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}^2$ ), а також стійкістю конструкції виробу до високих температурних режимів (до  $700^\circ$ ) та згинальних зусиль при відсутності динамічних навантажень. На рис. 4.12 наведено фото виготовленої основи Випробувальної установки.



Рисунок 4.12 – Фото виготовленої основи конструкції Випробувальної установки

На другому етапі створення Випробувальної установки із профільних труб з прямокутним перетином в  $60\times 40$  мм виготовлено основну та прилеглу раму для відтворення фасаду з розмірами  $1800\times 2000$  мм та  $600\times 2700$  мм відповідно. Нижня частина рами влаштовується на круглій трубі рами, що є основою установки, утворюючи затиснений шарнір, який дозволяє рухати конструкцію рами відносно вертикальної площини. Прилегла частина кутової рами для кріплення фрагменту фасадної системи встановлена на сталеві точені петлі розміром  $32\times 120$  мм з підшипником, що дозволяє змінювати кут повороту прилеглої рами від  $90^\circ$  до  $180^\circ$ .

На рис. 4.13 наведено загальний вигляд встановленої основної та прилеглої рами на основі конструкції Випробувальної установки.



Рисунок 4.13 – Загальний вигляд конструкції рами Випробувальної установки

Для забезпечення зміни кутів ухилу основної та прилеглої рами відносно вертикальної площини, а саме від  $70^\circ$  до  $110^\circ$  і відповідно забезпечення можливості їх фіксації в необхідному положенні розроблено конструкцію механізму. Принцип механізму полягає у створенні одного затисненого лінійного шарніру (шарнірно-нерухома опора), що рухається в єдиній площині та балки, що утримується у рівновазі за допомогою фіксуючих стержнів [195]. В конструкції основної рами влаштовано розподільчу пластину, що має отвори для фіксації балки у положеннях, що відповідає кутам ухилу рами фасаду в  $70^\circ$ ;  $80^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $100^\circ$  та  $110^\circ$ . Всі рухомі та фіксуючі металеві елементи мають тепловий зазор (проміжок), що враховує деформаційні процеси металу конструкції під час його нагрівання в умовах високих температурних впливів від пожежі модельного вогнища пожежі. На рис. 4.14 наведено креслення та зовнішній вигляд виготовлено механізму регулювання кута ухилу площини фасаду Випробувальної установки.

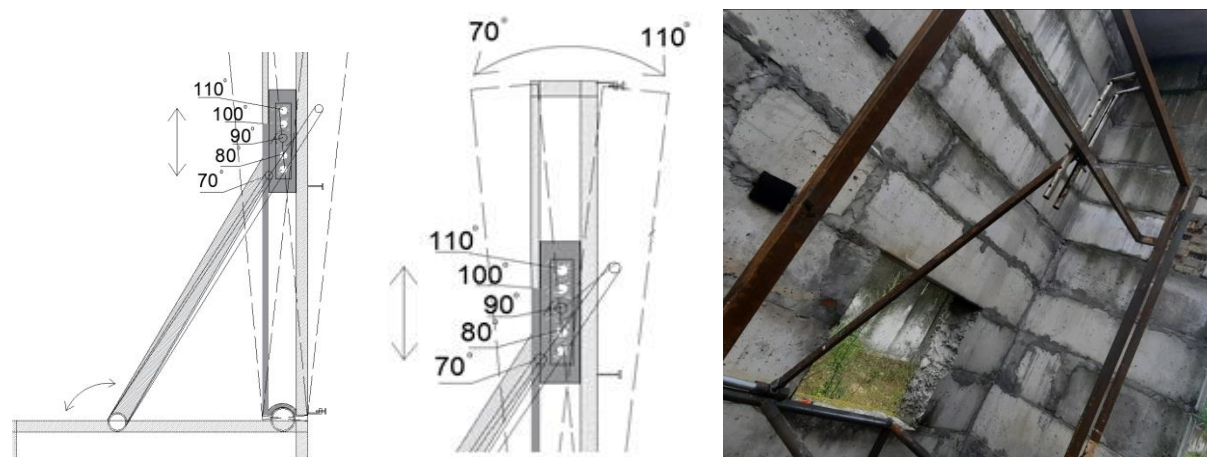


Рисунок 4.14 – Принципова схема креслень та зовнішній вигляд регулюючого механізму Випробувальної установки

Для створення вогневої камери, де розміщується модельне вогнище пожежі, та забезпечується необхідний температурний режим у продовж визначеного часу, між несучими опорами установки виконується закладання просвітів червоною повнотілою цеглою марки М-100, що відповідає вимогам [196]. В тилівій стороні вогневої камери виконано два отвори розмірами 350×50 мм для забезпечення притоку кисню та сталого горіння модельного вогнища пожежі класу В. На рис. 4.15 наведено зовнішній вигляд вогневої камери Випробувальної установки.



Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд вогневої камери Випробувальної установки

Прогнозування пожежної небезпеки фасадної системи або оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження для того чи іншого типу фасаду здійснюється на основі критерію, що фасад будівлі виконано з негорючих матеріалів. Даний критерій обґрунтований діючими вимогами норм [13;14;21;22], які висуваються до багатоповерхових будинків. Також даний критерій характерний для базового європейського методу [31]. В якості негорючого матеріалу для відтворення конструкції фасаду прийнято газоблоки марки D400, де числове значення відповідає значенню густини виробу, а саме  $400\text{кг/м}^3$  із розміром блоку  $600\times 100\text{мм}$ . Коефіцієнт теплопровідності газоблоків складає  $0,11-0,13\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  у сухому стані, водопоглинання складає  $14\%$ , теплопровідність становить в межах  $0,1 - 0,4\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Серед переваг використання газоблоків в конструкції Випробувальної установки слід відмітити, що на сьогоднішній день даний тип будівельного матеріалу широко використовується в будівництві, в тому числі під час заповнення міжкімнатних простінок та виконання зовнішніх ненесучих стін у моноліт-бетонних будинках [197].

Аналіз недоліків існуючих методи наведених в розділі 1 показав, що важливим параметром, який повинен бути змінний в межах  $300-1470\text{ мм}$ , це значення висоти міжповерхових віконних простінок між нижнім та верхнім поверхом, приклад яких в залежності від розміру вікон наведено на рисунку 4.2. Застосування газоблоків в конструкції Випробувальної установки дозволяє змінювати геометричні параметри міжповерхових віконних простінок в залежності від типу конструкції фасадної системи, оцінку пожежної небезпеки якої слід провести. На рисунку 4.16 наведено приклади зміни конструктивних параметрів міжповерхових віконних простінок під час їх влаштування у Випробувальній установці.



Рисунок 4.16 – Рівнішній вигляд варіантів виконання міжповерхових віконних простінків з різною висотою

Для забезпечення стійкості каркасу Випробувальної установки, його поверхню оброблено жаростійкою фарбою, що забезпечує захист її основних вузлів при температурі до 800 °С [198]. Дроти під'єднання терморар для фіксування температури на поверхні фасаду монтуються таким чином, щоб уникнути прямого контакту полум'я від вогню із дротами передачі сигналу. Враховуючи відсутність клейової суміші між газоблоками та необхідність забезпечення зміни висоти міжповерхового віконного простінку, або відтворення реальних параметрів вікон будівлі, кріплення газоблоків здійснено за допомогою дюбельних елементів та повздовжніх сталевих направляючих пластин. А саме, повздовжні сталеві направляючі пластини кріпляться за конструкцією рами установки та монтуються шляхом вкручення шурупів у дюбелі газоблоків, тим самим фіксуючи кожен окремий газоблок в конструкції фасадної системи Випробувальної установки. Дюбелі для фіксації газоблоків виконані зі сталі з розміром М6/13 x 65 мм. Матеріал фіксуючих дюбелів обумовлений стійкістю до температурного режиму до 1200°С, якому буде піддаватися Випробувальна установка. На рис. 4.17 наведено тилу сторону Випробувальної установки та показано кріплення газоблоків до його конструкції.



Рисунок 4.17 – тилова сторона установки зі сталевими направляючими для фіксації конструкції фасаду

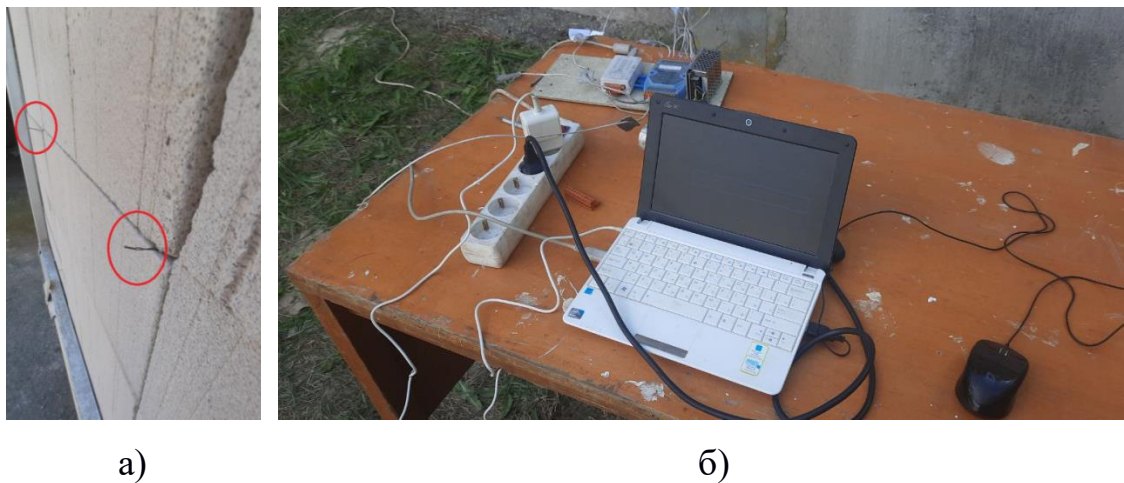
На фасадній стороні Випробувальної установки на рівні верхнього краю вогневої камери забезпечено можливість кріплення протипожежних карнизів різних типів, ширини та форми для можливості проведення оцінки з обмеження поширення пожежі по фасаді будівлі. Протипожежний карниз влаштовується на рівні верхнього краю вогневої камери та виготовляється із негорючих матеріалів, що зберігають свою цілісність при температурному режимі 800-900 °С у продовж не менше ніж 30 хв. Як приклад, для виготовлення каркасу карнизу можливо використовувати сталевий кут розміром 35×35 мм та піноблоки (цеглу). Після проведення серії випробувань в разі виявлення деформацій в конструкції протипожежного карнизу, чи його руйнування, карниз слід відновити чи замінити. Конструкція протипожежного карнизу та його геометричні параметри повинні відповідати проектній документації для досліджуваного типу фасаду.

Ширина протипожежного карнизу може бути від 300 мм до 1500 мм, що задовольняє вимоги [13;14]. На рис. 4.18 наведено зовнішній вигляд влаштованого протипожежного карнизу різної ширини та форми на Випробувальній установці.



Рисунок 4.18 - Зовнішній вигляд влаштованого протипожежного карнизу

Розміщені термопари в конструкції зразка фасаду Випробувальної установки дозволяють отримати дані щодо температурних розподілів на поверхні фасаду та дають можливість оцінювання небезпеки поширення пожежі по фасаду або оцінки ефективності заходів щодо її обмеження за допомогою натурального методу вогневих досліджень. Термопари влаштовуються відповідно до схеми, наведеної на рисунку 4.10 та підключаються до вимірювально обчислювальної системи «Термоконт». На рис. 4.19 наведено фото встановлених термопар на досліджуваному фасаді Випробувальної установки та вимірювально обчислювальну систему «Термоконт» до якої вони підключені.



а)

б)

Рисунок 4.19 - Засоби та вимірювальна техніка Випробувальної установки, де а – фото влаштованої термопари на фасаді установки; б – вимірювально-обчислювальна система «Термоконт».



За результатом проведеного аналізу існуючих методик дослідження пожежної небезпеки фасадних систем та оцінки заходів щодо обмеження поширення пожежі і прогнозування її поширення по фасадах будівель, досягнуто необхідних конструктивних характеристики, яким повиненна відповідати установка з врахуванням недоліків методик описаних в розділі 1. Серед удосконалених характеристик забезпечено універсальну рамно-каркасну основу установки для можливості монтажу фасадних систем різних типів, а також забезпечено можливість змінювати кути площини фасаду відносно вертикалі та горизонталі для імітації різноманітних форм зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель. Установка забезпечує можливість кріплення протипожежних карнизів різних типів для обмеження поширення пожежі та включає можливість відтворення реальних параметрів міжповерхових віконних простінків (як мінімальну так і максимальну нормативну відстань) між поверхами будівлі. На рис. 4.20 наведено загальний вигляд виготовленої Випробувальної установки та її конструктивні можливості трансформації для оцінки пожежної небезпеки фасадних систем та прогнозування обмеження поширення пожежі по фасадах будівель.



Рисунок 4.20 - Загальний вигляд виготовленої установки та її конструктивні можливості трансформації

Для підтвердження дотримання необхідного температурного режиму проведено серію випробувань з визначення значень температури у вогневій камері під час всієї тривалості моделювання. Під час проведення випробувань використано кругле металеве деко для модельного вогнища класу 34В діаметром  $1170 \pm 10$  мм, висотою борта  $230 \pm 5$  мм. В якості палива обрано 60 літрів синтетичного мастила типу Castrol Optigear Synthetic X320/X320 WTO, що відповідає даним [199;200]. Для даного типу та кількості палива середнє значення пожежної навантаги склало  $2290 \text{ МДж/м}^2$  згідно з [201;202], розрахункова теплота згоряння  $Q_{\text{маст}}=43 \text{ МДж/кг}$ , площа горіння  $1,1 \text{ м}^2$ . Тобто, даний тип модельного вогнища задовольняє вимоги пожежної навантаги для приміщень житлового, адміністративного та громадського призначення, що згідно з [44] становить в межах  $300\text{-}780 \text{ МДж/м}^2$ .

Для знаття показників температури на рівні верхнього краю вогневої камери розміщено термопару, яка з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт». На рис. 4.21 наведено фото випробувальної установки для проведення досліджень з виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні вертикальних будівельних конструкцій та досліджуване модельне вогнище пожежі класу В.

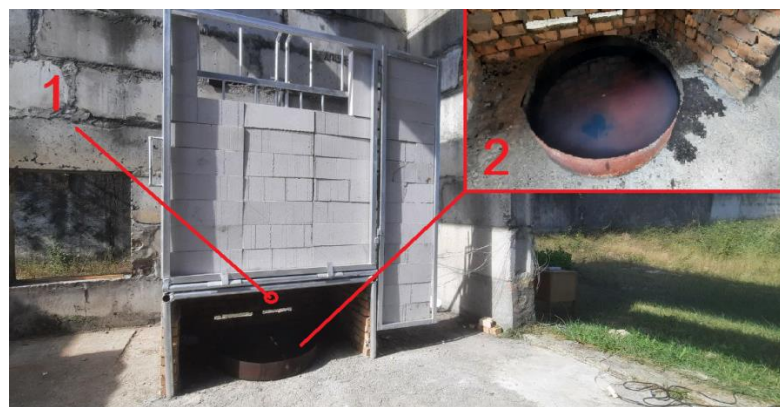


Рисунок 4.21 - Випробувальна установка для проведення досліджень з виявлення закономірностей зміни температур на зовнішній поверхні фасаду, де:

1 – зона влаштування термопар; 2 – деко вогнища пожежі класу 34В.

На першому етапі випробувань відбувалося заповнення металевого дека, що знаходиться у вогневій камері, мастилом типу Castrol Optigear Synthetic X320/X320 WTO, яке наливають у кількості 60 л ( $\pm 200$  мл). За командою керівника проведення випробувань паливо в деку підпалюють факелом та одночасно вмикають секундомір. Наявність даного об'єму рідкого палива забезпечувало тривалість його горіння не менше 1800 с. На рис. 4.22 наведено фото фрагменту проведення вогневих випробувань.



Рисунок 4.22 - Фрагмент вогневих випробувань

Дослідження передбачало проведення трьох експериментальних вогневих випробувань тривалістю не менше 30 хвилин кожне, під час яких зафіксовано отримані температурні залежності. Під час проведення натурних експериментальних досліджень було відзначено, що обраний тип модельного вогнища пожежі на базі дека модельного вогнища пожежі 34В забезпечив необхідну тривалість горіння. За результат визначення показника основної температурної кривої приймають середнє арифметичне трьох результатів

випробувань. На рис. 4.23 наведено графіки температурних кривих за результатом трьох вогневих випробувань.

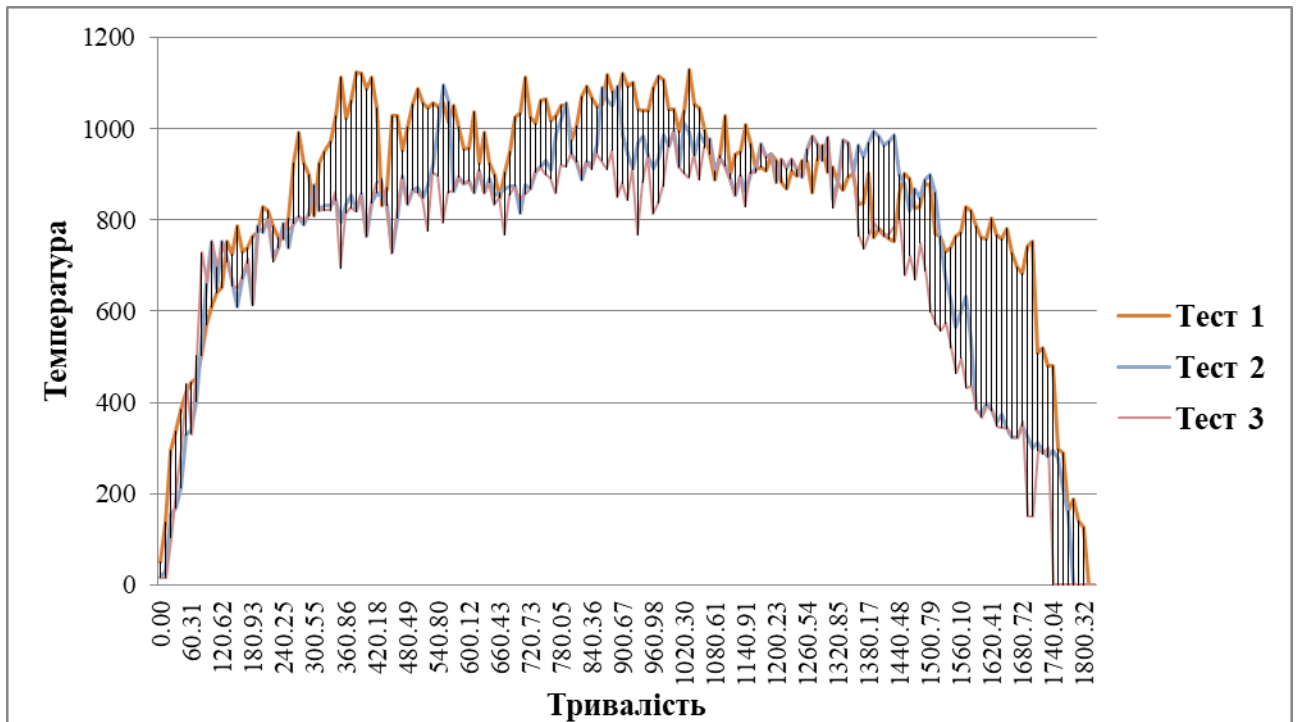


Рисунок 4.23 - Графіки температурних кривих у верхній зоні вогневої камери за результатом трьох вогневих випробувань

За результатом проведених натурних вогневих досліджень визначено, що середнє значення тривалості, коли температура не перевищує значення до 600 °C становить в межах 85-95 сек. Середнє значення тривалості, у продовж якого температура складала 600 °C та вище становила 1495 секунд, тобто умови проведення тесту за критеріями [BS 8414-1:2015; DIN 4102-20-2017; SP Fire 105] забезпечено. Окрім цього, середнє значення температури під час її виходу в межі «робочого режиму» (тобто вище 600 °C) становила 850-870 °C що може свідчити про більш жорсткіші умови випробувань у порівнянні із методиками [29;31;35] та температурного режиму згідно з [44].

Таким чином, на основі аналітичних досліджень існуючих методик та проведених натурних випробувань підтверджено характеристики вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup>, в якому у якості палива використовують 60 л дизельного палива або синтетичного мастила,

яке доцільно застосовувати в експериментальній установці з оцінки поширення пожежі по фасадам будівель [203].

Узагальнення параметрів та критеріїв існуючих методик, а також виявлення їх недоліків під час проведення оцінки забезпечення обмеження поширення пожежі по фасадним системам дозволило створити нову Випробувальну установку. Новостворена установка дозволить проводити оцінювання та прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель та здійснювати оцінку ефективності заходів щодо її обмеження для різних типів фасадних систем будівель.

Результати роботи втілено в розробку одного патенту України на корисну модель [204], що наведено в додатку Г.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

Результати проведених досліджень у цьому розділі дозволяють зробити наступні висновки:

1. Розроблено установку для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель, яка дозволяє повноцінно відтворювати конструктивні параметри фрагменту фасадної системи та температурний режим наближений до реальних умов пожежі. Це дозволяє реалізувати оцінювання можливості поширення пожежі вздовж висоти фасаду з врахуванням його об'ємно-конструктивних особливостей та матеріалів облицювання, які використані в його конструкції.

2. Розроблено програму натурних вогневих досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям, яка враховує можливість застосування активних та пасивних систем перешкоджання поширення пожежі, а також дозволяє відтворити найбільш несприятливі умови при яких може відбуватися поширення пожежі на вище розташований поверх.

3. Удосконалено експериментальну базу дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям

будівель відмінною рисою якої є врахування реальних конструктивних параметрів фасаду будівлі.

4. Обґрунтовано місця влаштування вимірювального обладнання; необхідний тип вогнища пожежі для забезпечення необхідного температурного режиму у вогневій камері та критерії успішного проведення випробувань для підтвердження обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям.

5. Забезпечено відтворюваність результатів експериментальних досліджень та підтверджено загальну збіжність кожного окремого експерименту, при яких абсолютні відхилення між усередненими результатами експериментальних досліджень та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 5%.

## **РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ**









### **5.1 Результати експериментальних досліджень процесів поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям**

Для визначення впливу кутів ухилу фасадної системи та кутів прилягання суміжних площин до основної частини фасаду на процеси поширення пожежі проведено експериментальні дослідження із використанням установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель та вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  згідно із програмою наведеною в розділі 4.2. Слід відзначити, що дані залежності планується отримати без застосування будь-яких фасадних протипожежних перешкод (активних чи пасивних), які впливають на процеси обмеження поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям будівель.

Тривалість проведення кожного дослідження складала не менше 30 хвилин, а кожний етап натурних вогневих досліджень проводиться не менше трьох разів. Термопари, які розміщено на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду з'єднані із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», а для більш інформативного знаття температур з поверхні досліджуваного зразка фасадної системи використовується тепловізор, згідно із методикою наведеною у розділі 4.2.

Даний етап досліджень імітує випадки вільного поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огороджувальним конструкціям при граничних умовах положення площини фрагменту фасадної системи та суміжних площин фасадів, які змонтовано на установці для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель, а саме розглядаються наступні серії досліджень, що наведені в табл. 5.1

Таблиця 5.1 - Досліджувані випадки вільного поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям фрагментам фасадів

Зовнішній вигляд фрагменту фасадної конструкції змонтованої на установці для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель	Фото експериментальних досліджень	Характеристики
1 серія досліджень		
		<p>Розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом <math>0^\circ</math>, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом <math>180^\circ</math> відносно основної площини</p>
2 серія досліджень		
		<p>Розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом <math>0^\circ</math>, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом <math>90^\circ</math> відносно основної площини</p>
3 серія досліджень		
		<p>Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом <math>+20^\circ</math>, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом <math>180^\circ</math> відносно основної площини</p>
4 серія досліджень		
		<p>Розміщенням досліджуваного фрагменту фасадної системи під кутом <math>+20^\circ</math>, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом <math>180^\circ</math> відносно основної площини</p>

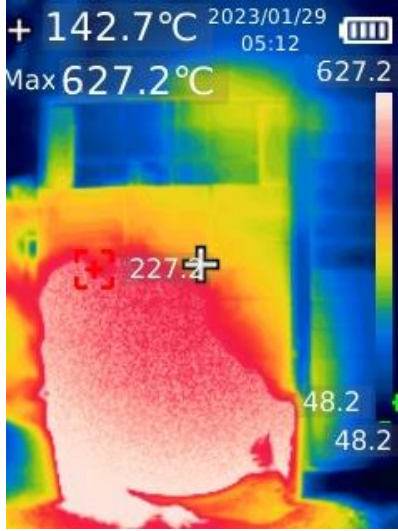
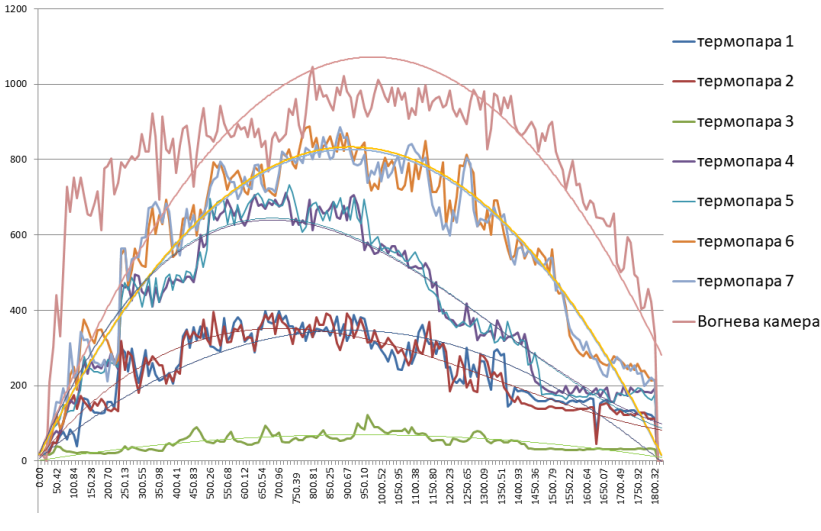
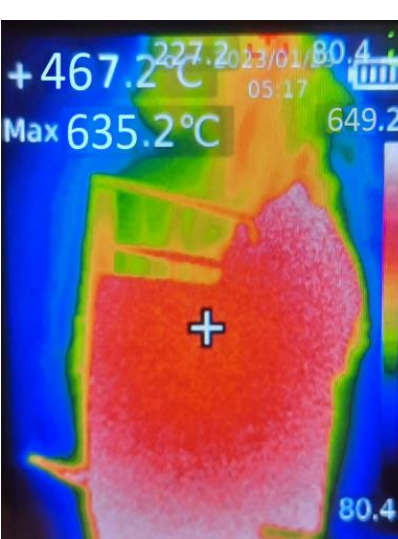
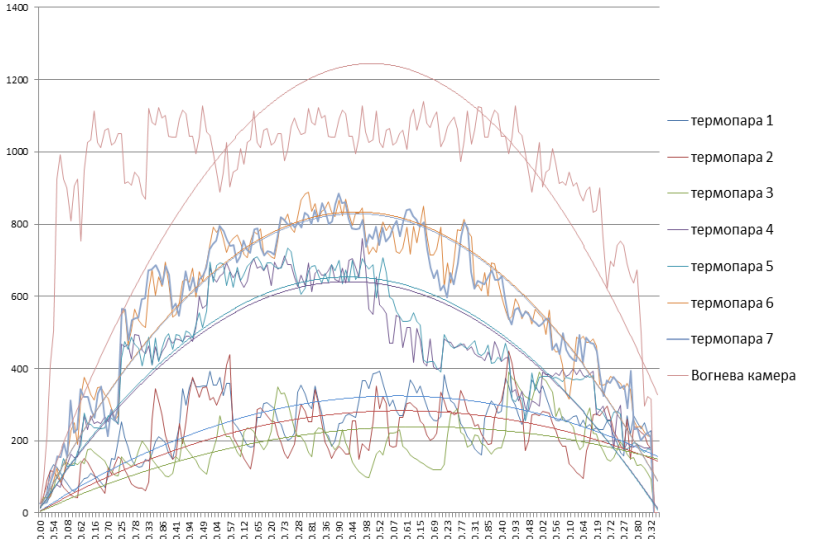


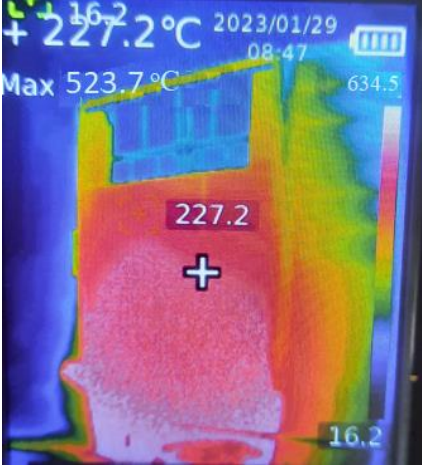
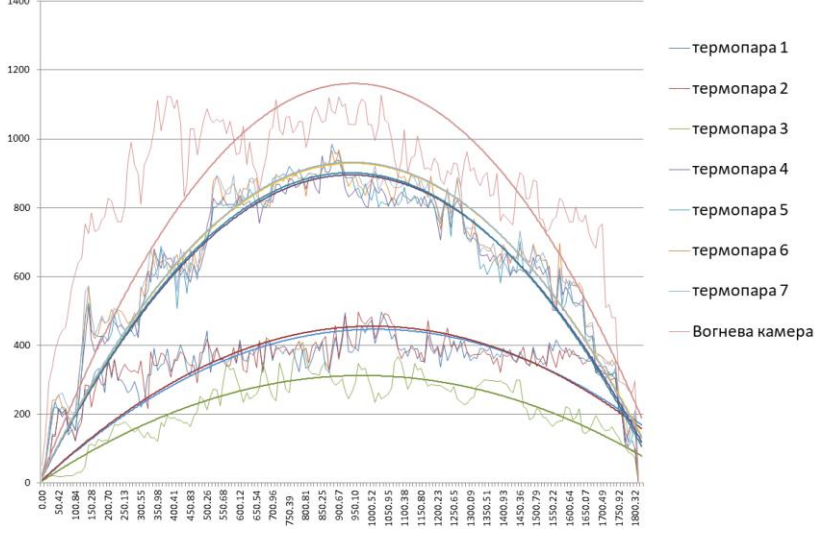
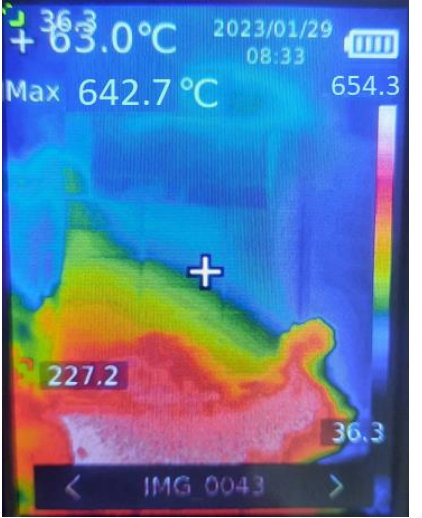
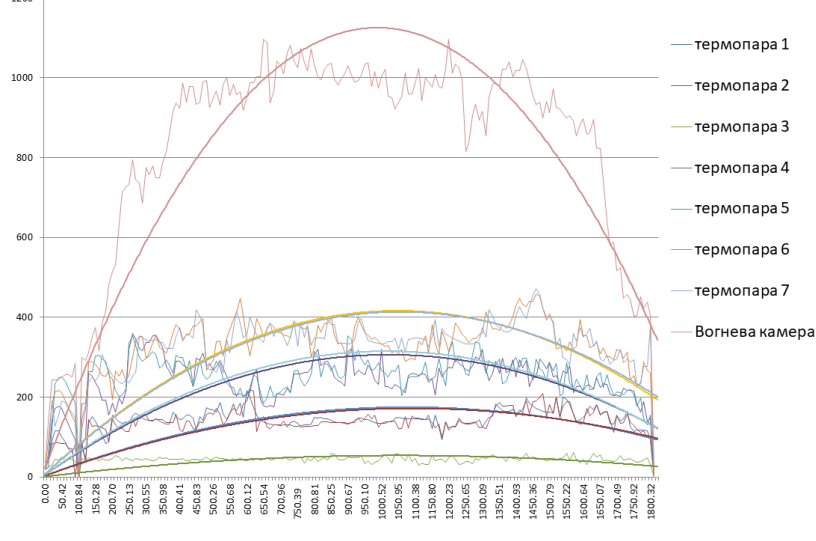
Під час проведення кожної серії експериментальних досліджень спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків фасадної системи розміщених під досліджуваними нахилами, що можна прирівняти до експоненційного розподілу. Зовнішній шар фрагменту фасадної системи обвуглювався, але займання матеріалів або втрата їх цілісності не відбувалася [205]. За результат визначення показника основної температурної кривої для кожної термопари приймають середнє арифметичне трьох результатів випробувань.

На основі регресійного аналізу даних для кожного із досліджуваних варіантів нахилу фасаду та отримання функціональної залежності між двома величинами, а саме, температурою і часом, побудовано поліноміальні регресійні залежності. Отримані дані дозволить адаптувати розрахункову математичну модель до більш складних форм залежностей між змінними та розробити спрощений метод розрахунку для забезпечення умов обмеження поширення пожежі [206;207]. Аналіз отриманих даних дозволяє зробити попередній висновок, що зміна нахилу кута досліджуваного фрагменту фасадної системи значно впливає на характер температурних розподілів на поверхні фасаду.

В табл. 5.2 наведено дані графіків температурних режимів на поверхні фрагментів фасадів, які було встановлено (стовпчик 2), а також та представлено візуалізацію теплових розподілів отриманих за допомогою тепловізора під час проведення натурних досліджень із визначення впливу нахилів фасаду на процеси поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям (стовпчик 1).

Таблиця 5.2 - Досліджувані випадки вільного поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям фрагментам фасадів

1	2
	
<p><b>Фасад під прямим кутом</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1-8) за результатом 3 випробувань</p>
	
<p><b>Фасад під прямим кутом, а прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90°</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1-8) за результатом 3 випробувань</p>

	
<p><b>Фасад під кутом +20° відносно вертикалі</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1-8) за результатом 3 випробувань</p>
	
<p><b>Фасад під кутом -20° відносно вертикалі</b></p>	<p>Середні значення температури по термопарам (1-8) за результатом 3 випробувань</p>

Результати досліджень показали, що для термопар Т1-Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду розміщеного під кутом 0° відносно вертикалі (тобто абсолютно вертикально) значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) становить в межах 375-400 °С. В цей же час, для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду розміщеного під кутом +20° відносно вертикалі значення температури за поліноміальними кривими в момент

пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах 550-600 °С. Для фрагменту фасаду розміщеного під кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі значення температури для термопар Т1-Т3 за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах 180-210 °С.

Слід відзначити, що група термопар Т1-Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду знаходяться на відстані 1400 мм від верхнього краю вогневої камери, що відповідає фактично максимальній відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним згідно із держаними будівельними нормами [9-10]. Враховуючи, що відповідно до стандарту [13; 208] критичною температурою руйнування склопрозорих конструкцій та звичайних (не вогнестійких) вікон становить 260 °С, то для даного випадку натурних експериментальних досліджень можна стверджувати, що для вертикально розташованого фасаду та фасаду нахиленого під кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі створюються умови при яких виникає висока ймовірність руйнування віконних конструкцій та як наслідок поширення пожежі у середину приміщення вище розташованого поверху над поверхом де відбувається пожежа.

Також здійснено аналіз даних для випадку мінімального значення висоти міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним (400 мм), що характерно для фасадів із панорамними вікнами. Аналіз температурних даних для термопар Т6 та Т7 показав значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) становить в межах 770-800 °С для фрагменту фасаду розміщеного вертикально. В цей же час, для тих самих термопар, які розташовуються у фрагменті фасаду розміщеного під кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах 970-1000 °С. Для фрагменту фасаду розміщеного під кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі значення температури для

термопар Т6 та Т7 за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері складає в межах 350-380 °С.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що для фасаду будівлі, який може знаходитися під кутом від -20° до +20° відносно вертикалі, під час 30 хвилинного впливу модельного вогнища пожежі класу 34В значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду від впливу факелу пожежі може змінюватися в 1,6-2,4 рази, як в сторону збільшення (для кутів від 0 до -20°) так і зменшення (для кутів від 0 до +20°) відносно значення температури 375-400 °С для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально [205].

Слід відзначити, що під час проведення експериментальних досліджень, умови проведення вогневих випробувань забезпечували обмеження можливих вітрових впливів на процес поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями. Разом із цим, слід розуміти, що наявність постійних або короткочасних поривів вітру може змінювати значення температурних розподілів на поверхні фасаду в межах 10-15%, що досліджено в роботах [209-214].

З метою визначення середніх відхилень значення і-го дослідження від середнього значення всіх досліджень для кожної серії досліджень визначено середнє абсолютне відхилення за формулою 5.1 [188]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n}. \quad (5.1)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках та з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 5.2 [188]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\%. \quad (5.2)$$

Для визначення ступеня розсіювання значень випадкової величини ( $x_i$ ) відносно її математичного сподівання ( $\bar{x}_i$ ) та мінливості вибірки обчислено середнє квадратичне відхилення результатів досліджень за формулою 5.3 [188]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}}. \quad (5.3)$$

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 5.4 [188]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{s_j}. \quad (5.4)$$

Тобто, значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [188], які для трьох досліджень відповідно становлять 1,155 та 1,155. Якщо після порівняння  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  з їх критичними значеннями виявиться, що значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ( $G_{кр.5\%}$ ) і менше (або дорівнює) 1 %-го ( $G_{кр.1\%}$ ) критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), тоді значення  $y_{jmax}$  або  $y_{jmin}$  вважають квазівикидом. Якщо розраховане значення  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  більше 1 %-го критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), то відповідно  $y_{jmax}$  або  $y_{jmin}$  вважають викидом. Якщо розраховані значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  є меншими (рівними) за критичні значення 5% ( $G_{кр.5\%}$ ), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів. З метою оцінки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою 5.5 [188]:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}, \quad (5.5)$$

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

Для оцінювання дисперсій висуваємо нуль-гіпотезу, тобто припускають, що різниця між дисперсіями результатів досліджень дорівнює нулю і дані, отримані під час досліджень є вибірками з генеральної сукупності. При цьому розраховуємо коефіцієнт Фішера [215;216] за формулою 5.6:

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} = F, \quad (5.6)$$

де  $S_1^2$ ,  $S_2^2$  - середньоквадратичне відхилення для вибірки із найбільшими значеннями отриманими під час досліджень та найменшими.

Розраховане значення коефіцієнта  $F$  порівнюють з табличним значенням [188]. Для цього задаються рівнем статистичної значущості  $q$  % (зазвичай це 5 %) і для кількості ступенів свободи  $k_1 = n_1 - 1$  та  $k_2 = n_2 - 1$  визначають табличне значення  $F_{q,k_1,k_2}$ , яке для вибірки із трьох експериментальних досліджень становить для 5% меж – 9,12 для 1% меж – 28,71. Якщо задовольняється нерівність  $F \leq F_{q,k_1,k_2}$ , то для наявних даних можна вважати, що зі статистичною надійністю  $P = 1 - \frac{q}{100}$ , дані не заперечують нуль-гіпотезі, тобто розбіжність між дисперсіями результатів досліджень можна вважати несуттєвою і можна пояснити впливом випадкових чинників та обмеженим обсягом даних. Таким чином, дані, отримані під час досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності.

Якщо,  $F \leq F_{q,k_1,k_2}$  то на підставі отриманих результатів нуль-гіпотезу відкидають і розбіжність між дисперсіями результатів досліджень вважають суттєвою, тобто, такі дані не належать до однієї генеральної сукупності.

Таким чином, на основі приведених критеріїв проведено аналіз абсолютних відхилень, середніх відносних відхилень, середніх квадратичних відхилень за результатом кожної серії випробувань для термопар, які розміщені на рівні світлового прорізу зовнішньої огорожувальної конструкції, що імітує вікно поверху, розміщеного над поверхом пожежі.

Перша серія із 3-х досліджень проводилась коли розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи здійснювалося під кутом  $0^\circ$ , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини. Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено на рис. 5.1.

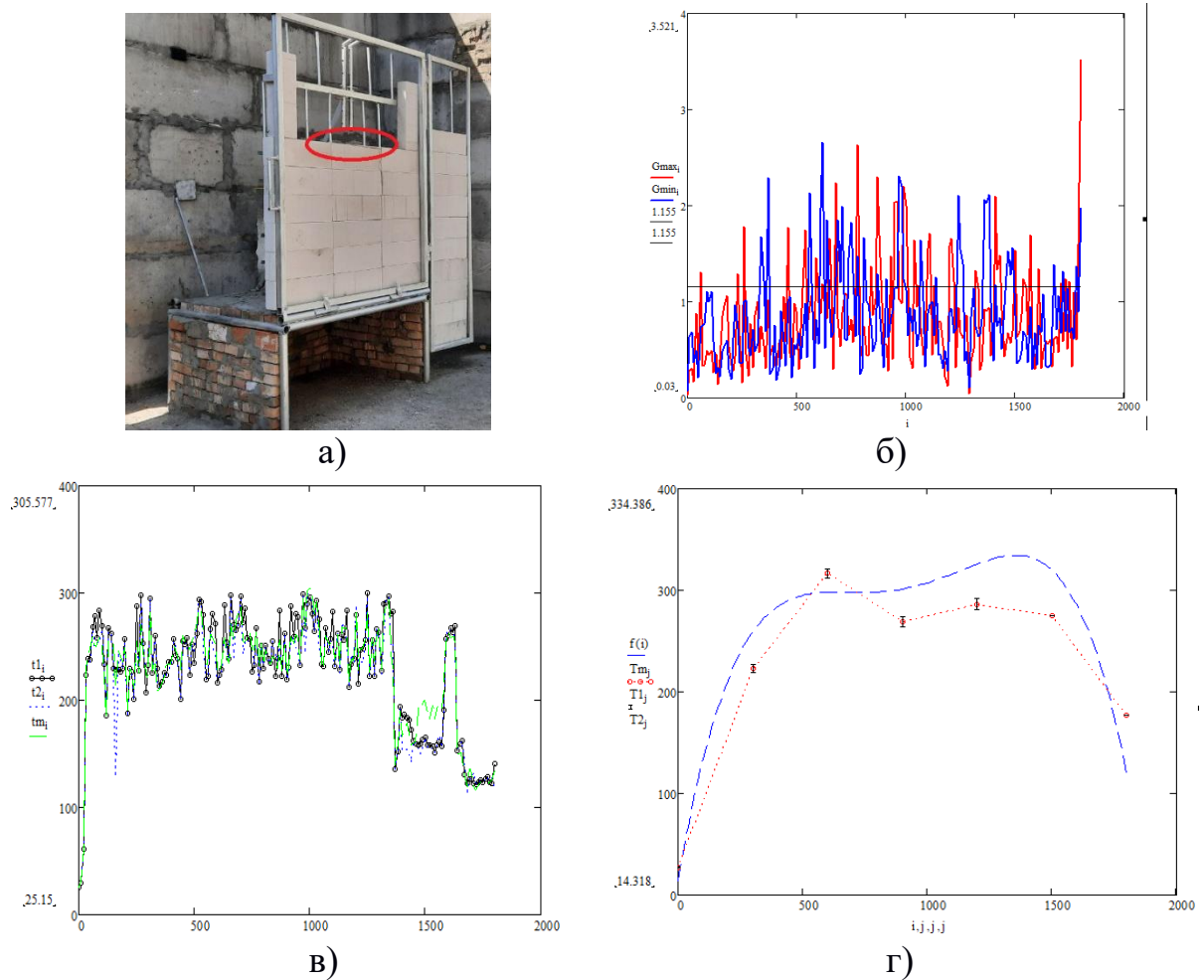


Рисунок 5.1 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщенні основної площини фасаду вертикально, а прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини: а) вид конструктивного виконання фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором); б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопарі за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі.



Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в табл. 5.3

Таблиця 5.3 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення температури для зони вікна розташованого над вікном поверху пожежі за результатом серії із 3-х випробувань

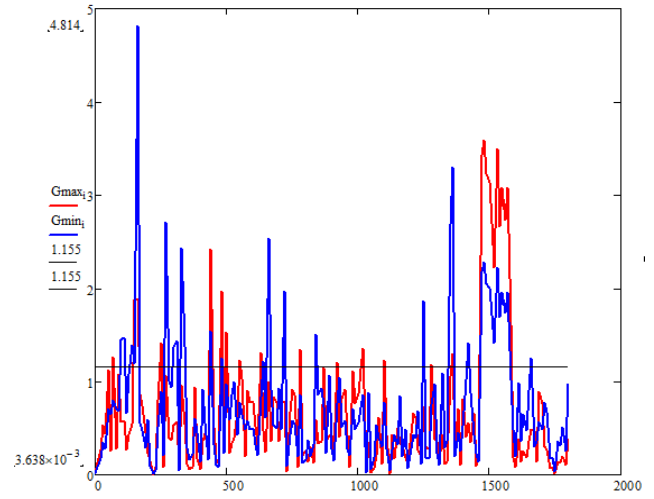
Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
15,4	6,6	20,6	1,37

Даний етап дослідження демонструє, що загальне планування експерименту та засоби вимірювальної техніки дозволяють отримати досить точні дані щодо температурних розподілів на поверхні досліджуваної зовнішньої огорожувальної конструкцій. Проведення випробувань в напів закритому боксі дозволило мінімізувати вплив зовнішніх чинників, зокрема вітру, що дозволило підвищити точність та відтворюваність даних за кожним етапом експериментальних випробувань. Отримані дані стануть базовими (диктуючими) під час порівняння та оцінювання даних щодо впливу конструктивних параметрів фасаду на процеси поширення пожежі та дослідження умов її обмеження.

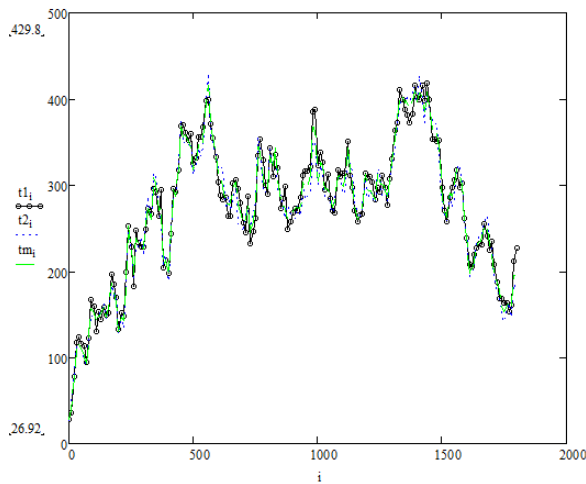
Друга серія із 3-х досліджень здійснювалася для сценарію коли розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи здійснювалося під кутом нахилу 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90° відносно основної площини. Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії проведених експериментів наведено на рис. 5.2.



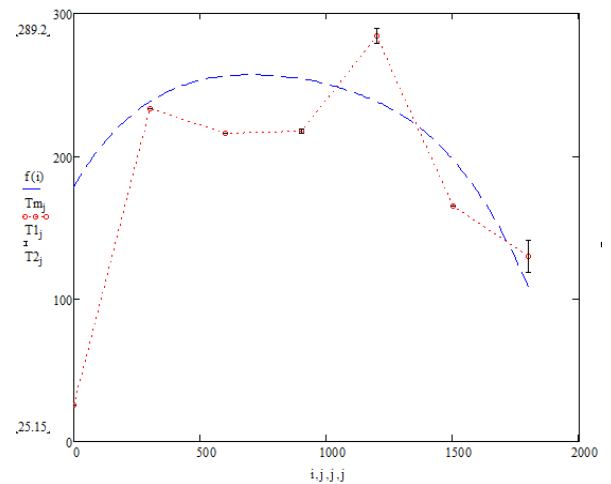
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.2 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщені основної площини фасаду вертикально, а прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $90^\circ$  відносно основної площини: а) вид конструктивного виконання фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором); б) результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопарі за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі

Результати щодо дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в табл. 5.4.

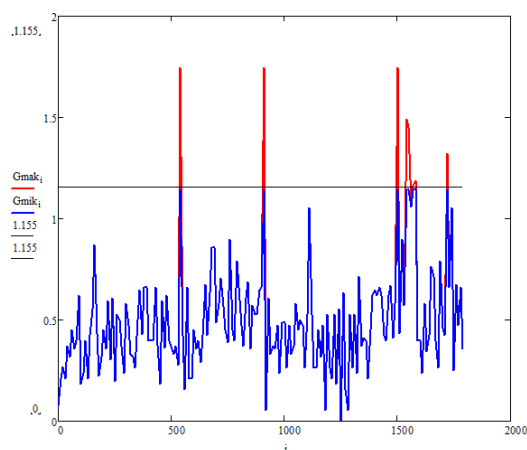
Таблиця 5.4 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення температури для зони вікна розташованого над вікном поверху пожежі за результатом серії із 3-х випробувань

Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
7,9	2,9	8,9	1,21

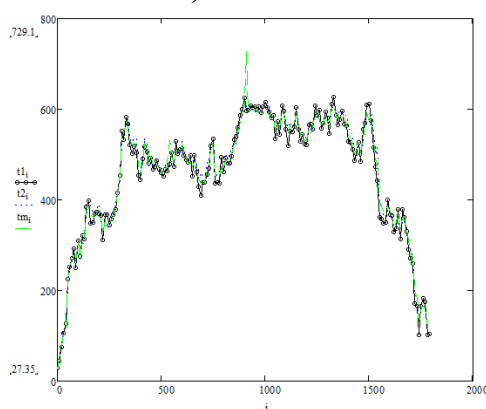
Третя серія із 3-х досліджень здійснювалася для сценарію коли розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи здійснювалося під нахилом з кутом  $+20^\circ$ , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини. Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено на рисунку 5.3.



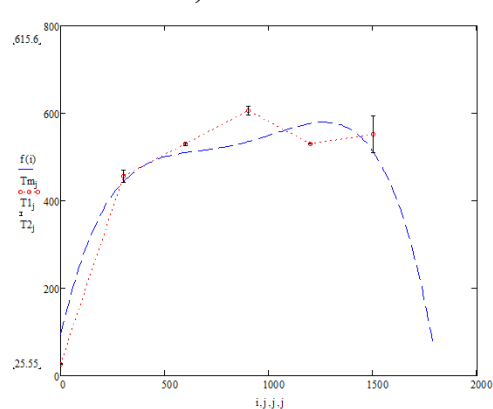
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.3 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщені

основної площини фасаду з нахилом, а прилегла частина фасаду розміщена під нахилом з кутом  $+20^\circ$  відносно вертикалі, прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини: а) вид конструктивного виконання фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором); б) результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопари за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопари.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення температури для зони вікна розташованого над вікном поверху пожежі за результатом серії із 3-х випробувань

Абсолютні відхилення, $^\circ\text{C}$	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, $^\circ\text{C}$	Критерій Фішера 5%* - 6,39
7,4	1,8	8,83	1,38

Четверта серія із 3-х досліджень здійснювалася для сценарію коли розміщення досліджуваного фрагменту зовнішньої огорожувальної конструкції відбувалося під нахилом з кутом  $-20^\circ$ , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини фасаду. Слід відмітити, що для даної серії експериментальних досліджень вплив та його безпосередній контакт полум'я з досліджуваною площиною зовнішньої огорожувальної конструкції був найменшим.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено на рис. 5.4.

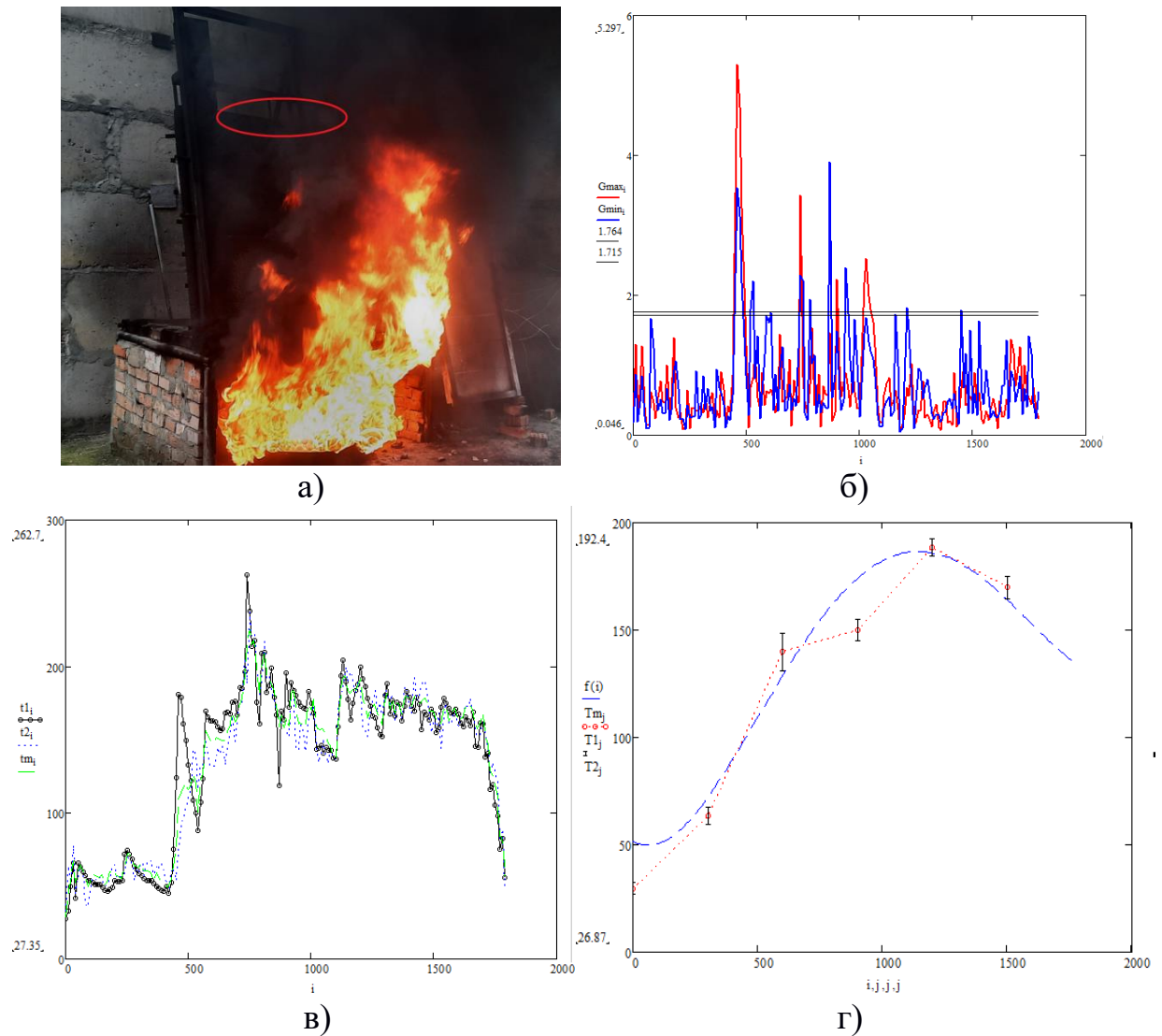


Рисунок 5.4 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщенні основної площини фасаду з нахилом, а прилегла частина фасаду розміщена під нахилом з кутом  $-20^\circ$  відносно вертикалі, прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини:

а) вид конструктивного виконання фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором); б) результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазивикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопарі за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення температури для зони вікна розташованого над вікном поверху пожежі за результатом серії із 3-х випробувань

Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
9,37	7,38	12,03	1,45

За результатом проведення оцінки розбіжності за кожною із серій проведених експериментальних досліджень визначено абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення усереднених експериментальних досліджень а також належність дисперсій до однієї генеральної сукупності результатів. Для можливості загальної оцінки адекватності проведених досліджень за кожною серією досліджень здійснено узагальнення даних температурних залежностей для кожного типу зовнішньої огорожувальної конструкції. Дані показники дозволять отримати інформацію про те, наскільки різні значення вибірки відхиляються від середнього значення. Чим меншим є середнє квадратичне відхилення, тим менше розсіювання отриманих даних температурних залежностей. Дані показники є важливою характеристикою для оцінки стабільності і однорідності даних під час натурних догневих досліджень.

В табл. 5.7 наведено узагальнені дані адекватності для термопар, які розміщені в зоні нижнього краю вікна, яке розташоване над вогневою камерою, що імітує поверхі пожежі за кожною із серій випробування під час дослідження закономірностей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям в залежності від їх конструктивних параметрів.

Таблиця 5.7 - Узагальнені результати перевірки адекватності проведених досліджень щодо виявлення закономірностей поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям

Номер серії випробування	Абсолютне відхилення, °С	Відносне відхилення, %	Середнє квадратичне відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
1 серія випробувнь	15,4	6,6	20,6	1,37
2 серія випробувнь	7,9	2,9	8,9	1,21
3 серія випробувнь	7,4	1,8	8,8	1,38
4 серія випробувнь	9,4	7,4	12,0	1,45
Діапазон відхилень	7,4÷15,4	1,8÷7,4	8,8÷20,6	1,38÷1,45
Середні значення	10,1	4,7	12,6	1,35

Таким чином, абсолютні відхилення між усередненими експериментальними дослідженнями та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 15,4 °С, що відсоткових показниках не перевищує 7,4 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 8,8÷20,6°С, що вказує на те, що дані кожного експериментального дослідження максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження. Отримані дані свідчать, що під час реалізації програми експериментальних досліджень запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям забезпечено стабільність умов вимірювань та консистентність результатів при повторенні експерименту. Окрім цього, доведено, що Випробувальна установка дозволяє забезпечити репродуктивність експериментальних досліджень, а саме можливість відтворювати експеримент за різних вихідних умов.

## 5.2 Результати експериментальних досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям пасивними фасадними протипожежними перешкодами

Для визначення впливу фасадної протипожежної перешкоди пасивного типу, встановленої на зовнішній поверхні вертикальної огорожувальної конструкції, на процеси обмеження поширення пожежі проведено серію натурних досліджень. В якості фасадної протипожежної перешкоди пасивного типу використано протипожежний карниз шириною 0,3 м. Даний розмір протипожежного карнизу обумовлений мінімально-допустимою шириною протипожежних карнизів, за результатом проведеного аналізу [217-221] щодо мінімально допустимих параметрів фасадних протипожежних перешкод, які впливають на процеси обмеження поширення пожеж по фасадам будівель та споруд.

Таким чином, під час проведення експериментальних досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям фасадною протипожежною перешкодою пасивного типу було застосовано протипожежний карниз із мінімальною шириною 0,3 м, виконаний із негорючих матеріалів, фото якого наведено на рис. 5.5.



Рисунок 5.5 – Зовнішній вигляд установки обладнаної фасадною протипожежною перешкодою пасивного типу (протипожежним карнизом)



Під час проведення натурних вогневих досліджень розміщення досліджуваного фрагменту фасадної системи здійснювалося без нахилу (під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі). Прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини. Всі інші умови експериментальних досліджень відповідали визначеній програмі експериментальних досліджень з оцінки обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на зовнішні огорожувальні конструкції. У вогневій камері використовувалося вогнище пожежі площею  $1,1 \text{ м}^2$  класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$ .

На рис. 5.6 наведено фото процесу проведення натурних вогневих досліджень.

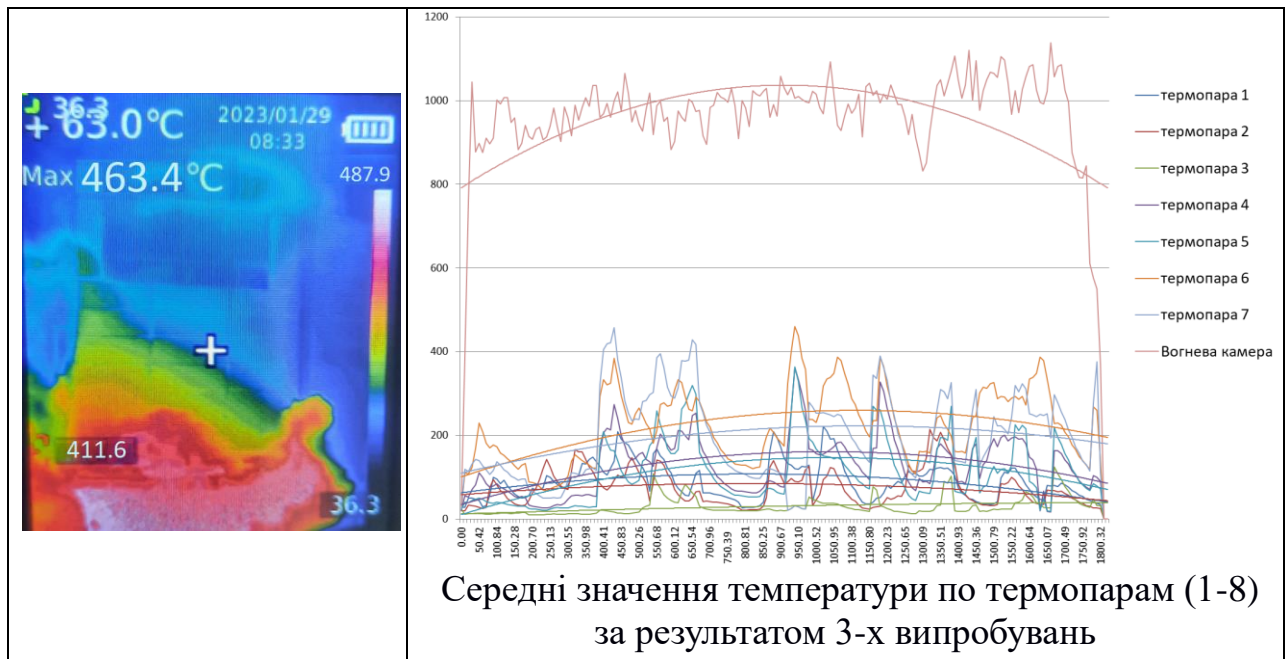


Рисунок 5.6 – фото натурних вогневих досліджень впливу протипожежного карнизу на процеси обмеження поширення пожежі по фасаду

За результатом проведених експериментальних досліджень отримано дані щодо температурних розподілів на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій захищених протипожежним карнизом шириною  $0,3 \text{ м}$ .

В табл. 5.8 наведено зведені дані за результатами натурних досліджень та графіки температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду.

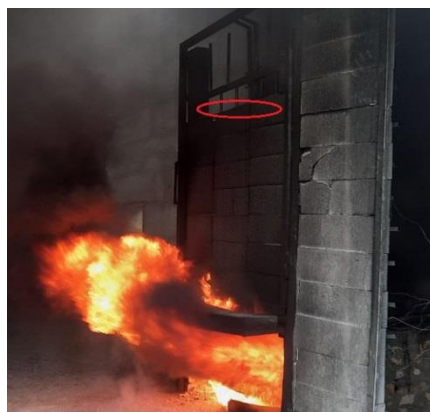
Таблиця 5.8 - Результати температурних розподілів біля поверхні фасаду обладнаного протипожежним карнизом для обмеження поширення пожежі



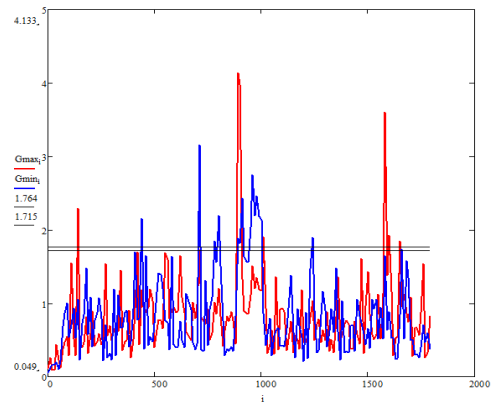
Проведемо порівняння даних для термопар Т1-Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі (тобто абсолютно вертикально) без протипожежного карнизу та із ним. Аналіз показав, що значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) для даних термопар становить в межах  $375-400^\circ\text{C}$  при відсутності протипожежного карнизу. За наявності протипожежного карнизу шириною  $0,3$  м для термопар Т1-Т3 значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах  $210-240^\circ\text{C}$  за результатом серії досліджень із 3-х експериментів.

Аналіз даних для випадку мінімальної відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним ( $400$  мм) для термопар Т6 та Т7 показав значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) становить в межах  $770-800^\circ\text{C}$  для фрагменту фасаду

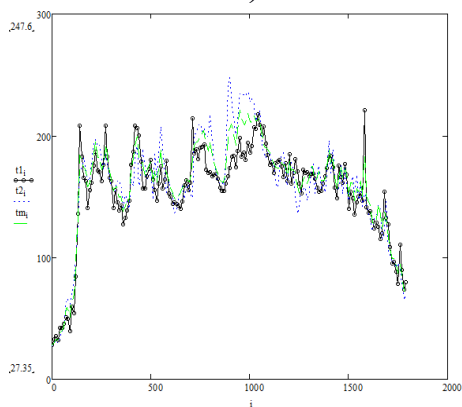
розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі без протипожежного карнизу. В цей же час, для тих самих термопар, за тих самих умов досліджень але при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м для термопар Т6 та Т7 значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах  $370\text{-}420^\circ\text{C}$ . Тобто за даних умов досліджень, протипожежний карниз шириною 0,3 м дозволив зменшити значення середнього температурного впливу фактично в 2,1-2,3 рази. На рис. 5.7 наведено графіки абсолютних відхилень, відносних відхилень, квадратичних відхилень температури для зони вікна розташованого над вікном поверху пожежі за серією із 3-х випробувань.



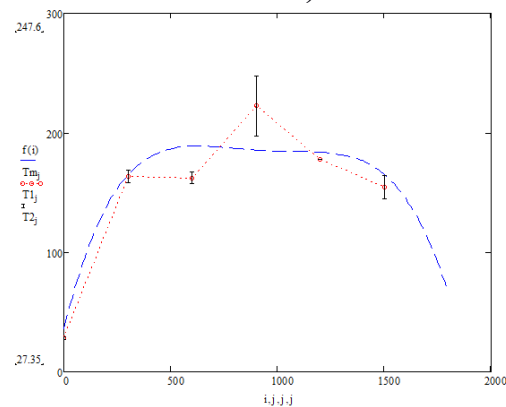
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.7 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщенні основної площини фасаду вертикально, прилегла частина фасаду розміщена під кутом  $180^\circ$  відносно основної площини при цьому фасад обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м: а) вид конструктивного виконання

фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором);

- б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопари за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопари.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в табл. 5.9.

Таблиця 5.9 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопари за результатом серії із 3-х випробувань

Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
8,6	5,7	10.91	0.81

Таким чином, абсолютні відхилення між усередненими експериментальними дослідженнями та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують 8,6 °С, що відсоткових показниках не перевищує 5,7 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 10,9°С, що вказує на те, що дані кожного експериментального дослідження максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження для проведеної серії досліджень.

### **5.3 Результати експериментальних досліджень процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям фасадною протипожежною перешкодою активного типу**

Для визначення впливу фасадної протипожежної перешкоди активного типу на процеси обмеження пожежі зовнішньою огорожувальною конструкцією, встановленої на її зовнішній поверхні проведено серію натурних експериментальних вогневих досліджень. В якості фасадної протипожежної перешкоди активного типу використано протипожежний карниз шириною 0,3 м та дренчерний зрошувач із направляючою лопаткою.

Дренчерні зрошувачі є одним із найбільш ефективних засобів водяного екранування від впливу небезпечних чинників пожежі та досить ефективно обмежують вплив температури на захищений об'єкт [222-227].

Під час визначення необхідних мінімальних параметрів системи дренчерного зрошення за основу взято рекомендації [228-230] та [231]. Під час визначення розрахункової інтенсивності зрошення прийнято, що захищувана зона фасаду будівлі, яка підлягає захисту відноситься за групою пожежної небезпеки, згідно з додатком А ДСТУ Б EN 12845 до класу ОН1 (лікарні, готелі, ресторани, школи, офіси тощо), як до громадських будинків. Таким чином, розрахункова інтенсивність зрошення має становити 5 мм/хв ( $0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ ). Згідно з вимогами [ДСТУ Б СЕН\TS 14816:2013] діапазон робочого тиску для трубопроводу діаметром 25 мм повинен складати не менше 2 бар (2 атм.).

Таким чином, система подавання води на охолодження зони поверху розташованого під протипожежним карнизом складається із погрузного насосу вібраційного типу з продуктивністю  $1,7 \text{ м}^3/\text{годину}$ , який встановлено у протипожежному резервуарі, а також системи подавального трубопроводу діаметром 25 мм та запірної арматури. Напір води в системі контролюється за допомогою манометру, який встановлено безпосередньо перед зоною досліджуваного фрагменту фасаду влаштованого на Установці.

На рис. 5.8 наведено зведене фото зовнішнього виду насосного обладнання, подавального трубопроводу, манометру і дренчерного зрошувача встановлених на Установці для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівлі.



Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд Установки та обладнання для дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям фасадною протипожежною перешкодою активного типу

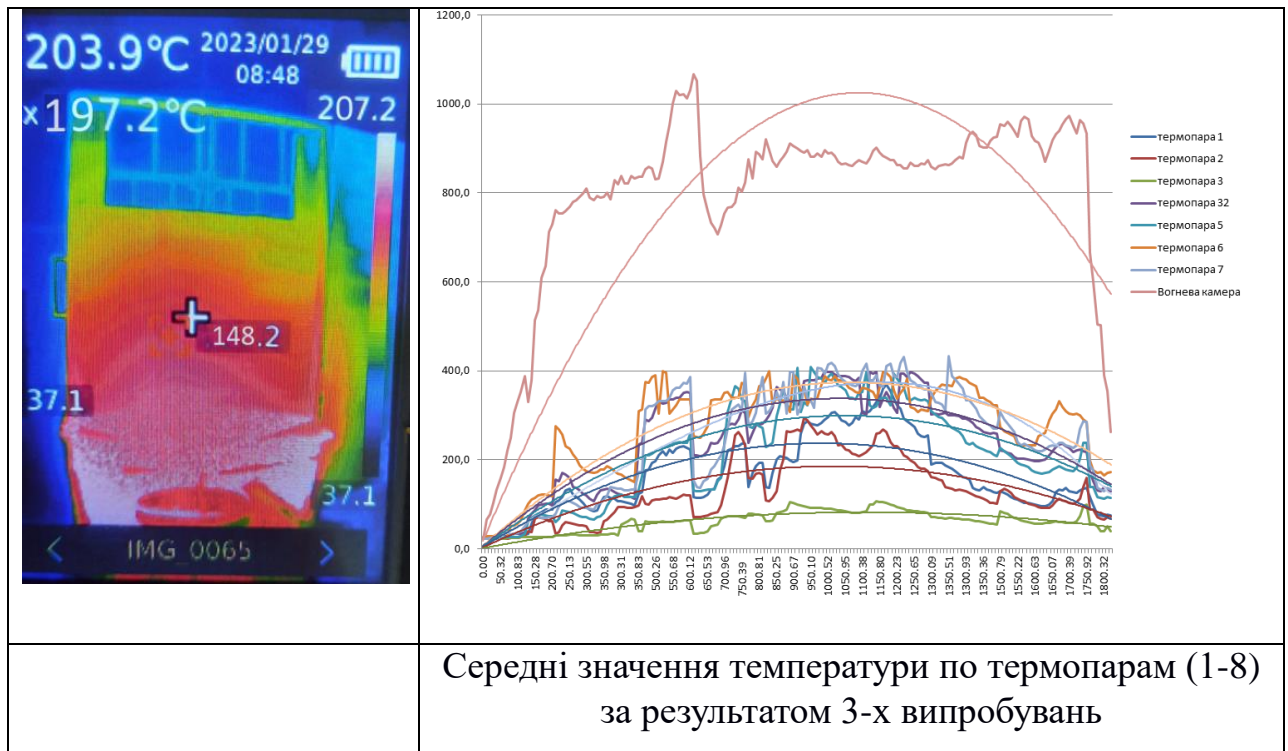
Активація системи дренчерного пожежогасіння відбувалася через 10 хвилин після початку горіння модельного вогнища пожежі класу В, що відповідає мінімальному нормативному значенню прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на пожежу у місті згідно з [147]. Тривалість подавання води для екранування зони пожежі, яка розміщується під фасадною протипожежною перешкодою (протипожежним карнизом) становила 20 хвилин. Інтенсивність подавання води на потреби екранування становила  $0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ , що відповідає мінімальній інтенсивності подавання води для приміщень громадського та житлового призначення [232]. На рис. 5.9 наведено фото експериментальних натурних вогневих досліджень.



Рисунок 5.9 – Експериментальні дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям фасадною протипожежною перешкодою активного типу

В табл. 5.10 наведено результати натурних досліджень та графіки температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду.

Таблиця 5.10 - Результати температурних розподілів біля поверхні фасаду обладнаного протипожежним карнизом для обмеження поширення пожежі



Проведемо порівняння даних для термопар Т1-Т3, які розташовуються на рівні віконного прорізу у фрагменті фасаду розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі (тобто абсолютно вертикально) без протипожежного карнизу активного типу та із ним.

Аналіз показав, що значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) для даних термопар становить в межах  $375-400^\circ\text{C}$  при відсутності протипожежного карнизу активного типу.

За наявності протипожежного карнизу шириною 0,3 м та дренчерного зрошувача із інтенсивністю зрошення  $0,083\text{ л/с}\cdot\text{м}^2$  для термопар Т1-Т3 значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах  $140-160^\circ\text{C}$  за результатом серії досліджень із 3-х експериментів.

Аналіз даних для випадку мінімальної відстані міжповерхового простінку між віконними прорізами, які розташовані один над одним (400 мм) для термопар Т6 та Т7 показав значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері (з 500 по 1500 секунди) становить в межах  $770-800^\circ\text{C}$  для фрагменту фасаду розміщеного під кутом  $0^\circ$  відносно вертикалі без протипожежного карнизу, в тому числі активного типу. В цей же час, для тих самих термопар, за тих самих умов досліджень але при застосуванні протипожежного карнизу шириною 0,3 м обладнаного дренчерним зрошувачем із інтенсивністю зрошення  $0,083\text{ л/с}\cdot\text{м}^2$  для термопар Т6 та Т7 значення температури за поліноміальними кривими в момент пікових значень температурного режиму у вогневій камері становить в межах  $240-260^\circ\text{C}$ . Тобто за даних умов досліджень, протипожежний карниз активного типу шириною 0,3 м та з дренчерним зрошувачем із інтенсивністю зрошення  $0,083\text{ л/с}\cdot\text{м}^2$  дозволив зменшити значення середнього температурного впливу фактично в 2,8-3,1 рази.



Окрім цього, за результатом аналізу даних отриманих з термопари, яка розташована у верхньому краю вогневої камери, що імітує вікно поверху пожежі виявлено, що температурний режим в даній зоні знизився в середньому зі значень температури в 1030-1100 °С до значень 780-850 °С, тобто фактично в 1,17-1,22 рази, що обумовлено ефектом охолодження та частковим екрануванням пожежі та її негативних чинників.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом шостої серії експериментів із 3-х досліджень наведено на рисунку 5.10.

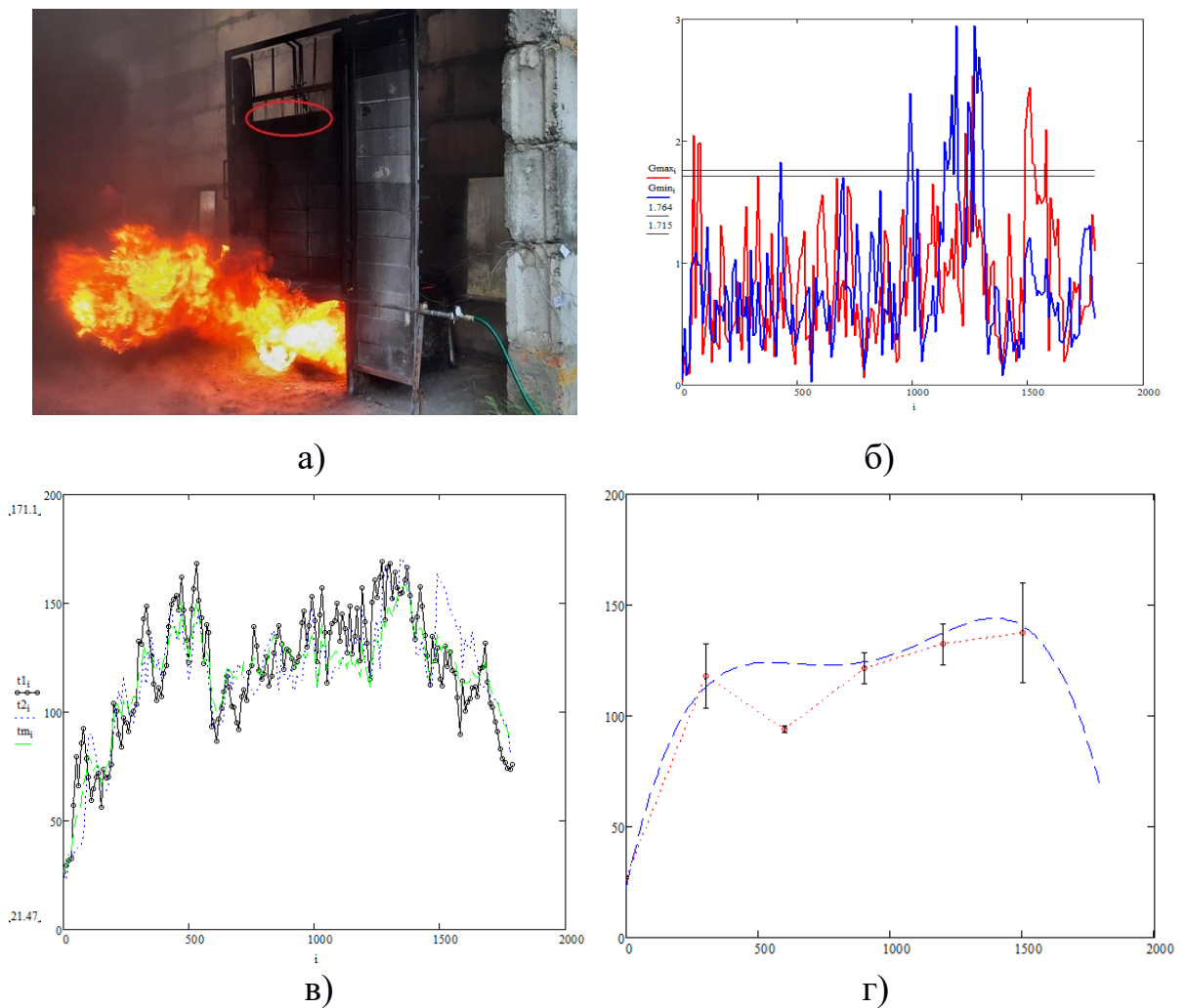


Рисунок 5.10 – Середньостатистичні відхилення для температури на рівні нижнього краю вікна для серії досліджень із 3-х досліджень при розміщенні основної площини фасаду вертикально, прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини, а фасад обладнано протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем:

а) вид конструктивного виконання фасаду та зона його досліджуваного фрагменту (виділено червоним кольором); б) результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопар за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопар.

Результати дослідження статистичних похибок за результатом даної серії експериментів наведено в таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопар за результатом серії із 3-х випробувань

Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39
11,2	9,8	13,18	1,05

За результатом аналізу отриманих даних та дослідження статистичних похибок за кожною серією експериментів доведено, що отримані залежності є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експерименту, а дисперсії відхилень є прийнятними та знаходяться в межах 12-14%.

Окремо слід відмітити спостереження характеру поширення вогню та теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класу В у порівнянні із дослідженнями горіння та гасіння твердих матеріалів (модельних вогнищ пожежі класу А) представлених в роботах [233-239]. Застосоване вогнище пожежі класу В із використанням дека модельного вогнища пожежі класу 34В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup> забезпечило умови сталого температурного режиму та вогневого впливу на досліджуваний фрагмент фасаду. Серед недоліків, доцільно відмітити фазу кінцевого вигорання палива (1700-1800 секунди) при якій спостерігався досить нестабільний вогневий вплив, що спостерігається на графіках дисперсії відхилень для термопар. При

цьому, дане явище є несуттєвим, що підтверджується результатами визначень абсолютних, відносних та квадратичних відхилень.

#### 5.4 Висновки до розділу 5

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Експериментальним шляхом встановлено вплив конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на процеси зміни температур на їх поверхні, а саме для фасаду будівлі, який може знаходитися під кутом від  $-20^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$  відносно вертикалі, під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на висоті 1400 мм від рівня верхнього краю вікна поверху пожежі від впливу факелу пожежі може збільшуватись в 1,6-1,8 рази (для кутів від  $0^{\circ}$  до  $-20^{\circ}$ ) або зменшуватись в 1,9-2,4 рази (для кутів від  $0^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$ ) відносно значення температури  $375-400^{\circ}\text{C}$  для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально.

2. Встановлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною 0,3 м значення температури біля поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції вище розташованого поверху на висоті 1400 мм від рівня верхнього краю вікна поверху пожежі становить в межах  $210-240^{\circ}\text{C}$  у порівнянні із  $375-400^{\circ}\text{C}$  для фасаду не обладнаного протипожежним карнизом та  $140-160^{\circ}\text{C}$  для фасаду який обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчером із мінімальною інтенсивністю зрошення  $0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ .

3. Виявлено, та експериментально підтверджено, що наявність протипожежним карнизу шириною не менше 0,3 м із інтегрованою системою дренчерного зрошення може зменшувати вплив пожежі та її негативних

чинників на вище розташовані поверхи та знижувати ризик поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі.

4. За результатом аналізу отриманих даних та дослідження статистичних похибок за кожною серією експериментів визначено, що абсолютні відхилення між усередненими експериментальними дослідженнями та кожною із серій експериментальних досліджень не перевищують  $15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відсоткових показниках не перевищує  $9,8\%$ , середньоквадратичні відхилення становлять в межах  $8,8\div 20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що вказує на те, що дані кожного експериментального дослідження максимально наближені до усереднених даних експерименту. Доведено, що отримані залежності є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експерименту, а дисперсії відхилень є прийнятними та знаходяться в межах  $12\text{-}14\%$ .

5. Удосконалено експериментальну базу дослідження процесів обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель відмінною рисою якої є врахування реальних конструктивних параметрів фасаду будівлі.

## РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ГАЗО-ГІДРОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ОЦІНКА ЇЇ АДЕКВАТНОСТІ

### 6.1 Створення газо-гідродинамічної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель

З метою забезпечення комплексних підходів щодо можливості прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель, з врахуванням досліджень [240-245], а також забезпечення можливості оптимізації процесу оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження розроблено комп'ютерну газо-гідродинамічну модель, що відтворює умови натурних випробувань. Під час розроблення комп'ютерної моделі на базі програмного комплексу Fire Dynamics Simulator [107] та з врахуванням положень вітчизняних вимог [111], використано умови і параметри згідно із методикою наведеною в розділі 4.2 [246;247]. Для можливості візуалізації отриманих результатів моделювання в програмному апараті FDS, використано програмний комплекс SmokeView [248-251].

На першому етапі створення моделі забезпечено відтворення конструктивних та масштабних параметрів конструкції установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель (далі - Установки) та вихідних умов, що визначені методикою експериментальних досліджень. В основі матеріалу конструкції рами Установки використано сталь з наступними фізичними параметрами: густина матеріалу ( $7850 \text{ кг/м}^3$ ); теплопровідність ( $45,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ); коефіцієнт випромінення для старої окисленої сталі прийнято ( $0,82$ ) згідно з [252;253]. Також зазначені характеристики матеріалу задані для металевого дека модельного вогнища пожежі класу 34В. Для відтворення фрагменту досліджуваної конструкції фасаду в якості основного матеріалу зовнішньої вертикальної огорожувальної конструкції прийнято газоблоки марки D400, де

числове значення відповідає значенню густини виробу, а саме  $400\text{кг/м}^3$ . Коефіцієнт теплопровідності газоблоків складає  $0,11-0,13\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  у сухому стані, теплопровідність становить в межах  $0,1 - 0,4\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [254-257]. В якості палива, яким заповнюється деко використано рідке паливо, а саме синтетична олива Castrol Optigear Synthetic X320/X320 WTO, що відповідає даним [258-260] та має питому теплоємність тепловиділення  $2836\text{ кВт/м}^2$ , коефіцієнт випромінювання  $0,9$ , густина оливи  $840\text{ кг/м}^3$ , середнє значення пожежної навантаги склало  $2290\text{ МДж/м}^2$  згідно з [260].

На рис. 6.1 наведено візуалізацію відтвореної Установки та зовнішній вигляд створеної її FDS моделі.



Рисунок 6.1 - Зовнішній вигляд натурної експериментальної установки та її відтвореної FDS моделі

Основа, на якій розміщено математичну модель Установки є графічною площиною на якій розміщено диктуючу точку до якої прив'язується системи координат ( $x, y, z$  – ширина, довжина, висота) для будь якого об'єкту моделі, що буде в майбутньому створюватись в межах площини. Окрім цього, основа площини дозволяє дотримуватись необхідного масштабу моделі та точно відтворювати схеми улаштування фрагментів фасаду, які досліджуються та засоби виміральної техніки, які на них встановлюються.

Для виконання розрахункових операцій визначається зона створення розрахункової сітки моделі в межах якої виконуються обчислення математичної моделі тепломасопереносу та побудується відповідний чисельний алгоритм для моделювання цього процесу.

Слід відзначити, що FDS об'єкти моделі повинні мати виключно прямокутні форми щоб мати можливість входити у розрахункову область сітки моделі. Чим меншою будуть розміри комірок сітки тим точніші будуть результати обчислень, але разом із тим збільшуватиметься час та навантаження на процесор обчислювальної комп'ютерної техніки. Рекомендації [261-263] встановлюють, що найбільш оптимальною величиною комірок сітки є  $10\text{ см} \times 10\text{ см}$  та  $25\text{ см} \times 25\text{ см}$  для об'єктів розміром до  $5000\text{ м}^3$ . Для моделі до  $10\text{ м}^3$ , а також лабораторних досліджень доцільно застосовувати розрахункову сітку з комірками розміром  $1\text{ см} \times 1\text{ см}$ .

Допускається проводити оптимізацію обраної розрахункової області сітки за методом дихотомії, сутність якого полягає у повторному проведенні розрахунків із зменшенням розміру комірок до тих пір, поки зменшення розмірів комірок не призводить до помітних змін в контрольованих параметрах.

Таким чином, для забезпечення найбільшої точності результатів моделювання та водночас оптимізувати роботу обчислювальної комп'ютерної техніки, а також враховуючи геометричні параметри моделі стенду ( загальний об'єм моделі  $39\text{ м}^3$ ) значення розмірів комірок розрахункової сітки для моделювання натурних досліджень прийнято  $10\text{ см} \times 10\text{ см}$ , тобто всього 39 000 розрахункових комірок.

На рис. 6.2 наведено візуалізацію розрахункової сітки та моделі установки, яка розміщена в її об'ємі.

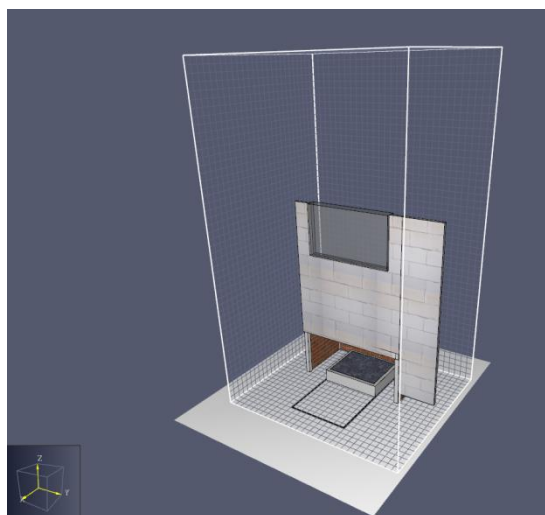


Рисунок 6.2 – Візуалізація розрахункової сітки математичної моделі

Для забезпечення отримання температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду у відповідних зонах на його поверхні розміщено вимірювачі температури у газовій фазі згідно із схемою наведеною у методиці в розділі 4.2. На рис. 6.3 наведено створену комп'ютерну газо-гідродинамічну модель та місця розміщення датчиків для виміру температури на поверхні фрагменту фасаду.

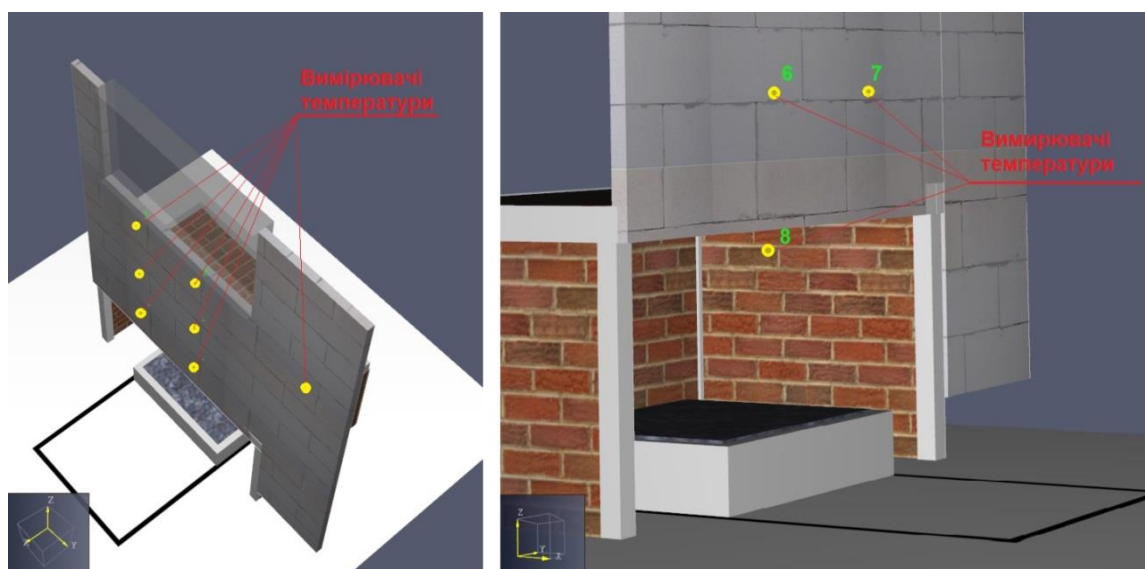


Рисунок 6.3 – Зони встановлення вимірювачів температури на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду та у вогневій камері



Під час створення моделі металевого дека модельного вогнища пожежі класу 34В для забезпечення необхідного температурного режиму у вогневій камері та відповідного температурного впливу на досліджуваний фрагмент фасаду здійснено верифікацію створеної моделі вогнища пожежі із натурною імітаційною моделлю [247;264;265]. Слід зазначити, що для забезпечення нормальних розрахункових процесів програми FDS, комірки сітки повинні мати правильну, рівнопропорційну кубічну форму. Враховуючи те, що дека має круглу форму загальною площею  $1,07 \text{ м}^2$  (діаметр  $1170 \pm 10 \text{ мм}$ ), для забезпечення належного розрахункового процесу прийнято рішення відтворити модель модельного вогнища пожежі у прямокутній формі з висотою борту дека  $230 \pm 5 \text{ мм}$  та із аналогічною площею горіння. На рис. 6.4 наведено візуалізацію процесу оцінки адекватності створеного модельного вогнища пожежі на основі результатів натурних імітаційних досліджень.



Рисунок 6.4 - Верифікація створеної моделі вогнища пожежі

За результатом проведеної серії натурних імітаційних досліджень (трьох повно-факторних випробувань) отримано графіки температурного режиму у вогневій камері та порівняно результати із даними створеної математичної

моделі Установки. За результатом аналізу побудовано графіки температурних кривих, які наведено на рис. 6.5.

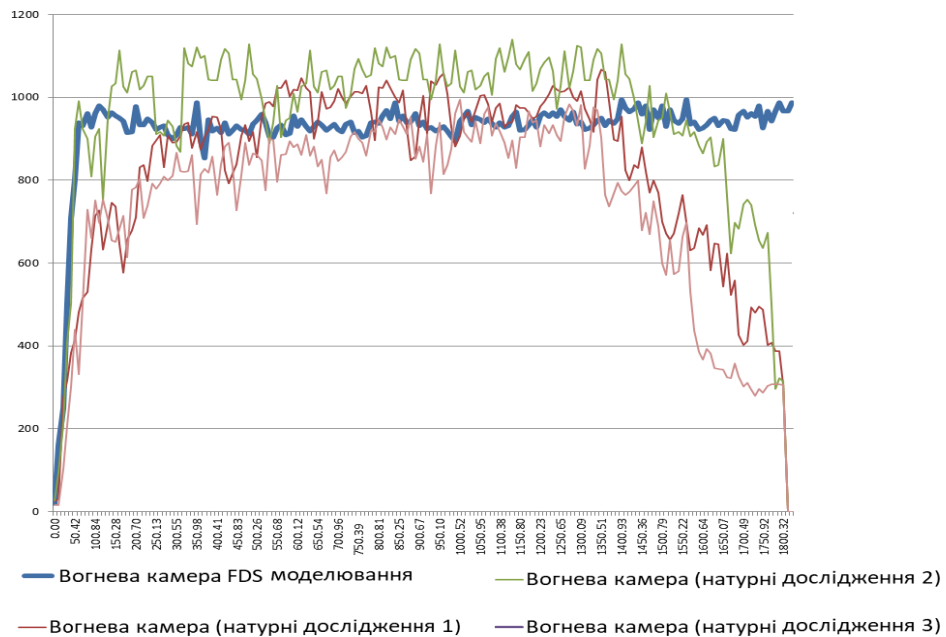


Рисунок 6.5 – Порівняння результатів експериментальних даних (зелена, червона та пурпурна крива) та отриманих результатів створеної газо-гідродинамічної моделі щодо температурного режиму у вогневій камері (синя крива)

Отримані результати експериментальних досліджень свідчать, що продовж 30 хвилинного горіння модельного вогнища пожежі класу В із використанням дека модельного вогнища пожежі класу 34В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup> з площею пожежі 1,1 м<sup>2</sup> у вогневій камері температура в зоні її поширення на досліджуваний фрагмент фасаду збільшується по експоненційному розподілу.

З метою визначення середніх відхилень значення *i*-го дослідження від середнього значення всіх досліджень визначено середнє абсолютне відхилення за формулою 6.1 [188]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (6.1)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках та з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 6.2 [188]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\%. \quad (6.2)$$

Для визначення ступеня розсіювання значень випадкової величини ( $x_i$ ) відносно її математичного сподівання ( $\bar{x}_i$ ) та мінливості вибірки обчислено середнє квадратичне відхилення результатів досліджень за формулою 6.3 [188]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}} \quad (6.3)$$

На рис. 6.6 наведено нелінійні залежності середньоквадратичного відхилення між температурними даними за результатом серії натурних досліджень та даними температурного режиму за результатом математичного моделювання.

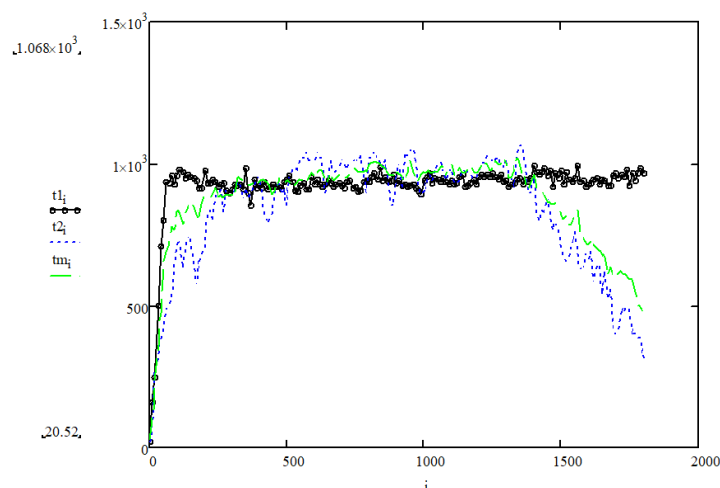


Рисунок 6.6 - Поліноміальна регресія температурного режиму у вогневій камері за натурних випробувань та даними температурного режиму за комп'ютерним моделюванням

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 6.5 [188]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{s_j} \quad (6.5)$$

За результатом розрахункових операцій значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [188], які для чотирьох досліджень відповідно становлять 1,481 та 1,496. Якщо після порівняння  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ( $G_{кр.5\%}$ ) і менше (або дорівнює) 1 %-го ( $G_{кр.1\%}$ ) критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), тоді значення  $y_{jmax}$  або  $y_{jmin}$  вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  більше 1 %-го критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), то відповідно  $y_{jmax}$  або  $y_{jmin}$  вважають викидом. Якщо розраховані значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ( $G_{кр.5\%}$ ), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів. Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рис. 6.7.

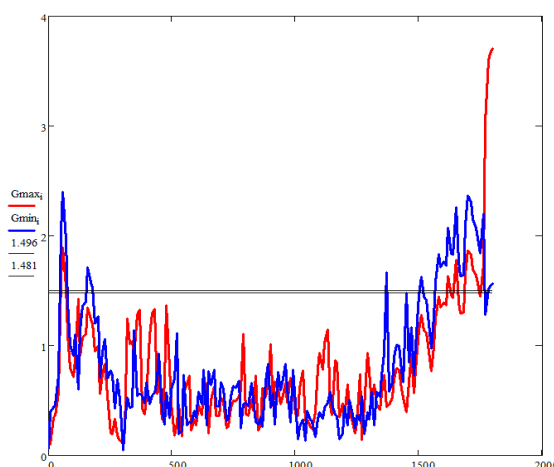


Рисунок 6.7 – Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса для термопарі розміщеної у вогневій камері

За результатом аналізу отриманих результатів можна зробити попередній висновок, що отримані експериментальні дані за термопарою розміщеною у вогневій камері мітять окремі випадки викидів та квазівикидів, які ми виключаємо та переходимо до наступного етапу.

З метою перевірки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою 6.6 [188]:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}, \quad (6.6)$$

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

Дисперсії відхилень по середнім значенням термопар, що порівнювалися (результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень) наведені на рис. 6.8.

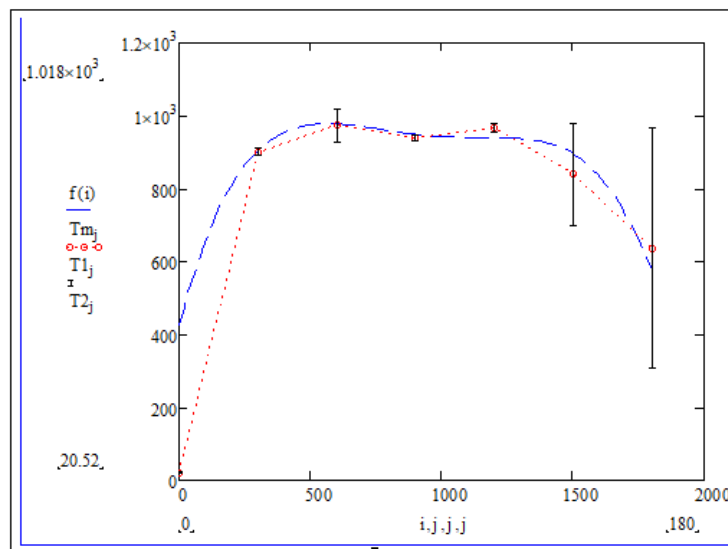


Рисунок 6.8 - Дисперсії відхилень для залежності середніх значень термопар за результатом серії натурних досліджень (червона крива) та даними температурного режиму за комп'ютерним моделюванням (синя крива)

Отримані дані щодо середніх абсолютних відхилень, середніх відносних відхилень, середніх квадратичних відхилень між даними отриманими для термопари у вогневій камері та даних для термопари за математичним моделюванням наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопари у вогневій камері за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням

№ п/п	Тип термопари	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С
1.	Порівняння даних термопари за FDS моделюванням та дані середнього значення термопари за натурними дослідженнями	105,6	12,7	85,1

Таким чином статистика досліджень свідчить, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують 85,1 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 12,7 %, середньоквадратичні відхилення становлять 105,6 °С, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки. Таким чином, збіжність створеної математичної моделі модельного вогнища пожежі класу В та відповідно температурного режиму у вогневій камері можна вважати достатньою.

Перевіримо належність дисперсій, отриманих під час проведення досліджень до однієї генеральної сукупності.

Для проведення оцінювання дисперсій висуваємо нуль-гіпотезу, тобто припускають, що різниця між дисперсіями результатів досліджень дорівнює нулю і дані, отримані під час досліджень є вибірками з генеральної сукупності. При цьому розраховуємо коефіцієнт Фішера [188] за формулою 6.7:

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} = F, \quad (6.7)$$

де  $S_1^2, S_2^2$  - середньоквадратичне відхилення для вибірки із найбільшими значеннями отриманими під час досліджень та найменшими.

Розраховане значення коефіцієнта F порівнюють з табличним значенням [188]. Для цього задаються рівнем статистичної значущості  $q$  % (зазвичай це 5 %) і для кількості ступенів свободи  $k_1 = n_1 - 1$  та  $k_2 = n_2 - 1$  визначають табличне значення  $F_{q,k_1,k_2}$ , яке для вибірки із п'яти експериментальних досліджень становить для 5% меж – 6,39 для 1% меж – 15,98.

В разі забезпечення умови, при якій задовольняється нерівність  $F \leq F_{q,k_1,k_2}$ , то для наявних даних можна вважати, що зі статистичною надійністю  $P = 1 - \frac{q}{100}$ , дані не заперечують нуль-гіпотезі, тобто різниця між дисперсіями результатів досліджень можна вважати незначною і можливо пояснити впливом випадкових чинників та обмеженим обсягом даних. Таким чином, дані, отримані під час досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності. Якщо,  $F \leq F_{q,k_1,k_2}$ , то на підставі отриманих результатів нуль-гіпотезу відкидають і розбіжність між дисперсіями результатів досліджень вважають суттєвою, тобто, такі дані не належать до однієї генеральної сукупності. Результати розрахунків критерію Фішера представлені у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 - Результати перевірки належності дисперсій, отриманих під час досліджень до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера

№ п/п	Номер термопар	Табличне значення критерію Фішера	Розрахункове значення критерію Фішера	Висновок
1.	T1	5%* - 6,39 1% - 15,98	1,542	Розрахункове значення критерію Фішера не перевищує 5% критичне (табличне) значення, отже дані досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності

Враховуючи, що розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що отримані дані температур термопари за результатом серії натурних досліджень не заперечують нуль гіпотезі, а їх розбіжність можна вважати не суттєвою. Таким чином дані, що отримані за результатами експериментального дослідження, є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експерименту.

Наступним етапом верифікації розробленої математичної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель є дослідження та порівняння температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду попередньо отриманих в результаті натурних досліджень та температурних розподілів отриманих на основі створеної математичної моделі за аналогічних умов досліджень.

Під час верифікації створеної математичної моделі відтворено відповідні параметри навколишнього середовища, які відповідають реальним умовам проведення натурних імітаційних досліджень, а саме:

- температура – 25 °С;
- відносна вологість повітря – 65 % ;
- атмосферний тиск – 101300 Па.

Окремим питанням моделювання є відтворення вітрових навантажень. Слід відзначити, що під час проведення натурних імітаційних досліджень установка для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель знаходилася в огороженому вогневому боксі з 3 сторін та відкритим простором зверху. За даних умов вплив вітру був мінімізований, що дозволяло отримати більш точні розподіли температури на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду [209]. Разом із тим, певний незначний вплив вітрових потоків спостерігався, що видно по розсіянню значень величини температури у вогневій камері відносно середнього значення температурного розподілу (рисунок).



Таким чином, для отримання більш точних результатів під час моделювання вітровий вплив не моделюється, як такий, що створює зменшення густини і однорідності теплового потоку та зменшує висоту факелу пожежі. Крім того, вітер що має направлення в сторону досліджуваного фрагменту фасаду, створюватиме підпір та зону підвищеного тиску, при якому холодне повітря через завихрення потраплятиме в зону прогріву фасаду і відповідно буде охолоджувати досліджуваний фрагмент.

Моделювання проводилося згідно методики експериментальних досліджень з оцінки обмеження впливу пожежі від джерела теплового випромінювання на фасадні системи з дотриманням всіх визначених параметрів. На рис. 6.9 наведено візуалізацію моделі та фото фрагменту натурних випробувань.

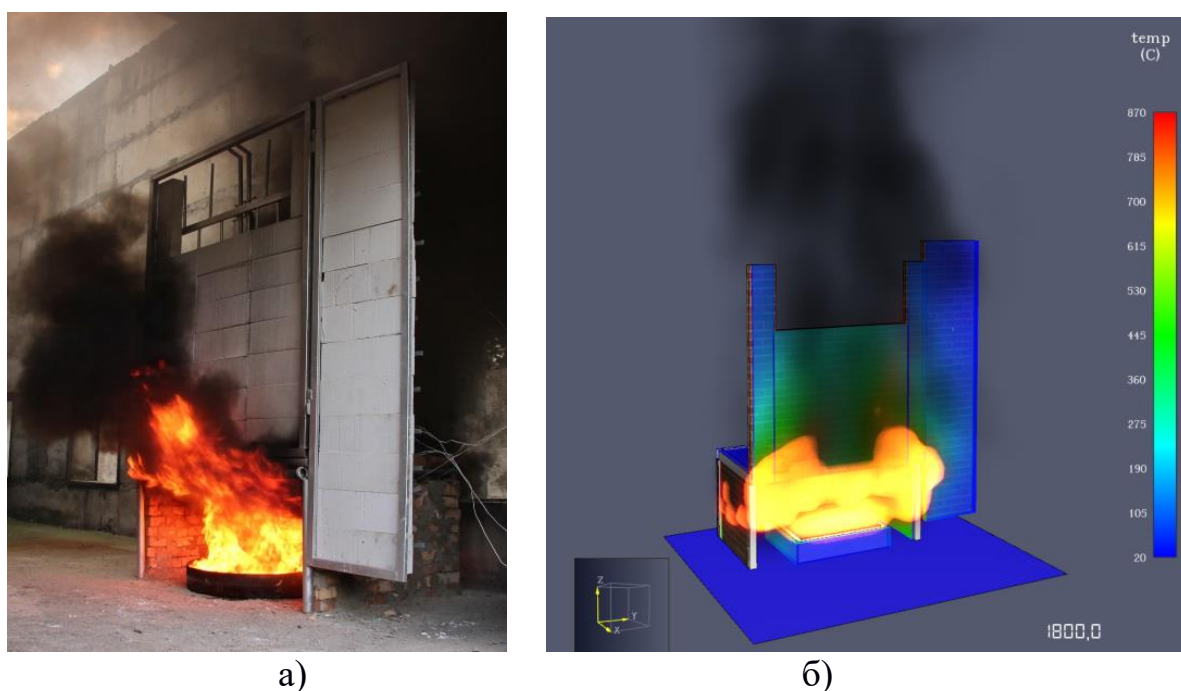


Рисунок 6.9 – Візуалізація FDS моделі та натурних експериментальних досліджень: а) натурні імітаційні випробування; б) створена комп'ютерна газо-гідродинамічна модель Установки за аналогічними умовами досліджень

За результатом проведених розрахункових дій та експериментальних досліджень, та з метою визначення збіжності результатів для FDS моделі та створеної Установки, побудовані графіки порівнянь для кожної термопари

розміщеної на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду. Результати порівнянь для кожної термопари наведені на рис. 6.10-6.16.

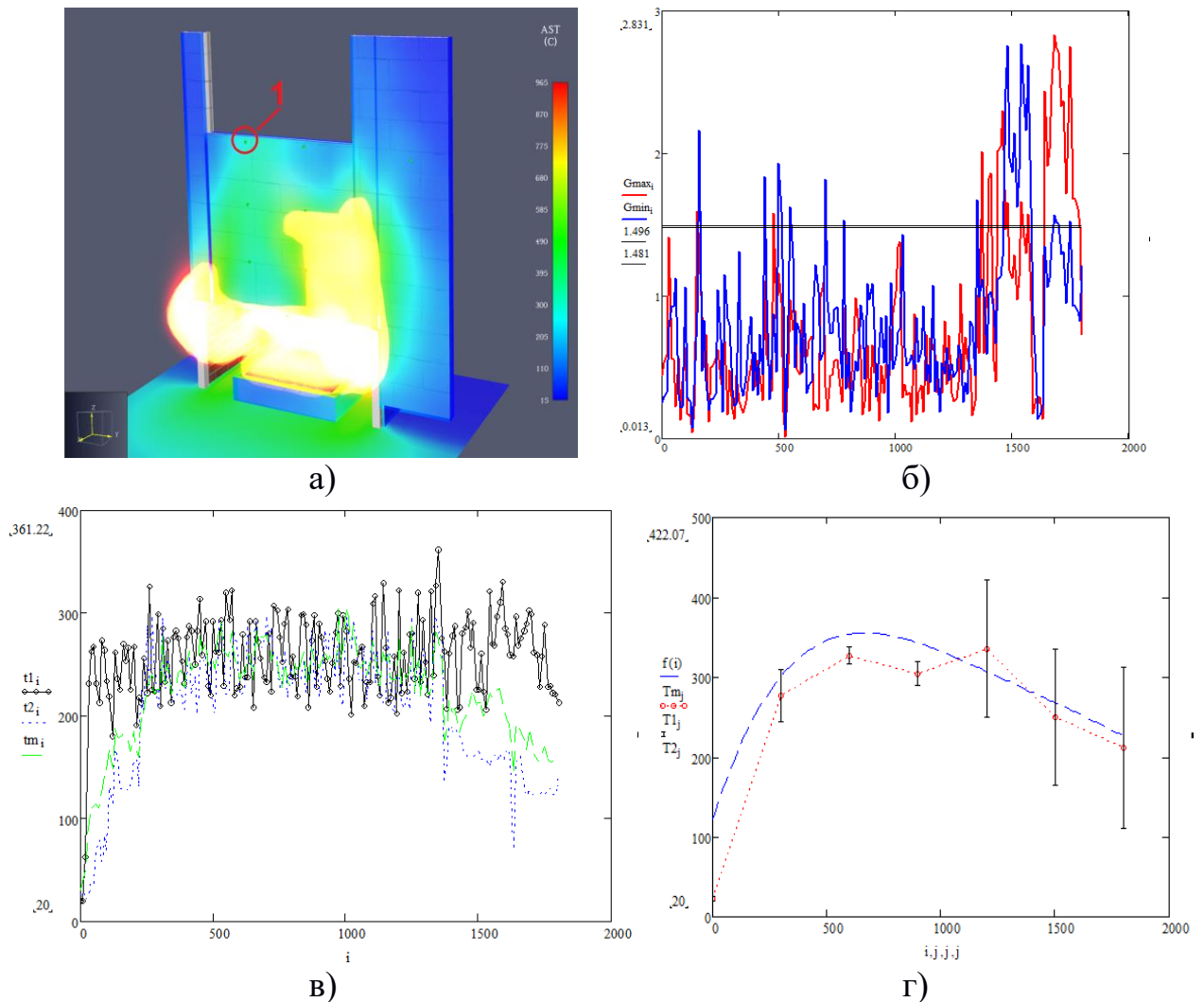
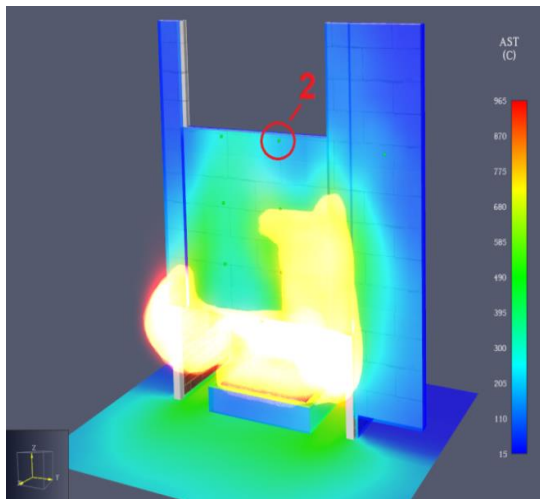


Рисунок 6.10 – Результати експериментальних досліджень для термопари №1:  
 а) зона розміщення термопари, що порівнюється з дослідним зразком; б)  
 результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за  
 критерієм Граббса; в) температурні показники термопари за результатом  
 експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопари №1.

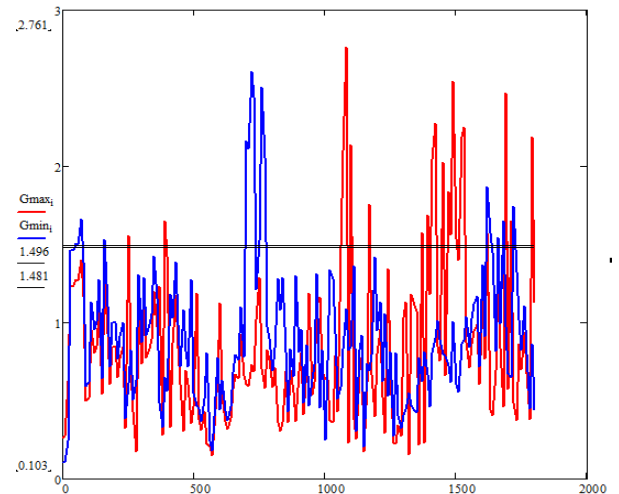
За результатами отриманих даних узагальнено дані щодо отриманих значень абсолютних відхилень, відносних відхилень, квадратичних відхилень для термопари №1 за результатом реалізації газо-гідродинамічної моделі FDS, що приведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

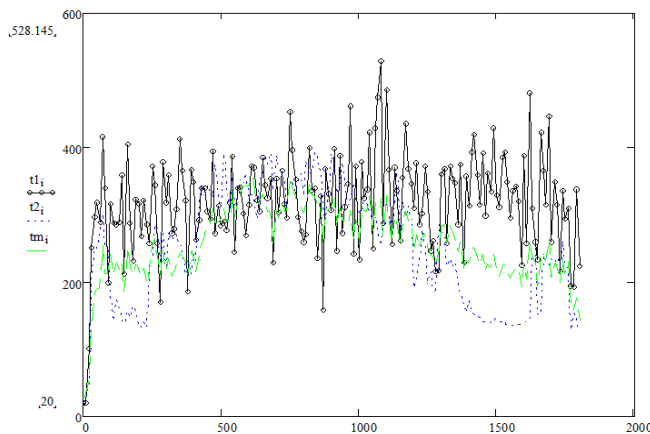
№ термопари	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
1	46,1	20,1	47,2	2,3



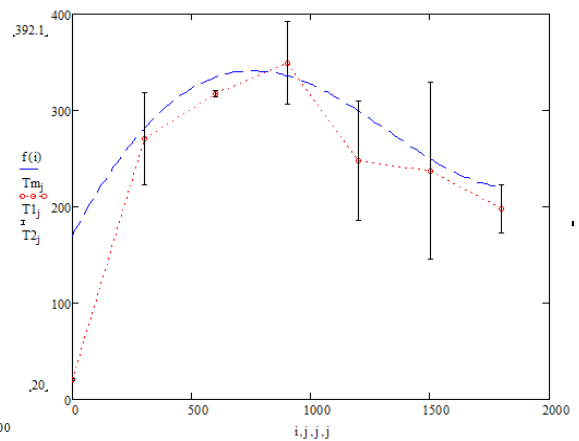
а)



б)



в)



г)

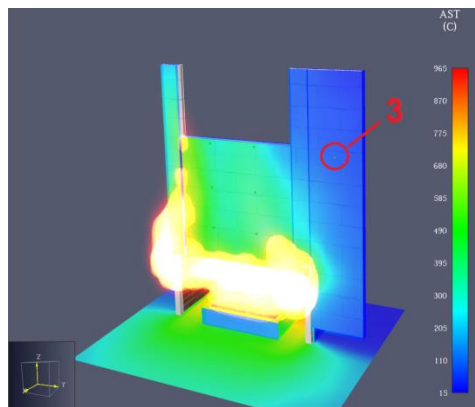
Рисунок 6.11 – Результати експериментальних досліджень для термопари №2:

- а) зона розміщення термопари, що порівнюється з дослідним зразком; б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопари за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопари №2.

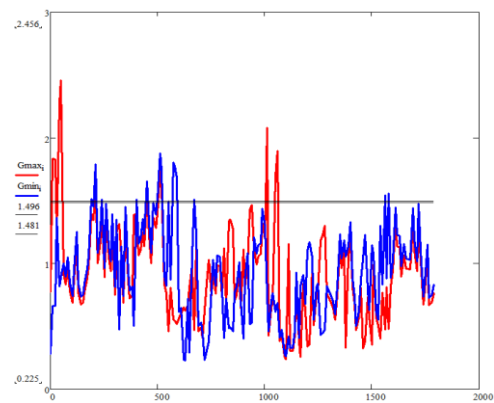
В табл. 6.4 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопар 2 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.4 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

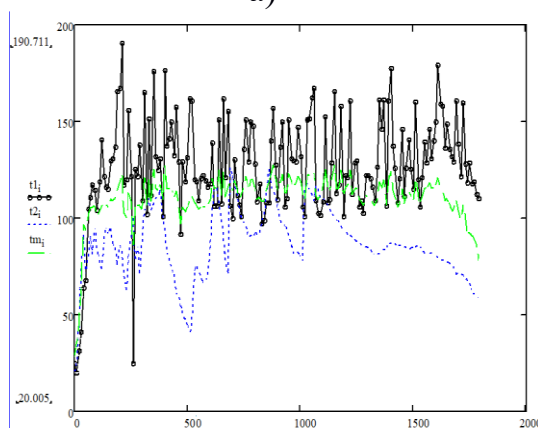
№ термопар	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
2	33,3	21,6	35,45	2,37



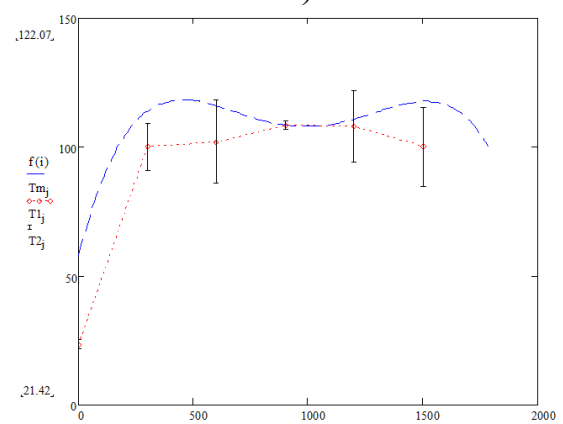
а)



б)



в)



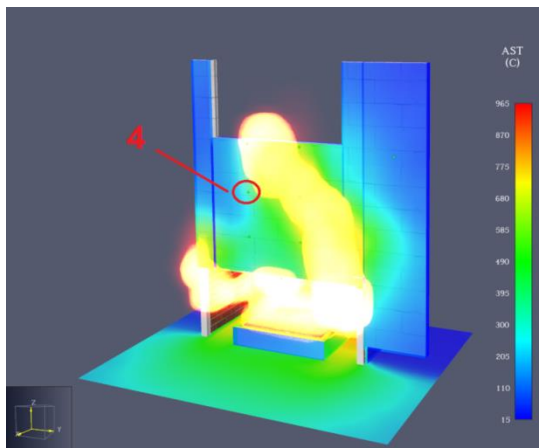
г)

Рисунок 6.12 – Результати експериментальних досліджень для термопар №3: а) зона розміщення термопар, що порівнюється з дослідним зразком; б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазивикидів за критерієм Граббса; в) температурні показники термопар за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопар №3

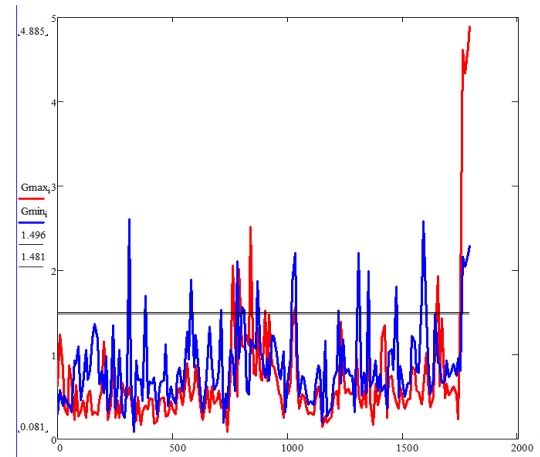
В табл. 6.5 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопар 3 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.5 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

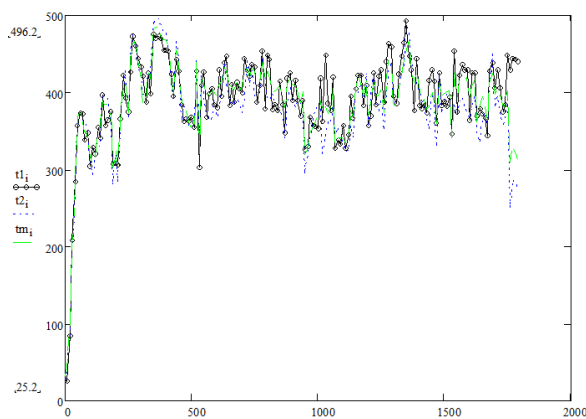
№ термопар	Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °C	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
3	21,2	19,2	22,1	1,16



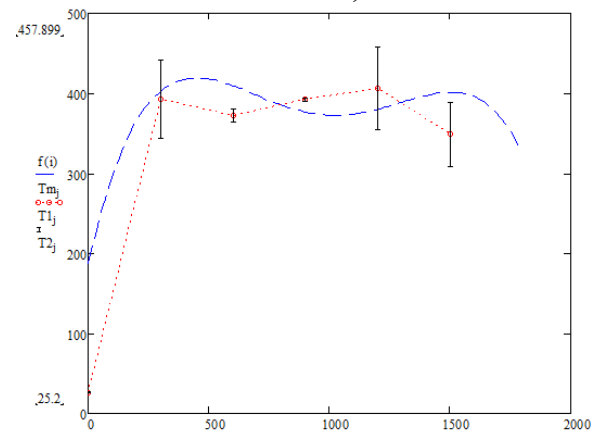
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.13 – Результати експериментальних досліджень для термопар №4:

а) зона розміщення термопар, що порівнюється з дослідним зразком;

б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за

критерієм Граббса; в) температурні показники термопарі за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі №4.

В табл. 6.6 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопарі 4 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.6 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

№ термопарі	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
4	18,7	5,1	22,87	1,29

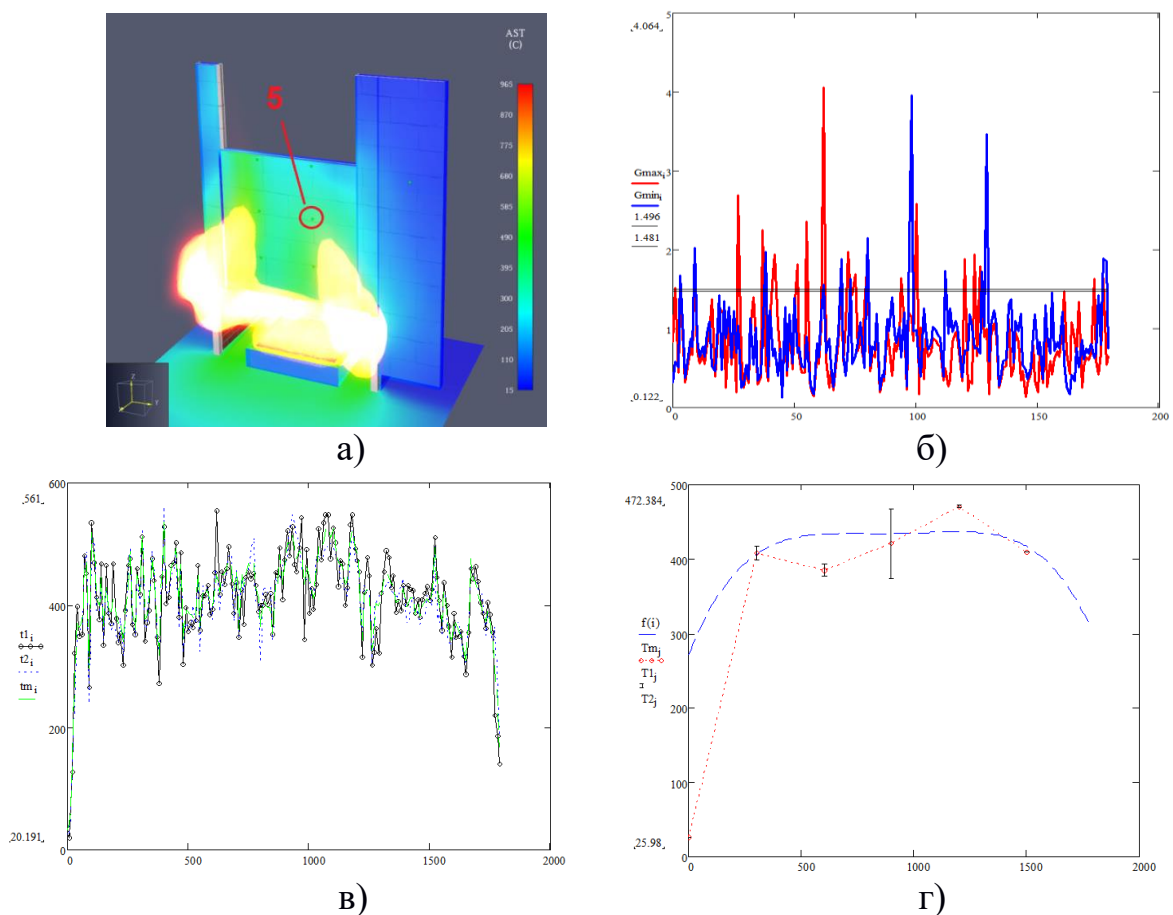


Рисунок 6.14 – Результати експериментальних досліджень для термопарі №5:

а) зона розміщення термопарі, що порівнюється з дослідним зразком; б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за

критерієм Граббса; в) температурні показники термопар за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі №5.

В табл. 6.7 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопарі 5 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.7 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

№ термопарі	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
5	21,16	5,5	23,86	1,23

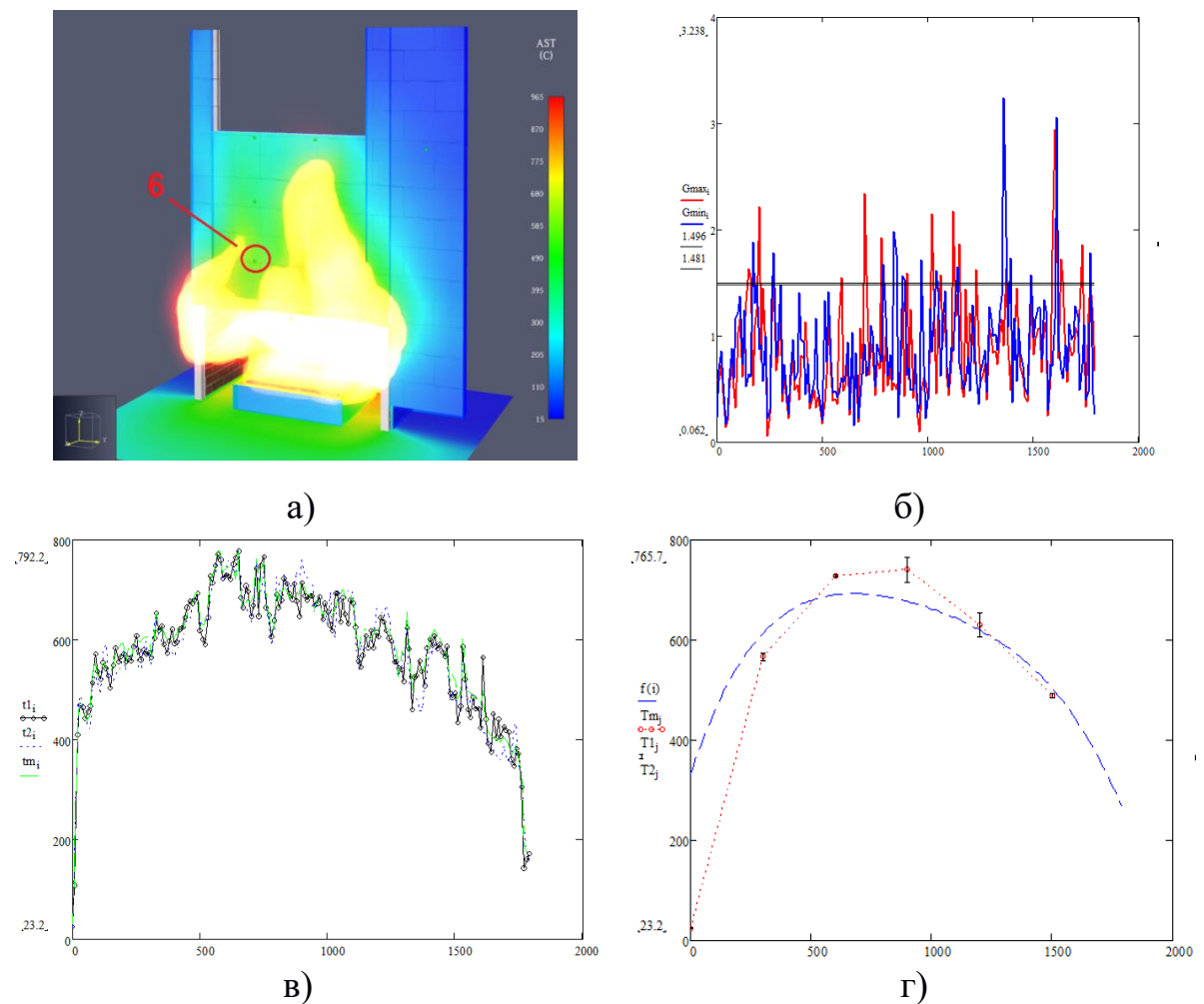


Рисунок 6.15 – Результати експериментальних досліджень для термопарі №6:

а) зона розміщення термопарі, що порівнюється з дослідним зразком; б)

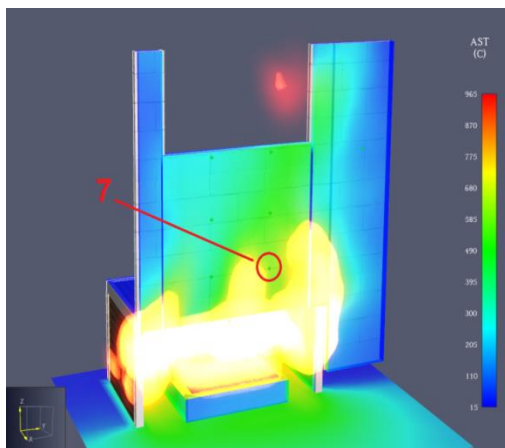
Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за

критерієм Граббса; в) температурні показники термопар за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопарі №6

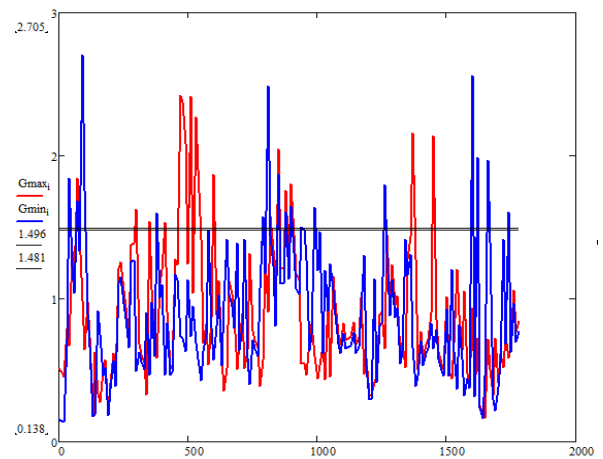
В табл. 6.8 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопарі 6 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.8 - Результати перевірки адекватності розробленої комп'ютерної моделі

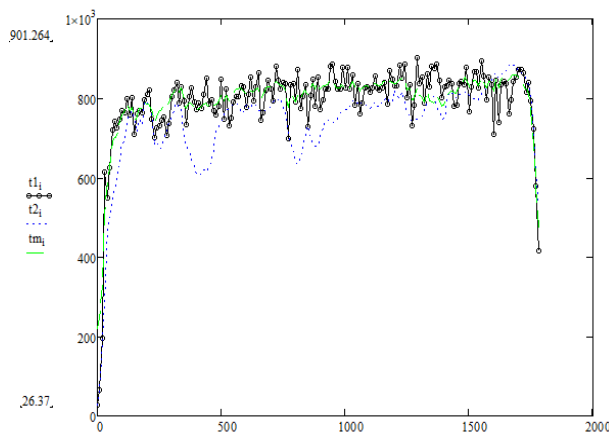
№ термопарі	Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °C	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
6	26,14	4,6	27,85	1,37



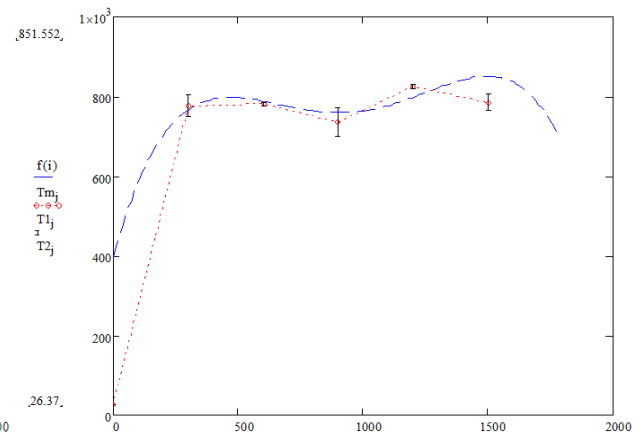
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.16 – Результати експериментальних досліджень для термопарі №7:

а) зона розміщення термопарі, що порівнюється з дослідним зразком; б) Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за



критерієм Граббса; в) температурні показники термопари за результатом експериментальних досліджень; г) дисперсії відхилень для термопари №7.

В табл. 6.9 наведено абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для термопари 7 за результатом серії випробувань та за математичним моделюванням.

Таблиця 6.9 - Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

№ термопари	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньо квадратичні відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
7	33,7	4,75	40,02	0,83

За результатом проведення оцінки адекватності розробленої газо-гідродинамічної моделі моделі та порівняння її властивостей з результатами експериментальних досліджень за термопарами Т1-Т8, включно з термопарою, яка контролює температурний режим у вогневій камері Установки встановлено, що дані термопари містять викиди та квазівикиди, які ми виключаємо та переходимо до подальшого оброблення результатів експериментальних досліджень.

Узагальнення отриманих даних щодо оцінки адекватності для термопар Т1-Т8 здійснено за такими критеріями: абсолютні відхилення, відносні відхилення, середньоквадратичні відхилення. Отримані дані, щодо перевірки адекватності розробленої газо-гідродинамічної моделі приведені в табл. 6.10.

Таблиця 6.10 - Узагальнені результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

н/п	№ термопари	Абсолютне відхилення, °С	Відносне відхилення, %	Середнє квадратичне відхилення, °С	Критерій Фішера 5%* - 6,39 1% - 15,98
1.	Т1	46,1	20,1	47,22	2,31

## Продовження таблиці 6.10

2.	T2	33,3	21,6	35,45	2,37
3.	T3	21,2	19,2	22,12	1,16
4.	T4	18,7	5,1	22,87	1,29
5.	T5	21,2	5,5	23,86	1,23
6.	T6	26,1	4,6	27,85	1,37
7.	T7	33,7	4,75	40,23	0,83
8.	T8 (вогнева камера)	105,6	12,7	85,13	1,54
Діапазон відхилень		18,7÷46,1	4,6÷21,6	22,12÷47,22	0,83÷2,37
Середні значення		38,2	11,7	38,09	1,51

Таким чином абсолютні відхилення між результатами комп'ютерного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 38,2 °С, що відсоткових показниках не перевищує 11,7 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 23÷48 °С, що вказує на те, що дані комп'ютерного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність створеної газо-гідродинамічної моделі та кожного окремого експериментального дослідження.

## 6.2 Дослідження закономірностей впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні

На основі розробленої газо-гідродинамічної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель проведено дослідження та порівняння температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду в разі зміни кута прилягання суміжної площини відносно основного

фрагменту фасаду. Під час проведення розрахункових операцій досліджувались наступні кути прилягання:  $180^\circ$  (горизонтальна площина);  $145^\circ$  та  $90^\circ$ . На рис. 6.17 наведено візуалізацію моделі для визначених конструктивних параметрів.

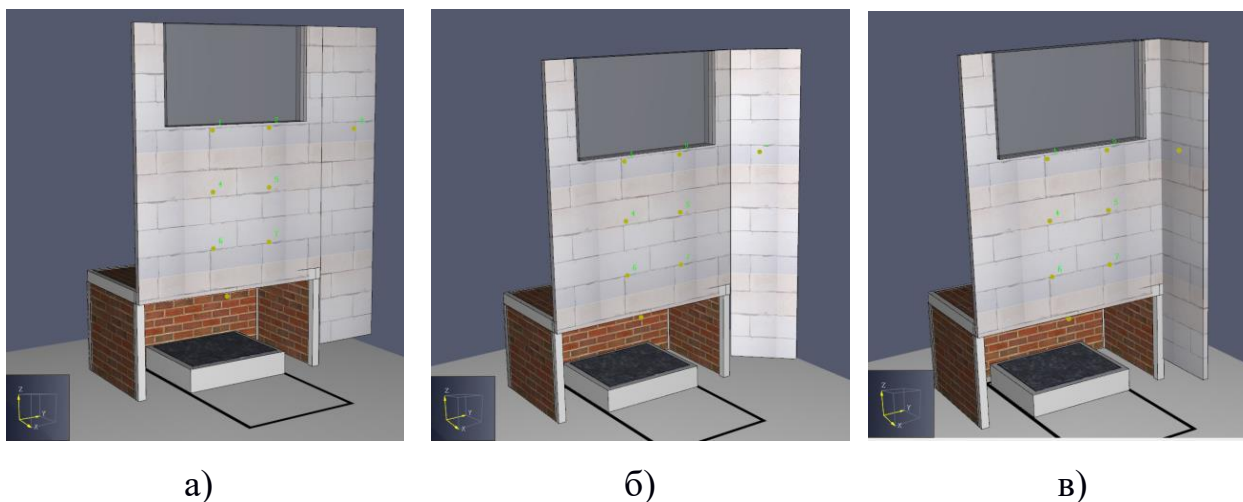


Рисунок 6.17 – зовнішній вигляд моделі під час дослідження впливу прилеглого кута на зміну температур на поверхні фасаду:

- а) прилеглий фасад під кутом  $180^\circ$ ; б) прилеглий фасад під кутом  $145^\circ$ ;  
в) прилеглий фасад під кутом  $90^\circ$

Даний етап моделювання проводився згідно із методикою експериментальних досліджень з оцінки впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж 1800 с. Під час проведення моделювання будувалися графіки для кожної досліджуваної зони фрагменту фасаду, а саме на рівнях від краю вогневої камери 400 мм, 800 мм, 1400 мм. За результатом моделювання фіксується найбільше значення температури, яке було досягнуто в зоні кожної досліджуваної ділянки фасаду. На рис. 6.18 наведено вплив конструктивних параметрів прилеглої фасадної площини на характер температурних розподілів на досліджуваному фрагменті фасаду.

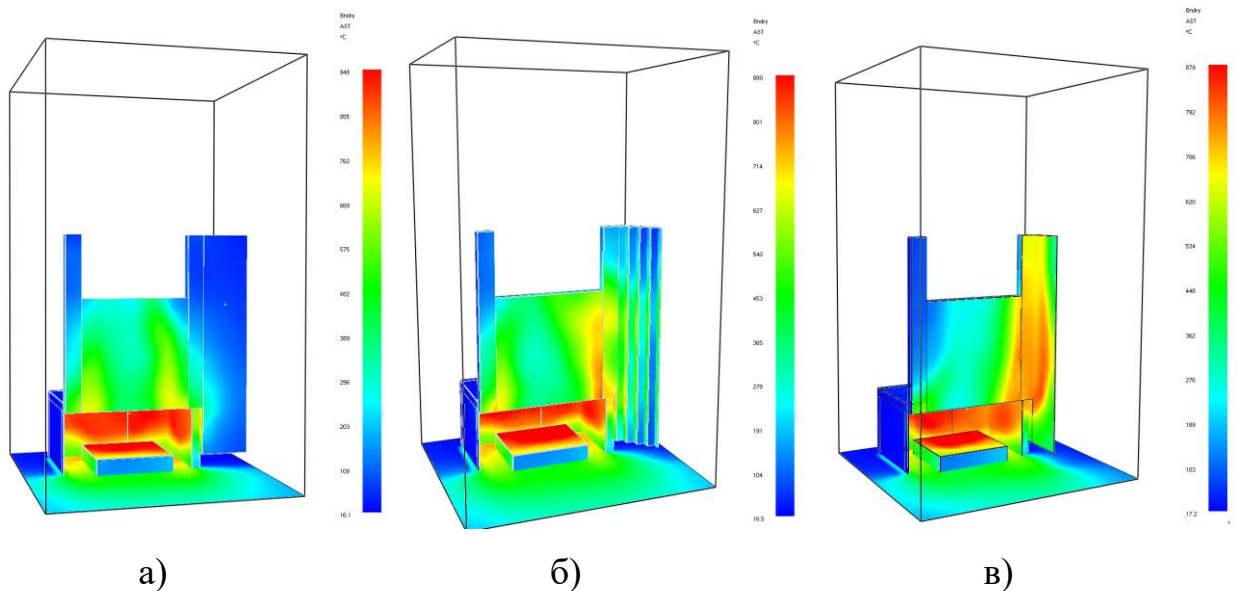


Рисунок 6.18 – візуалізація залежностей зміни температурних розподілів на поверхні фасаду в залежності від зміни параметру прилеглого кута: а) прилеглий фасад під кутом  $180^\circ$ ; б) прилеглий фасад під кутом  $145^\circ$ ; в) прилеглий фасад під кутом  $90^\circ$ .

На основі отриманих температурних розподілів на поверхні досліджуваного фрагменту фасаду при різних кутах прилягання суміжно розташованої площини та даних щодо температурного режиму на досліджуваних зонах, а саме для рівнів від краю вогневої камери 400 мм, 800 мм, 1400 мм побудовано відповідні графіки температурних залежностей. Під час побудови графіків, за основу бралися максимальні значення температури зафіксованої під час всієї тривалості моделювання, що відповідає найгіршим умовам поширення пожежі.

Отримані результати дозволяють проаналізувати отримані закономірності зміни температури біля поверхні фасаду на досліджуваних рівнях при різних кутах прилягання суміжної площини. Отримані температурні залежності наведено на рис. 6.19.

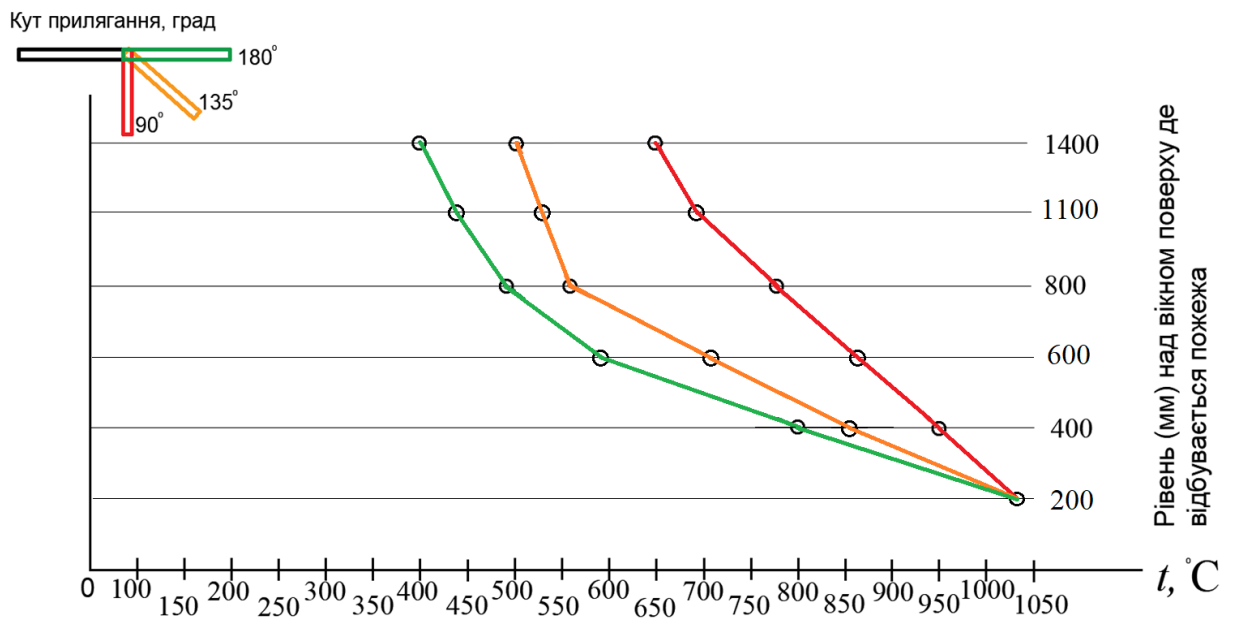


Рисунок 6.19 – графіки залежностей температурних розподілів на поверхні фасаду в залежності від зміни параметру прилеглого кута для кожного рівня фасаду

Результати за першим етапом моделювання демонструють, що належність кута прилягання від суміжної площини значно впливає на збільшення значення температури. Для кожного досліджуваного рівня фасаду спостерігалось підвищення температури до 15% при значенні кута прилеглого фасаду  $145^\circ$ . При значенні кута прилеглого фасаду  $90^\circ$  підвищення температури спостерігалось до 35% у порівнянні із фасадом розміщеним абсолютно горизонтально.

Наступний етап моделювання стосувався дослідження закономірностей впливу параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні при зміні ухилу фасаду. Під час проведення розрахункових операцій досліджувались наступні кути ухилу фасаду:  $180^\circ$  (вертикальна площина);  $-20^\circ$ ;  $-10^\circ$  та  $+10^\circ$ ;  $+20^\circ$  відносно вертикалі. На рис. 6.20 наведено візуалізацію відтворених моделей для визначених конструктивних параметрів під час даного етапу дослідження.

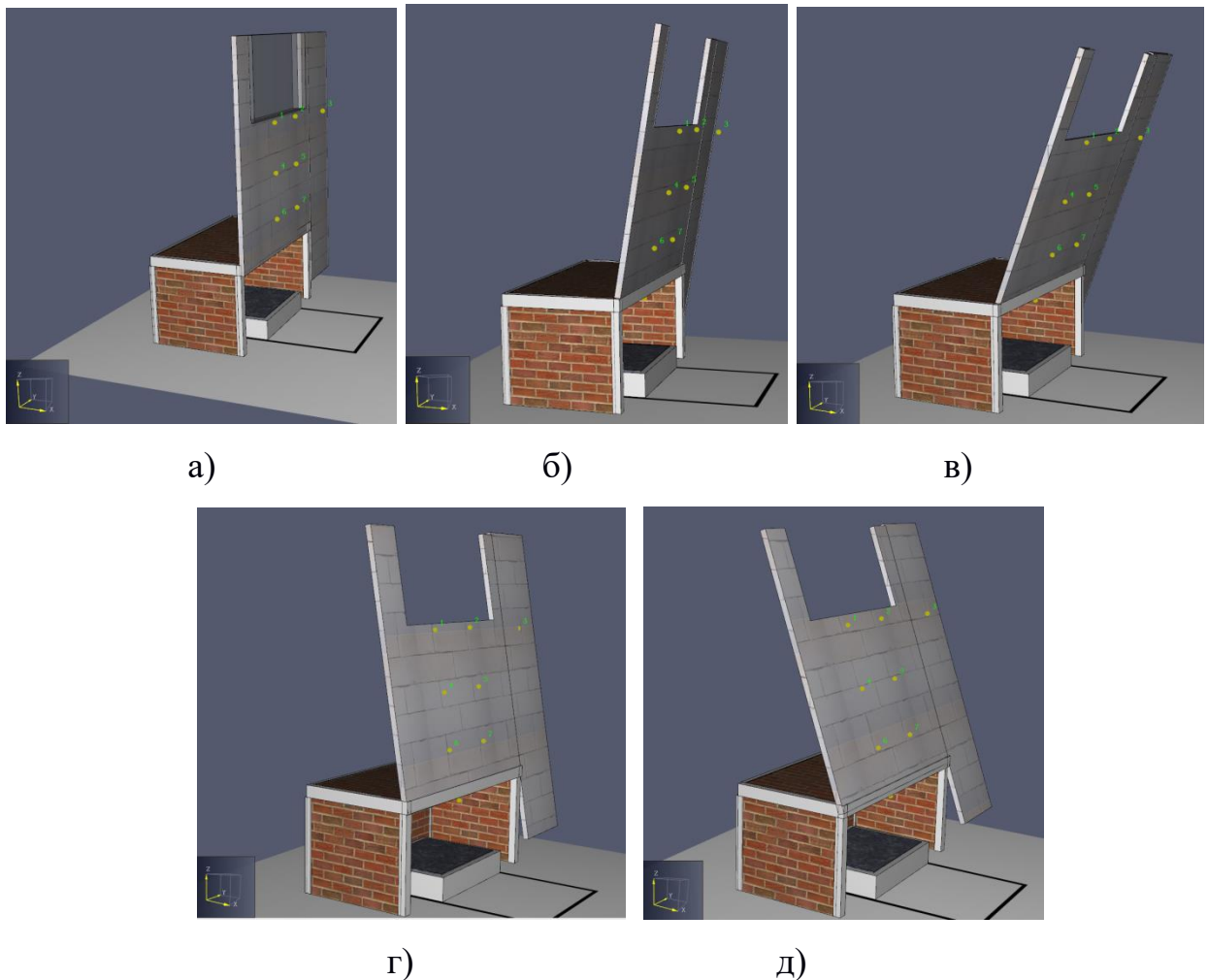


Рисунок 6.20 – візуалізація вихідної моделі стенду для дослідження зміни температурних розподілів на поверхні фасаду в залежності від зміни кута його ухилу : а) фасад розміщено вертикально; б) фасад розміщено під кутом  $+10^\circ$ ; в) фасад розміщено під кутом  $+20^\circ$ ; г) фасад розміщено під кутом  $-10^\circ$ ; д) фасад розміщено під кутом  $-20^\circ$

Даний етап моделювання також проводився згідно із методикою експериментальних досліджень з оцінки впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж 1800 с. За результатом проведення моделювання під визначеними кутами ухилу будувалися графіки для кожної досліджуваної зони фрагменту фасаду, а саме на рівнях від краю вогневої камери 400 мм, 800 мм, 1400 мм.

За результатом моделювання фіксується найбільше значення температури, яке було досягнуто в зоні кожної досліджуваної ділянки фасаду.

На рис. 6.21 наведено вплив ухилу площини відносно вертикалі на характер температурних розподілів на досліджуваному фрагменті фасаду.

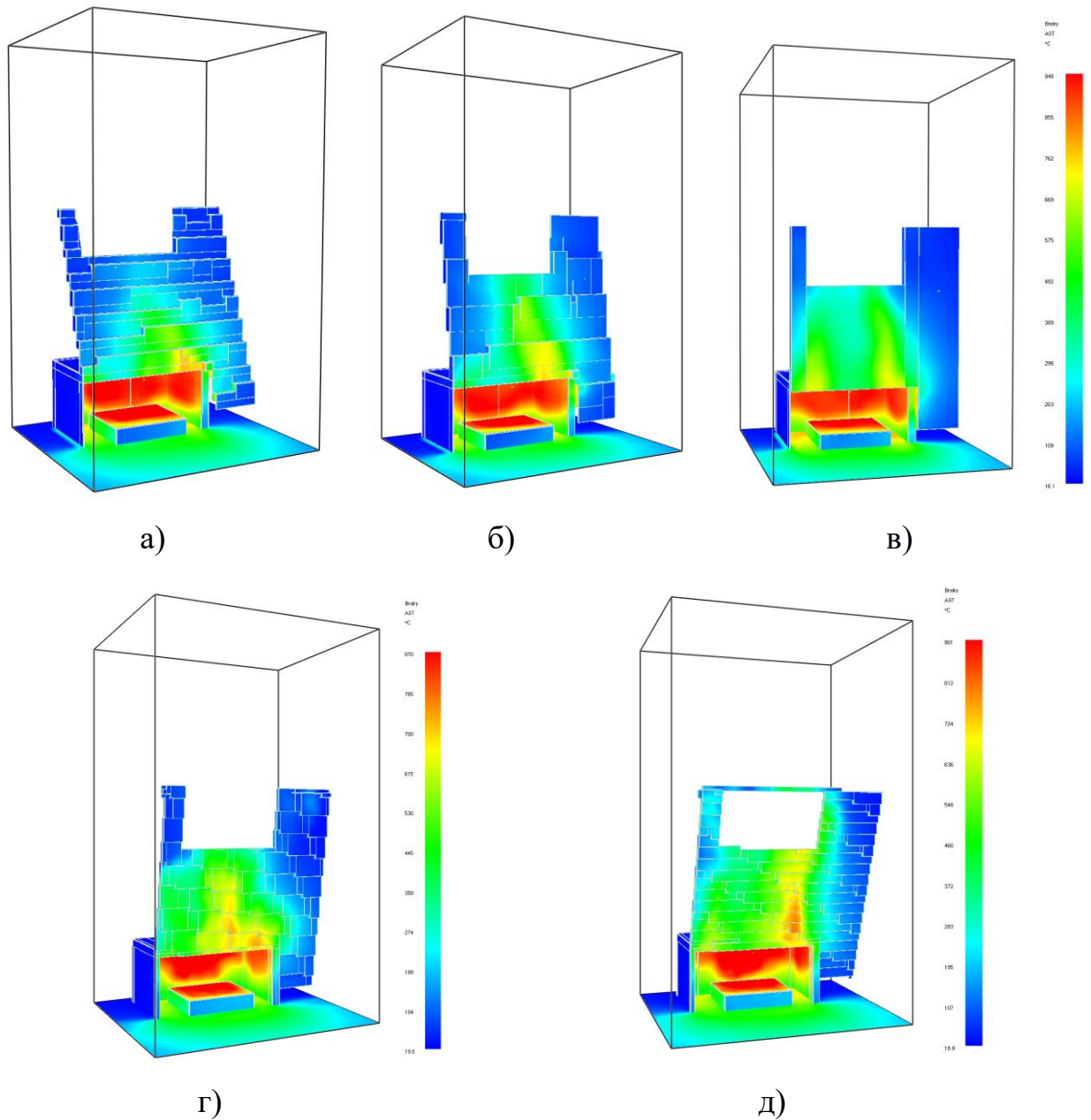


Рисунок 6.21 – візуалізація залежностей зміни температурних розподілів на поверхні фасаду в залежності від кута нахилу його площини: а) фасад розміщено вертикально; б) фасад розміщено під кутом  $+10^\circ$ ; в) фасад розміщено під кутом  $+20^\circ$ ; г) фасад розміщено під кутом  $-10^\circ$ ; д) фасад розміщено під кутом  $-20^\circ$

За результатами отриманих температурних розподілів побудовано графіки залежностей зміни максимальної температури на поверхні кожного досліджуваного рівня фасаду, типи яких позначено відповідним кольором в залежності від кута їх нахилу. Отримані графіки наведено на рис. 6.22.

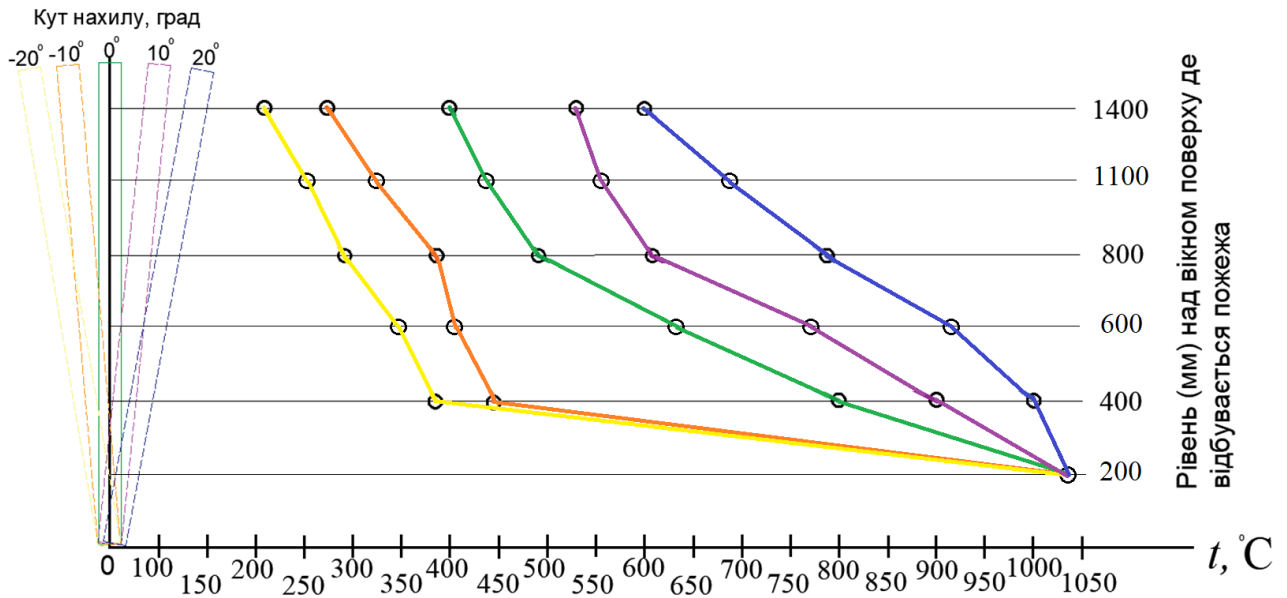


Рисунок 6.22 – графіки залежностей зміни максимальної значення температури біля поверхні фасаду в залежності від кута його ухилу, де колір кривої відповідає кольору нахиленого фасаду

Отримані дані та побудовані температурні залежності, які отримані за допомогою розробленої комп'ютерної моделі, що відтворює умови натурних випробувань дозволили отримати закономірності впливу зміни параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на процеси зміни температур на їх поверхні.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що для фасаду будівлі, який має кут прилягання суміжного фасаду від  $180^\circ$  (тобто без кута прилягання) до кута  $90^\circ$  під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В із використанням з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  з площею горіння  $1,1 \text{ м}^2$  у вогневій камері, значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на висоті 400-1400 мм від факелу пожежі



може збільшуватися до 250 °С, що складає близько 22-27% від загального температурного режиму пожежі.

Підтверджено, що для фасаду будівлі, який може знаходитися під кутом від -20° до +20° відносно вертикалі, під час 30 хвилинного впливу пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup> та з площею горіння 1,1 м<sup>2</sup> значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на висоті 1400 мм від факелу пожежі може змінюватися в 1,6-1,9 рази, як в сторону збільшення (для кутів від 0° до -20°) так і зменшення (для кутів від 0° до +20°) відносно значення температури 375-400 °С для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально [266].

### **6.3 Дослідження закономірностей обмеження поширення пожежі за допомогою фасадних протипожежних перешкод**

Наступним етапом моделювання є дослідження ефективності заходів з обмеження поширення пожежі за допомогою фасадних протипожежних перешкод, а також виявлення та систематизування відповідних закономірностей. Дослідження проводився згідно із методикою експериментальних досліджень з оцінки впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі та зрахуванням даних висвітлених в дослідженнях [267-273]. Під час даного етапу роботи розглядалися фасадні протипожежні перешкоди пасивного типу, а саме протипожежні карнизи шириною 0,3м; 0,75м та 1,5 м [274]. Ширина даних карнизів обумовлена чинними нормативними вимогами, які висуваються до будинків житлового, громадського та адміністративного призначення з умовною висотою вище 47 м.

В якості фасадної протипожежної перешкоди активного типу використано протипожежний карниз шириною 0,3 м та дренчерний зрошувач із направляючою лопаткою та інтенсивністю зрошення 5 мм/хв (0,083 л/с·м<sup>2</sup>) [275-277]. Відповідно до програми-методики наведеної в розділі 4, активація

системи дренчерного пожежогасіння відбувалася через 10 хвилин після початку горіння вогнища пожежі класу В, що відповідає мінімальному нормативному значенню прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на пожежу у місті [147].

На рис. 6.23 наведено зовнішній вигляд моделей під час дослідження впливу фасадних протипожежних перешкод пасивного та активного типу на процеси обмеження поширення пожежі.

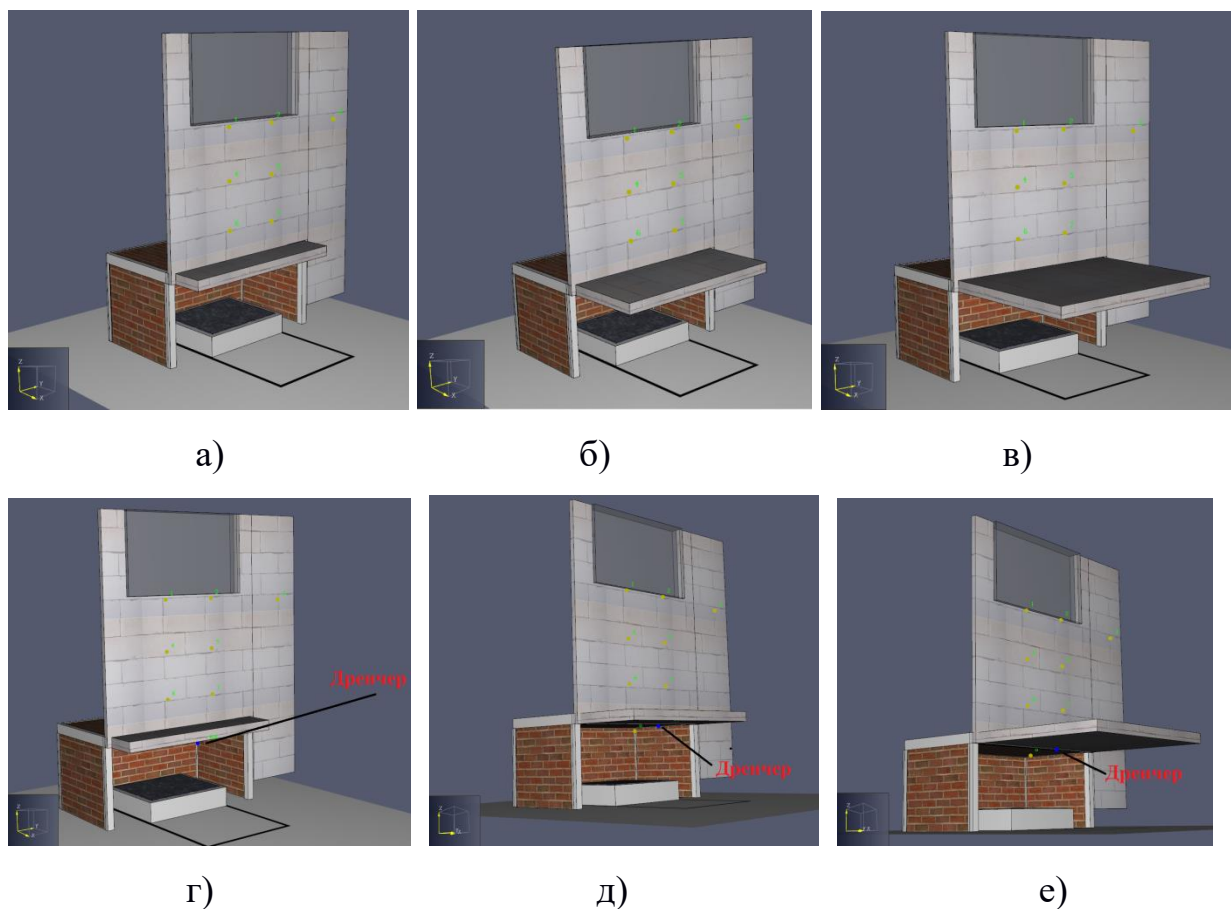


Рисунок 6.23 - Зовнішній вигляд моделі під час дослідження впливу фасадних протипожежних перешкод на процеси обмеження поширення пожежі по фасаді: а) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м; б) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,75 м; в) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 1,5 м; г) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем; д) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем; е) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем

Даний, третій етап досліджень також проводився згідно із методикою оцінки впливу джерела теплового випромінювання на фасадні системи на та процеси поширення пожежі у продовж 1800 с, тобто вихідні умови та сценарій початкового розвитку пожежі є аналогічним для всіх етапів. За результатом проведення моделювання із застосуванням фасадних протипожежних перешкод графіки температури для кожної досліджуваної зони фрагменту фасаду, а саме на рівнях площини фасаду від краю вогневої камери 400 мм, 800 мм, 1400 мм.

За результатом моделювання фіксується найбільше значення температури, яке було досягнуто в зоні кожної досліджуваної ділянки фасаду. На рис. 6.24 наведено вплив фасадних протипожежних перешкод визначених типів на процеси обмеження поширення пожежі та на характер температурних розподілів на досліджуваному фрагменті фасаду [278-279].

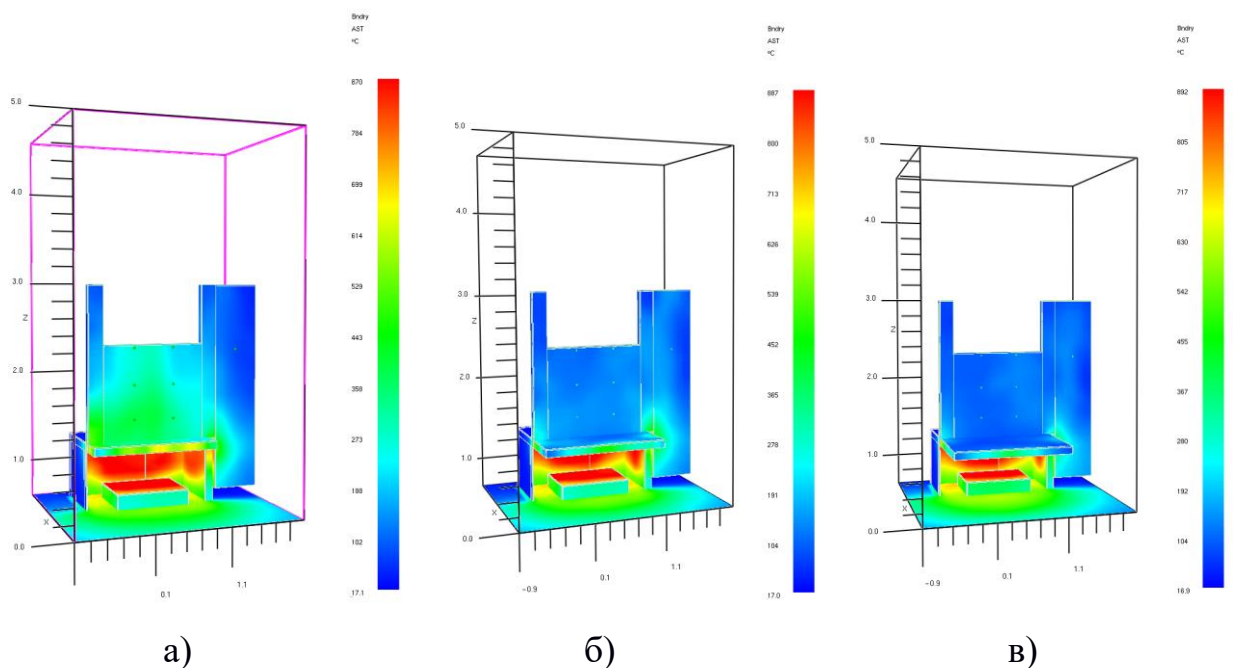


Рисунок 6.24 - Зовнішній вигляд моделі під час дослідження впливу фасадних протипожежних перешкод пасивного типу на процеси обмеження поширення пожежі по фасаду: а) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м; б) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,75 м; в) фасад обладнаний протипожежним карнизом шириною 1,5 м;

На рис. 6.25 наведено вплив фасадних протипожежних перешкод активного типу (обладнаних дренчерним зрошувачем) на процеси обмеження поширення пожежі та на характер температурних розподілів на досліджуваному фрагменті фасаду.

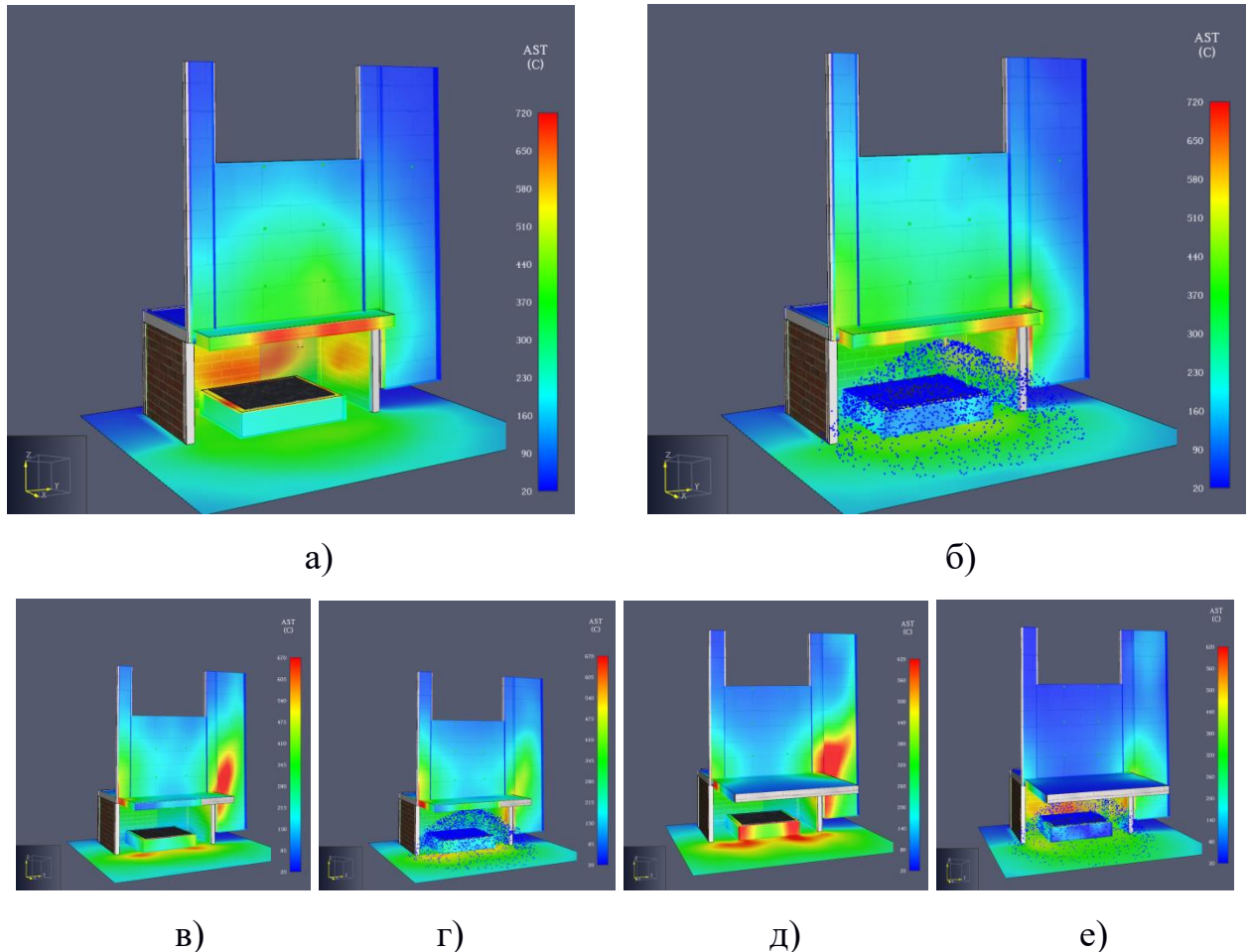


Рисунок 6.25 – візуалізація залежностей зміни температурних розподілів на поверхні фасаду в залежності від типу протипожежних перешкод: а) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем до його активації; б) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,3 м та дренчерним зрошувачем під час його активації; в) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,75 м та дренчерним зрошувачем до його активації; г) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним карнизом шириною 0,75 м та дренчерним зрошувачем під час його активації; д) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним

карнизом шириною 1,5 м та дренчерним зрошувачем до його активації; е) теплові розподіли для фасаду обладнаний протипожежним карнизом шириною 1,5 м та дренчерним зрошувачем під час його активації;

За результатами отриманих температурних розподілів на фасадах захищених протипожежними фасадними перешкодами побудовано графіки залежностей зміни максимальної температури на поверхні кожного досліджуваного рівня фасаду. Отримані температурні залежності для кожного типу досліджуваного фасаду відповідним кольором. Отримані графіки наведено на рис. 6.26.

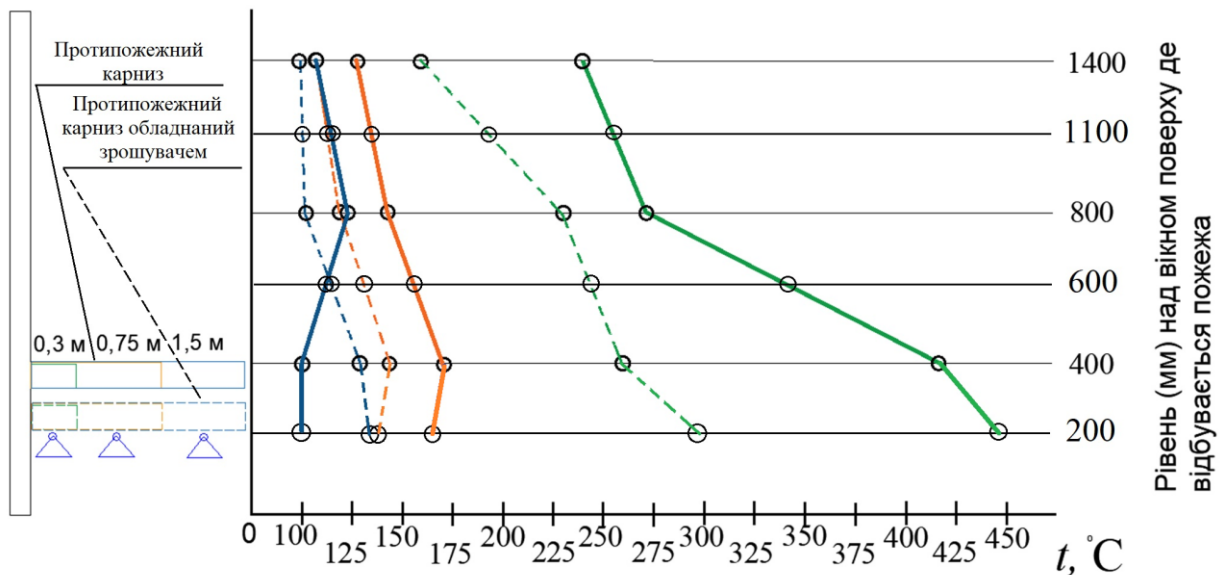


Рисунок 6.26 - графіки залежностей зміни максимальної значення температури біля поверхні фасаду в залежності від типу фасадної протипожежної перешкоди, де колір та тип кривої відповідає кольору та типу приведеної фасадної протипожежної перешкоди

Встановлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною від 0,3 м до 1,5 м значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної

конструкції вище розташованого поверху знижується на 8-15% для кожного кроку збільшення в 0,1 м ширини протипожежного карнизу. При цьому, при ширині протипожежного карнизу більше 1,5 м його ефективність фактично не змінюється, а тому подальше його збільшення є недоцільним.

Виявлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою 2290 МДж/м<sup>2</sup> на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною від 0,3 м до 1,5 м та обладнаний дренчерним зрошувачем з інтенсивністю подавання води не менше 5 мм/хв (0,083 л/с·м<sup>2</sup>) значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції вище розташованого поверху може знижуватися на 20-30% для кожного кроку збільшення ширини протипожежного карнизу на 0,1 м.

Отримані залежності дозволять систематизувати дані та розробити науково-методичний апарат для розрахункової оцінки запобігання поширення пожежі по зовнішніх огорожувальних конструкціях. Також, отримані дані дозволяють реалізувати табличний та спрощений методи розрахунків щодо обґрунтування конструктивних параметрів безпеки для зовнішніх огорожувальних конструкцій в частині забезпечення обмеження поширення по ним пожежі.

#### **6.4 Висновки до розділу 6**

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити наступні висновки:

1. За допомогою програмного комплексу обчислювальної газо-гідродинаміки FDS, реалізовано модель установки для прогнозування поширення пожежі по фасадам будівель, яка відтворює умови натурних експериментальних досліджень та формалізує зв'язок між процесами нагрівання поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі і,

відповідно, умовами поширення пожежі, а також здатністю оцінювати ефективність заходів щодо її обмеження.

2. Підтверджено адекватність розробленої газо-гідродинамічної моделі установки для прогнозування поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель. Абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують  $38,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відсоткових показниках не перевищує  $11,7\%$ , середньоквадратичні відхилення становлять в межах  $3\div 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту, що підтверджує загальну збіжність створеної комп'ютерної газо-гідродинамічної моделі та кожного окремого експериментального дослідження.

3. Виявлено, що для фасаду будівлі, який має кут прилягання суміжного фасаду від  $180^{\circ}$  (тобто без кута прилягання) до кута  $90^{\circ}$  під час 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290\text{ МДж/м}^2$  на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на рівнях висот від  $400\text{ мм}$  до  $1400\text{ мм}$  відносно верхнього краю вогневої камери, значення температури може збільшуватися до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що складає в межах  $35\%$  від температурного режиму пожежі для рівного фасаду без кутів.

4. Для фасаду будівлі, який може знаходитися під кутом від  $-20^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$  відносно вертикалі, під час 30 хвилинного впливу пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290\text{ МДж/м}^2$  та з площею горіння  $1,1\text{ м}^2$  значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції фасаду на висоті  $1400\text{ мм}$  від верхнього краю вогневої камери може змінюватися в  $1,6\text{-}1,9$  рази, як в сторону збільшення (для кутів від  $0^{\circ}$  до  $-20^{\circ}$ ) так і зменшення (для кутів від  $0^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$ ) відносно значення температури  $375\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$  для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально.

5. Встановлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290\text{ МДж/м}^2$  на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною від

0,3 м до 1,5 м значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції вище розташованого поверху знижується на 8-15% для кожного кроку збільшення в 0,1 м ширини протипожежного карнизу. При цьому, при ширині протипожежного карнизу більше 1,5 м його ефективність фактично не змінюється, а тому подальше його збільшення є недоцільним.

6. Виявлено, що у продовж 30 хвилинного впливу вогнища пожежі класу В з пожежною навантагою  $2290 \text{ МДж/м}^2$  на фрагмент вертикально встановленого фасаду обладнаного протипожежним карнизом шириною від 0,3 м до 1,5 м та обладнаний дренчерним зрошувачем з інтенсивністю подавання води не менше  $5 \text{ мм/хв}$  ( $0,083 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ ) значення температури на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції вище розташованого поверху може знижуватися на 20-30% для кожного кроку збільшення ширини протипожежного карнизу на 0,1 м.

7. На основі проведених досліджень визначено зміни розподілів температури на поверхні фасаду, який розміщеного над поверхом пожежі, залежно від кутів прилягання суміжних площин фасадів, значення кута нахилу фасаду та типу фасадних протипожежних перешкод, які можуть застосовуватися для обмеження поширення пожежі. Отримані дані будуть використані під час розробки науково-методичного апарату, який реалізує технологію виявлення закономірностей зміни температур і їх розподілення на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій для розрахункової оцінки запобігання поширення по ним пожежі.



## **РОЗДІЛ 7. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ЗОВНІШНІМИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ БУДІВЕЛЬ**

### **7.1 Розрахунок поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями будівель за спрощеним розрахунковим методом**

На основі обґрунтованих критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі вертикальними будівельними конструкціями та які враховують їх конструктивні та інженерні превентивні заходи, а також розробленої програми експериментальних досліджень з прогнозування запобігання поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям постає завдання дослідити взаємозв'язки чинників, що впливають на оцінювання можливості запобігання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями [221; 280-282].

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

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

Слід окремо відзначити, що під час прогнозування запобігання поширення пожежі по зовнішніми огороджувальними конструкціями та

оцінювання ефективності систем із перешкоджання поширення вогню не враховується можливість оснащення будинку автоматичними системами пожежогасіння або іншими протипожежними системами. Тобто стандартний сценарій пожежі передбачає найгірші наслідки, а саме її вільний розвиток та поширення у продовж всієї тривалості досліджень, а саме 30 хвилин [283-287].

На основі визначених чинників створено узагальнену схему основних чинників, що впливають на закономірності зміни температур на поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій будівлі та відповідно на оцінювання можливості запобігання поширення пожежі по ним, яку наведено на рис. 7.1.



Рисунок 7.1 – Узагальнення основних чинників, що впливають на процеси поширення пожежі по фасаду будівлі або на процеси запобігання її впливу

Для побудови плану повного факторного експерименту взято визначений перелік найбільш значущих параметрів, які мають найбільші значення під час визначення значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі [288-291], а саме: ширина

протипожежного карнизу ( $R$ ), висота міжповерхових віконних простінків ( $h$ ), наявність прилеглої частини фасаду під кутом  $180^\circ$  або  $90^\circ$  та наявність або відсутність дренчерного зрошувача. У табл. 7.1 вказані інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 7.1 - Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів

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

В якості критерію поширення пожежі на вище розташовані поверхи будівлі є температура руйнування конструкції заповнення світлових прорізів, а саме  $t_{кр} = 250^\circ\text{C}$  відповідно до даних представлених в досліджених та визначених в [136; 292-296].

Математична модель за зробленою гіпотезою відповідає лінійній залежності значення довжини відстані між віконними прорізами та приведеними факторами у таблиці 1, та має наступний вигляд рівняння 7.1 [297-299].

$$N = h_0 + h_1x_1 + h_2x_2 + h_3x_3 + h_4x_1x_2 + h_5x_1x_3 + h_6x_2x_3 + h_7x_1x_2x_3, \quad (7.1)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – параметри, що враховують вибрані фактори, які зазначені у таблиці 7.1;

$h_0, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7$  – константи рівняння числової регресії.

Для визначення констант рівняння числової регресії відповідно до формули (7.1) необхідно провести 8 чисельних експериментів [300-301] за складеною для цього матриці планування експерименту, що приведена у вигляді таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 - Матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

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

На основі діапазонів варіювання факторів, що подані в табл. 7.1, із використанням матриці плану повного факторного експерименту за табл. 7.2, були виконані необхідні обчислення й отримані значення дисперсій температур на поверхні зовнішньої огорожувальної конструкції для критичних відстаней міжповерхового віконного простінку для всіх варіантів найбільш значущих параметрів, які визначені у таблиці 7.1. Результати проведених обчислень наведено в таблиці 7.3

Таблиця 7.3 - Дисперсія температур на поверхні зовнішньої конструкції за результатами повного факторного експерименту

Номер експерименту	Значення температури, °С			
	0 мм	400 мм	800 мм	1400 мм
1	600	170	130	110
2	1200	220	200	180
3	600	100	110	100
4	1200	130	130	120
5	600	250	230	160
6	1100	420	270	240
7	1150	700	400	300
8	600	330	270	200

Варіюючи визначеними параметрами згідно із таблиці 7.1 та таблиці 7.2, і проводячи розрахунки за формулою (7.1), інтерполюючи отримані дані за критичною температурою руйнування заповнення світлового прорізу (250 °С), отримано граничні значення висоти міжповерхових віконних простінків із урахуванням значущих факторів впливу. Отримані дані для різних конструктивних характеристик фасадів, що піддаються впливу пожежі наведені у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Значення висоти міжповерхових віконних простінків в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для негорючого фасаду будинку

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

Використовуючи дані таблиці 7.4 визначені константи рівняння числової регресії залежності (7.1) за формулами (7.2) [301-302]:

$$\begin{aligned} h_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; & h_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; \\ h_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; & h_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i; \\ h_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i; & h_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i; \\ h_6 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i; & h_7 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i, \end{aligned} \quad (7.2)$$

де  $N = 8$  – кількість експериментальних варіантів згідно із планом експерименту;  $x_i$  – значення параметру згідно із матрицею плану (див. таблицю 7.2);  $h_i$  – значення відстані згідно із таблицями 7.4.

Константи рівняння числової регресії наведені у таблиці 7.5.

*Таблиця 7.5* - Константи рівняння числової регресії для випадку негорючого фасаду

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

Отримані дані дозволяють провести визначення мінімальних значень міжповерхових віконних простінків для забезпечення умови не поширення пожежі від одного поверху на інший.

Систематизація основних чинників, а також опрацювання результатів проведених експериментальних вогневих натурних досліджень дозволяє вивести емпіричні коефіцієнти, які дозволять врахувати вплив параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій на зміну температури на їх поверхні.

Запропоновано, за основу методу визначення значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі, використовувати емпіричне рівняння 7.3 [44].

$$T_z = (T_w - T_0) \times [1 - 0,4725(L_f \cdot w_t / Q)] \times (\alpha \text{ чи } \beta) + T_0, \text{ (K)}, \quad (7.3)$$

де:  $T_w$  - максимальне значення температури полум'я на рівні верхнього краю вікна вогневої камери;  $T_0$  - температура навколишнього середовища (293 K);  $L_f$  - відстань вздовж осі від верхнього вікна до точки, для якої робиться розрахунок, м;  $W_t$  - ширина вікна приміщення, де відбулася пожежа, м;  $Q$  - питома теплота згоряння;  $L_f \cdot w_t / Q < 1$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт, який враховує кут прилягання суміжного фасаду;  $\beta$  - коефіцієнт, який враховує нахил фасаду.

Максимальне значення температури полум'я на рівні верхнього краю вікна вогневої камери та питома теплота згоряння є взаємозалежними величинами і враховуючи значення пожежного навантаження, що використано в розробленій програмі-методиці, яка представлена в розділі 4, а саме 2290 МДж/м<sup>2</sup> питома теплота згоряння становила 3,4 кВт при максимальному значенні температури до 1200 °С. Відповідно, у випадку розрахунку температури біля поверхні вікна поверху за рівнянням (7.1) для будинку із визначеним значенням пожежного навантаження в середині приміщення параметри  $T_w$  та  $Q$  є перемінними та будуть значно впливати на кінцеве значення температури [44;303].

За результатом серії розрахункових операцій та аналізу отриманих температурних залежностей приведених в розділі 5.1-5.3 та розділі 6.2-6.3 запропоновано ввести корекційний емпіричний коефіцієнт  $\alpha$ , застосування якого дозволить визначити значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі з врахуванням кута прилягання суміжно розташованої площини фасаду. Для врахування кута нахилу (схилу) фасаду, запропоновано ввести корекційний емпіричний коефіцієнт  $\beta$ .

В таблиці 7.6 наведено значення емпіричних коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$  для окремих випадків конструктивного виконання зовнішньої огорожувальної конструкції та при випадках застосування фасадних протипожежних

перешкод, а саме протипожежного карнизу шириною 0,3 м, 0,75 м та 1,5 м, в тому числі із встановленим дренчерним зрошувачем із інтенсивністю зрошення.

Таблиця 7.6 - Значення коефіцієнтів, які враховують конструктивне виконання фасаду при визначенні значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі

Тип конструктивного виконання фрагменту фасадної системи	Наявність протипожежного карнизу з шириною, мм ( <b>чисельник</b> )/із зрошенням 0,083 л/с·м <sup>2</sup> захищеної площі фасаду (знаменник)			
	Без протипожежного карнизу	300	750	1500
Кут прилягання суміжного фасаду				
Коефіцієнт «α-180»	<u>1,15</u> 0,55	<u>0,72</u> 0,45	<u>0,55</u> 0,35	<u>0,32</u> 0,2
Коефіцієнт «α-145»	<u>1,2</u> 0,64	<u>0,77</u> 0,5	<u>0,6</u> 0,4	<u>0,45</u> 0,3
Коефіцієнт «α-90»	<u>1,35</u> 0,7	<u>0,85</u> 0,65	<u>0,65</u> 0,45	<u>0,47</u> 0,35
Кут нахилу фасаду відносно вертикалі				
Коефіцієнт «β+20»	<u>1,35</u> 1,05	<u>1,15</u> 0,75	<u>1,00</u> 0,35	<u>0,32</u> 0,2
Коефіцієнт «β+10»	<u>1,25</u> 1,0	<u>1,1</u> 0,65	<u>0,95</u> 0,45	<u>0,75</u> 0,38
Коефіцієнт «β-10»	<u>1,0</u> 0,85	<u>0,45</u> 0,3	<u>0,3</u> 0,26	<u>0,22</u> 0,2
Коефіцієнт «β-20»	<u>0,82</u> 0,55	<u>0,45</u> 0,27	<u>0,3</u> 0,22	<u>0,22</u> 0,18

Методика застосування спрощеного методу розрахунку значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі полягає в наступному алгоритмі:

1. Визначення ширини вікна приміщення  $W_t$  (м) в якому виникає розрахункова пожежа.

2. Визначення питомої теплоти згоряння  $Q$  (МДж/м<sup>2</sup>) — кількість теплоти, що виділяється у разі повного згоряння одиниці маси твердого



палива, яке знаходиться в середині приміщення. Даний показник можливо приймати, як значення пожежної навантаги в середині частини будівлі чи приміщення для кого проводиться розрахунок Дані щодо розрахунку значення пожежної навантаги допускається приймати з довідкових джерел.

3. Визначаємо та застосовуємо в рівнянні значення  $L_f$  (м) – відстань вздовж осі від верхнього вікна до точки вздовж висоти фасаду, для якої робиться розрахунок.

4. Приймаємо значення температури навколишнього середовища  $T_0$  (К). Як правило, під час вирішення задач із застосуванням умов навколишнього середовища приймають «нормальні умови»— значення тиску й температури, для яких заведено приводити результати фізичних і хімічних експериментів з метою спрощення порівняння між ними. IUPAC визначає нормальний тиск у 100,0 кПа і температуру 0 °С (273,15 К) [305-306]. Разом із тим, для врахування найбільш несприятливих випадків поширення пожежі пропонується застосовувати значення температури навколишнього середовища 308.150 К (35 °С) [307-309].

5. Застосування  $\alpha$  – коефіцієнт, який враховує кут прилягання суміжного фасаду або  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує нахил фасаду. При цьому слід враховувати наявність протипожежного карнизу шириною (0,3; 0,75 або 1,5 м) або його відсутність. В разі наявності протипожежного карнизу пасивного типу (без дренчерного зрошувача) слід брати значення коефіцієнта з чисельника (виділено жирним кольором), що відповідає значенню куту прилягання суміжного фасаду або куту його нахилу.

У випадку застосування для фасаду будівлі протипожежного карниза обладнаного дренчерним зрошувачем, допускається приймати значення коефіцієнту із знаменника, що відповідає значенню куту прилягання суміжного фасаду або куту його нахилу.

## **7.2 Розрахунково-табличний метод оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель**

Одним із спрощених методів щодо оцінювання поширення пожежі або оцінювання ефективності заходів з її обмеження є застосування розрахункової оцінки та, зокрема, табличного методу [302; 310-312]. Основною ідеєю табличного методу під час визначення мінімально необхідних заходів щодо запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель є визначення необхідних даних для здійснення наближеного обчислення, в тому числі використовуючи інтерполяцію або диференціювання. Слід розуміти, що даний метод оцінювання є узагальненим та не може в повній мірі враховувати дані про властивості будівельних матеріалів, швидкість поширення пожежі та досягнення нею критичних значень температур для досліджуваної зони фасаду.

Таким чином, за результатом проведених натурних досліджень та результатів досліджень отриманих із застосуванням розробленої математичної моделі визначено залежності розподілів температури на поверхні фасаду від кутів прилягання суміжних площин фасадів, значення кута його нахилу та типу фасадних протипожежних перешкод, які можуть застосовуватися для обмеження поширення пожежі.

Отримані залежності виражено у вигляді таблиці, що дозволяє здійснювати прогнозування поширення пожежі по зовнішнім вертикальним огорожувальним конструкціям будівель. Для отримання значень функцій в точках, які не входять до розрахункової таблиці, або похідних потрібно використовувати методи інтерполяції та диференціювання, які можуть вносити додаткову похибку у розрахунках.

В табл. 7.7 наведено значення температури біля поверхні фасаду будівлі для визначених випадків конструктивного виконання таких фасадів та застосованих фасадних протипожежних перешкод

Таблиця 7.7 - Значення температури для певних рівнів висоти фасаду, який розміщується над поверхом пожежі в залежності від конструктивного виконання фасаду будівлі

Тип розміщення фрагменту фасадної системи	Без протипожежного карнизу	Наявність протипожежного карнизу з шириною, мм ( <b>чисельник</b> ) /із зрошенням 0,083 л/с·м <sup>2</sup> захищеної площі фасаду ( <b>знаменник</b> )			Відстань від верхнього краю вікна поверху, де імітується пожежа, мм
		300 мм	750 мм	1500 мм	
Діапазон пікових значень температури біля поверхні фасаду, °С					
1	2	3	4	5	6
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	800	<u>420</u> 260	<u>170</u> 140	<u>100</u> 130	400
	480	<u>270</u> 230	<u>140</u> 120	<u>130</u> 110	800
	400	<u>240</u> 160	<u>130</u> 110	<u>120</u> 100	1400
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 135° відносно основної площини	1100	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	850	<u>530</u> 290	<u>190</u> 160	<u>100</u> 130	400
	560	<u>300</u> 240	<u>160</u> 110	<u>130</u> 120	800
	500	<u>280</u> 180	<u>160</u> 110	<u>120</u> 110	1400
Під кутом 0°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 90° відносно основної площини	1150	<u>1150</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	950	<u>700</u> 330	<u>380</u> 230	<u>220</u> 170	400
	780	<u>400</u> 270	<u>240</u> 160	<u>200</u> 130	800
	650	<u>300</u> 200	<u>220</u> 130	<u>180</u> 110	1400
Під кутом +20°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1150	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	1000	<u>970</u> 460	<u>770</u> 360	<u>380</u> 360	400
	780	<u>750</u> 380	<u>580</u> 350	<u>460</u> 350	800
	600	<u>700</u> 350	<u>470</u> 280	<u>380</u> 280	1400
Під кутом +10°, відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом 180° відносно основної площини	1070	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	900	<u>870</u> 460	<u>540</u> 350	<u>380</u> 360	400
	610	<u>680</u> 380	<u>480</u> 300	<u>460</u> 350	800
	530	<u>620</u> 350	<u>360</u> 250	<u>380</u> 280	1400

## Продовження таблиці 7.7

Під кутом $-10^\circ$ , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом $180^\circ$ відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	440	<u>350</u> 230	<u>140</u> 140	<u>90</u> 90	400
	380	<u>250</u> 200	<u>110</u> 120	<u>70</u> 80	800
	270	<u>180</u> 130	<u>90</u> 110	<u>70</u> 60	1400
Під кутом $-20^\circ$ , відносно вертикалі. Прилегла частина фасаду розміщена під кутом $180^\circ$ відносно основної площини	1030	<u>1100</u> 600	<u>1200</u> 600	<u>1200</u> 600	0
	380	<u>300</u> 180	<u>120</u> 140	<u>90</u> 80	400
	290	<u>200</u> 160	<u>110</u> 100	<u>60</u> 60	800
	210	<u>150</u> <u>110</u>	<u>80</u> <u>90</u>	<u>60</u> <u>50</u>	1400

Методика застосування табличного методу розрахунку значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі полягає в наступному алгоритмі:

1. Визначити тип фасадної системи, зокрема наявність кутів прилягання суміжної площини фасаду або обрати тип фасаду за наявним кутом його нахилу.

2. Визначити тип фасадної протипожежної перешкоди (300 мм, 750 мм або 1500 мм) або обрати стовпчик «без протипожежного карнизу». Якщо протипожежний карниз обладнано дренчерним зрошувачем допускається приймати температуру вказану у чисельнику (виділено курсивом). У випадку відсутності дренчерного зрошувача на протипожежному карнизі слід приймати число зазначене в знаменнику.

3. Визначити величину віконного міжповерхового простінку та обрати в графі «Відстань від верхнього краю вікна поверху, де імітується пожежа» відповідне значення. У випадку відсутності необхідної величини слід обрати менше найближче значення висоти простінку.

4. Прогнозована температура біля поверхні стіни вище розташованого фасаду визначається як перетин лінії із даними щодо відстані від верхнього краю вікна поверху, де імітується пожежа до значення температури для певних

рівнів над поверхом пожежі в залежності від конструктивного виконання фасаду будівлі.

Слід розуміти, що табличні методи розрахунку є однією з форм обчислень, які мають обмежену точність та можуть бути неефективними при розгляді випадків із великим обсягом вихідних даних. Зокрема, табличний метод приводить температурні дані для пожеж із максимальним значенням пожежного навантаження ( $2290 \text{ МДж/м}^2$ ), які було верифіковано за допомогою натурних досліджень. Окрім цього, табличний метод на відміну від натурних вогневих методів оцінювання поширення пожежі не має можливості ефективно відображати дані, особливо якщо необхідно показати зв'язки між такими даними або створити складну візуалізацію процесів.

Серед перспективних напрямів удосконалення представленого методу слід відмітити необхідність врахування коефіцієнтів віконних прорізів та визначення коефіцієнтів впливу на взаємозв'язки між кутами прилягання суміжних площин та кутами нахилу фасаду.

### **7.3 Методологічні основи оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель із використанням польових моделей**

Метод оцінювання поширення фасадної пожежі або оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження із використанням польових моделей заснований на використанні повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса. Польові моделі дозволяють проводити дослідження та експерименти в широкому спектрі умов і параметрів, що дозволяє оптимізувати витрати на час і кошти, порівняно з фізичними дослідженнями вогню [313-314].

Методика застосування табличного методу розрахунку значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі полягає в наступному алгоритмі:

1. Відтворення геометричної моделі будівлі, будинку або споруди та визначення розрахункового простору сітки та кратності її комірок. Загальний розмір моделі повинен відтворювати не менше 2 поверхів нижче поверху пожежі та 3 поверхів над розрахунковим поверхом пожежі.

2. Задавання тепло-фізичних характеристик матеріалів будівлі. їх пожежного навантаження, вибір початкової реакції горіння та її швидкість.

3. Визначення сценарію початкового розвитку пожежі за найбільш несприятливих умов, зокрема врахування несприятливої умов навколишнього середовища (температури, вітру тощо).

4. Визначення критичного значення температури руйнування світлопрозорих конструкцій поверху, для якого проходить оцінювання обмеження пожежі, а також тривалості температурного впливу. У випадку відсутності вищезазначених даних приймають наступні критерії:

- не перевищення максимального значення температури в  $350^{\circ}\text{C}$  на рівні нижнього краю вікна у продовж всієї тривалості моделювання для будівель фасадом класів А та Б відповідно до ДБН В.2.6-33:2018.

- у разі досліджень склопрозорого фасаду типу В відповідно до ДБН В.2.6-33:2018 критичне значення температури становить  $250^{\circ}\text{C}$  на рівні нижнього краю вікна у продовж всієї тривалості досліджень.

5. Тривалість моделювання повинна становити не менше необхідної тривалості гарантованого обмеження поширення пожежі по фасаду на верхній поверх, тобто відповідати значенню межі вогнестійкості зовнішньої огорожувальної конструкції. За замовчуванням, рекомендовано визначати тривалість обчислень не менше 30 хв.

6. Перевірка забезпечення умови обмеження поширення пожежі полягає в тому щоб визначити, чи забезпечують запропоновані об'ємно-конструктивні рішення не поширення пожежі на вище розташовані поверхи. В разі необхідності коригування запропонованих об'ємно-конструктивні рішень будівлі можливі наступні варіанти підвищення ефективності фасадних протипожежних перешкод (або їх комбіноване застосування):

- збільшення висоти віконних міжповерхових простінків;
- застосування фасадних протипожежних перешкод пасивного типу;
- застосування фасадних протипожежних перешкод активного типу;
- застосування протипожежних вікон або інших протипожежних конструкцій, які можуть унеможливити поширення пожежі у продовж часу, який гарантує їх межа вогнестійкості;
- інші заходи, застосування яких гарантує обмеження поширення пожежі на вище розташовані поверхи у продовж визначеного часу.

Основою для польових моделей є наступні диференціальні рівняння.

Рівняння збереження маси [109]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j) = 0, \quad (7.4)$$

де  $\rho$  – густина повітря між суміжними об'єктами, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – тривалість теплового опромінювання, с;

$x_j$  – координата в  $j$ -му напрямку, м;

$u_j$  – швидкість у  $j$ -му напрямку, м/с.

Рівняння збереження імпульсу [109-110]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i, \quad (7.5)$$

де  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$u_i$  – швидкість у  $i$ -му напрямку, м/с;

$u_j$  – швидкість у  $j$ -му напрямку, м/с;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\tau_{ij}$  – тензор в'язких напруг, Па.

Тензор в'язких напруг визначають за формулою [109-110]:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij}, \quad (7.6)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

$u_i$  – швидкість у  $i$ -му напрямку, м/с;

$u_j$  – швидкість у  $j$ -му напрямку, м/с;

$\frac{\partial u_k}{\partial x_k}$  – градієнт швидкості у  $k$ -му напрямку, с<sup>-1</sup>;

$\delta_{ij}$  – символ, що дорівнює 1 при  $i = j$ , та 0 в інших випадках.

Рівняння збереження хімічного компонента  $k$  [109-110]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \cdot D \cdot \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + S_k, \quad (7.7)$$

де:  $\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$t$  – тривалість теплового опромінювання, с;

$x_j$  – координата в  $j$ -му напрямку, м;

$u_j$  – швидкість у  $j$ -му напрямку, м/с;

$Y_k$  – маса  $k$ -го компонента в суміші, г;

$D$  – коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$S_k$  – швидкість утворення щільності  $k$ -го компонента, кг/(м<sup>3</sup>·с).

Для замикання системи рівнянь (7.4) – (7.7) використовується рівняння стану ідеального газу. Для суміші газів воно має такий вигляд [109-110]:

$$p = \rho \cdot R_0 \cdot T \cdot \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (7.8)$$



де  $p$  – абсолютний тиск повітря, Па;

$\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$R_0 = 8,31$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;

$T$  – абсолютна температура повітря середовища, °С;

$Y_k$  – маса  $k$ -го компонента в суміші, г;

$M_k$  – молярна маса  $k$ -го компонента, г/моль.

При цьому дана система диференціальних рівнянь може бути доповнена рівняннями переносу теплової енергії [109-110]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_j \cdot h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}, \quad (7.9)$$

де  $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p \cdot dT + \sum_k (Y_k H_k)$  – статична ентальпія суміші;

$H_k$  – теплота утворення  $k$ -го компонента, Дж;

$c_p = \sum_k Y_k \cdot c_{p,k}$  – теплоємність суміші за постійного тиску, Дж/(кг·К);

$Y_k$  – масова частка  $k$ -го компонента в суміші, кг/кг;

$c_{p,k}$  – питома теплоємність  $k$ -го компонента, кДж/(К·кг);

$\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт/(м·К);

$q_j^R$  – радіаційний потік енергії в напрямку  $x_j$ , Дж/м<sup>2</sup>.

Для моделювання горіння використовують одну із моделей горіння, яка відповідає розрахунковому сценарію пожежі у сукупності із одноступеневим стехіометричним рівнянням хімічної реакції.

Для врахування турбулентності використовують стандартну модель «к-ε» або інші моделі турбулентності.

Вирішення приведених рівнянь є складним завданням і вимагає великої обчислювальної потужності та розуміння принципів методів чисельного моделювання. Перевагою даного методу є можливість адаптувати розмір і

форму елементів в області аналізу, що дозволяє отримати точні результати при ефективному використанні обчислювальних ресурсів. Також даний метод дозволяє задавати різні граничні умови оцінки поширення пожежі по фасадам будівель, що відповідають різним фізичним умовам, що оптимізує процес моделювання реальних ситуацій.

#### **7.4 Оцінка економічного ефекту та вартісна оцінка результатів під час забезпечення умов обмеження поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям на прикладі висотної будівлі**

За результатами роботи, які представлені в розділах 4-5, а також розділах 7.1-7.3 розроблено науково-методичний апарат, який є системою, що об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель. Отримані результати дозволяють забезпечити вирішення актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у розкритті закономірностей впливу конструктивних параметрів зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель на процеси зміни температур на їх поверхні під час пожежі, як підґрунтя для запобігання поширення пожежі по негорючим фасадам будівель [315-317].

Розроблений науково-методичний апарат дозволить реалізувати виконання основної вимоги Закону України [1], як основоположний технічний регламент для будівельної продукції в частині забезпечення обмеження поширення пожежі, забезпечення несучої здатності конструкції протягом

певного проміжку часу та забезпечення безпеки пожежно-рятувальних підрозділів.

На основі запропонованої методології запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель проведено оцінювання економічного ефекту за кожним із розроблених методів, а саме: спрощеним розрахунковим методом, табличним методом та методом із використанням польових моделей.

Проведення порівняльного оцінювання економічного ефекту проведемо для висотного житлового будинку з умовною 120 м та кількістю поверхів 42. Висота міжповерхового віконного простінку становить 700 мм. Фасад знаходиться вертикально без кутів ухилу площини. Будівля складається із 2 секцій розміщених під кутом 90 градусів одна до одної. Площа кожної секції будинку становить 2500 м<sup>2</sup>.

Відповідно до вимог будівельних норм на межі вертикального протипожежного відсіку на рівні перекриття передбачають протипожежний карниз по периметру будівлі, що виступає за межі фасаду не менше ніж на 1,5 м. Такі карнизи потрібно виконувати з негорючого матеріалу з мінімальним класом вогнестійкості EI 90.

Станом на 2023 рік, вартість будівництва житлового будинку становить в межах 20,000-24,000 грн за метр квадратний [318-322]. Враховуючи умовну висоту будинку та складність висотного будівництва приймаємо для розрахунку найвищу вартість, а саме  $X_{\text{варт.}}=24,000$  грн. Ризики пов'язані з військовими загрозами в даних розрахунках не беруться до уваги.

Оцінювання економічного ефекту за запропонованими розрахунковими методами порівняно із розпорядчим методом нормування підходами проводимо за формулою [323]:

$$E=E_1+E_2, \text{ грн} \quad (7.10)$$

де  $E_1$  – капітальні витрати на етапі будівництва.  $E_2$  – сума збитків від пожежі.

Значення  $E_2$  прямо пропорційно залежить від тривалості розвитку пожежі ( $t$ , хв) із урахуванням часу для введення сил і засобів для ліквідації пожежі [324-326] та визначають за формулою [323]:

$$t = t_{пв} + t_{зб} + t_{сл} + t_{ор}, \quad \text{хв} \quad (7.11)$$

де  $t_{пв}$  – час від початку пожежі до повідомлення про пожежу в підрозділ пожежної охорони, хв (приймають не менше ніж 1 хв);

$t_{зб}$  – час збирання особового складу підрозділу пожежної охорони за тривоною, хв (приймають рівним 1 хв);

$t_{сл}$  – час слідування підрозділу пожежної охорони на пожежу, хв. (визначають згідно із [327], приймаємо умовно 5 хв);

$t_{ор}$  – час оперативного розгортання підрозділу пожежної охорони на пожежу, хв (приймають не менше ніж на 1 хв) [328]. Враховуючи складність розгортання техніки для гасіння пожежі на висоті понад 50 м, час оперативного розгортання приймаємо 5 хв. Таким чином, з врахуванням рекомендацій [329], тривалість вільного розвитку пожежі приймаємо 12 хвилин.

На першому етапі визначення економічного ефекту, що досягається за рахунок зменшення капітальних витрат на етапі будівництва, порівняємо вартість будівництва протипожежного карнизу. Його конструктивні параметри визначимо за кожним із розроблених методів. Вартість протипожежного карнизу визначимо як добуток вартості будівництва  $1 \text{ м}^2$  карнизу ( $U$ ) на його ширину ( $X_{ш}$ ) враховуючи довжину периметру будинку ( $l_{довж}=200 \text{ м}$ ), ширину карнизу (1,5 м) [323]:

$$U \times X_{ш} \times l_{довж} = 7\,200\,000, \text{ грн.} \quad (7.12)$$

Таким чином, керуючись розпорядчим методом нормування ширини карнизу, його вартість, як фасадної протипожежної перешкоди, яка обмежить поширення пожежі по фасаді становить 7 200 000 грн.

Використовуючи табличний метод оцінювання обмеження поширення пожежі, для даного типу будинку, протипожежний карниз допускається робити шириною 1500 мм. Таким чином, застосовуючи формулу 7.12, вартість протипожежного карнизу становитиме 7 200 000 грн.

Наступним етапом порівняльного аналізу щодо значення капітальних витрат на етапі будівництва  $E_1$  є застосування формули з визначення значення температури біля поверхні вікна поверху, який розташовано вище поверху пожежі, використовувати емпіричне рівняння [44].

$$T_z = (T_w - T_0) \times [1 - 0,4725(L_f \cdot w_t / Q)] \times (\alpha \text{ чи } \beta) + T_0, \quad \text{К}, \quad (7.13)$$

де:  $T_w$  - максимальне значення температури полум'я на рівні верхнього краю вікна вогневої камери;  $T_0$  - температура навколишнього середовища (293 К);  $L_f$  - відстань вздовж осі від верхнього вікна до точки, для якої робиться розрахунок - 0,7 м;  $w_t$  - ширина вікна приміщення, де відбулася пожежа - 1,5 м;  $Q$  - питома теплота згоряння;  $L_f \cdot w_t / Q < 1$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт, який враховує кут прилягання суміжного фасаду;  $\beta$  - коефіцієнт, який враховує нахил фасаду.

Відповідно до початкових вихідних даних будівля складається з двох секцій які розміщені перпендикулярно одна до одної, тобто значення  $\alpha$  - слід приймати як для фасаду з кутом прилягання суміжного фасаду 90 градусів, таким чином  $\alpha$  слід перевірити для значень 0,65; 0,45 та 0,35 згідно з даними таблиці 7.1. Питома теплоту згоряння пожежного навантаження приймаємо як для пожежного навантаження житлових будинків за [44; 330-331] 780 МДж/м<sup>2</sup>.

Кількість енергії, яка виділяється під час горіння горючого навантаження квартири за секунду можна визначити так [332]:

$$Q_{\text{вид}} = V_{\text{м}} S_{\text{пож}} Q_{\text{н}}, \text{ кДж/с}, \quad (7.14)$$

де  $V_{\text{м}}$  – приведена масова швидкість вигорання,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;  $S_{\text{пож}}$  – площа пожежі;  $Q_{\text{н}}$  – нижча теплота згорання горючого навантаження квартири,  $\text{кДж/кг}$ .

Питому теплоту згорання для даного пожежного навантаження  $Q$  приймаємо 1,4 кВт при максимальному значенні температури до 1200 °С [332]. Підставивши вихідні дані у формулу 7.14 отримаємо температуру на рівні вікна вище розташованого над поверхом пожежі при застосування протипожежного карнизу шириною 300 мм –  $T_z = 1053$  °С; при застосуванні протипожежного карнизу шириною 750 мм –  $T_z = 644$  °С; при застосуванні протипожежного карнизу шириною 1500 мм –  $T_z = 446$  °С.

Таким чином, при застосуванні розрахунку поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель за спрощеним розрахунковим методом, визначено, що наявність протипожежного карнизу шириною навіть 1500 мм при наявності суміжного фасаду під кутом 90 градусів та розміру міжповерхового віконного простінку 0,7 м умови обмеження поширення пожежі не виконуються.

Для досягнення поставленої мети та забезпечення не перевищення встановленого критерії температури, а саме не перевищення максимального значення температури в 350°С на рівні нижнього краю вікна введемо додаткові протипожежі конструктивні заходи окрім протипожежного карнизу шириною 1,5 м. Альтернативною додатковою фасадною протипожежною перешкодою може бути збільшений міжповерховий віконний простінок замість передбаченого простінку  $L_f = 0,7$  м.

Таким чином встановлено, що мінімально необхідне значення висоти міжповерхового віконного простінку має становити 1,25 м. Вартість додаткової висоти надбудови міжповерхового простінку вистою  $h=0,55$  м по всьому периметру будівлі ( $l_{\text{довж}}=200$  м) складається з добутку вартості зведення

огороджувальної конструкції ( $\dot{N} - 90$  грн/0,6 м) на значення її додаткової висоти ( $h$ ) та довжини стіни по периметру  $l_{\text{довж}}$ . Зменшення вартості вікон, які заповнюють віконний простір можна умовно знехтувати.

$$\dot{N} \times h \times l_{\text{довж}} = 30\,000, \text{ грн.} \quad (7.15)$$

Таким чином, значення капітальних витрат на етапі будівництва  $E_1$  для даного випадку складає 7 230 000 грн.

Наступним етапом визначення економічного ефекту є оцінювання збитків від пожежі у будівлі. Оцінювання розвитку та поширення пожежі проведемо із використанням польової моделі. Моделювання динаміки розвитку пожежі проводиться за польовою моделлю з допомогою програми FDS. В основі обраних сценаріїв пожежі передбачена наявність конструкції будівлі, яка виконана з бетонних матеріалів з наступними фізичними характеристиками:

- густина 1950 кг/м<sup>3</sup>;
- питома теплоємність 1,04 кДж/(кг·К)
- коефіцієнт випромінювання 0,9;
- коефіцієнт поглинання 0,65 1/м.

Густина цегли 1900 кг/м<sup>3</sup>, питома теплоємність 0,8 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,65 Вт/(м·К). Світлові прорізи (вікна) будинку заповнені склом, густиною 2500 кг/м<sup>3</sup>, з питомою теплоємністю 0,67 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 0,061 Вт/(м·К). Густина сталевих елементів 7800 кг/м<sup>3</sup>, питома теплоємність 0,48 кДж/(кг·К) та теплопровідністю 15,0 Вт/(м·К), коефіцієнт випромінювання 0,85.

Облицювальний матеріал фасаду в моделі фрагменту будівлі не враховується для отримання теплових розподілів по фасаду виключно від впливу зовнішнього чинника пожежі. Крок розрахункової сітки FDS моделі складає 25 см<sup>2</sup>, що обумовлено геометричними розмірами моделі фрагменту будівлі та кратності розміру комірки сітки. За результатом відтворення моделі

досліджуваного об'єкту відтворено його FDS модель, візуалізацію якої наведено на рис. 7.2.

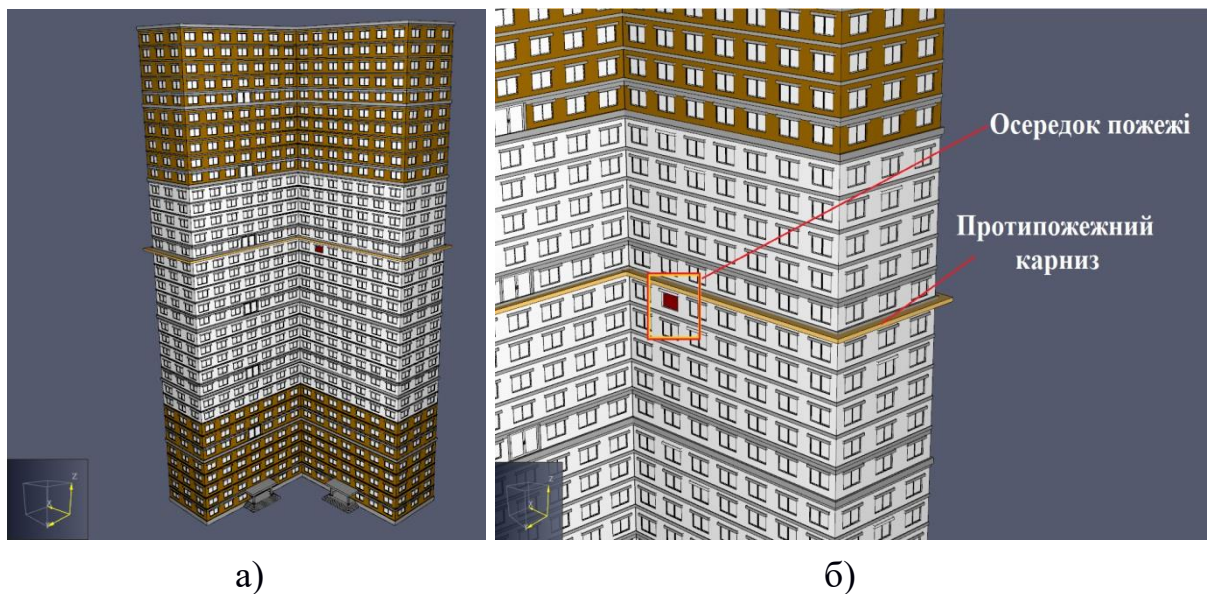


Рисунок 7.2 – Візуалізація FDS моделі будинку для дослідження поширення пожежі: а – загальний вигляд моделі; б – місце початкового осередку пожежі та протипожежної перешкоди

Тривалість моделювання розвитку пожежі відповідає визначеній тривалості розвитку пожежі ( $t$ , хв) із урахуванням часу для введення сил і засобів для ліквідації пожежі та складає 12 хв. Метою моделювання є визначення площі поширення пожежі при застосуванні визначених типів протипожежних перешкод, а саме 1,5 м ширини протипожежного карнизу для розпорядчого та табличного методу визначення типу фасадної протипожежної перешкоди. Висота віконного міжповерхового простінку складатиме 0,7 м.

Другий етап моделювання розвитку пожежі здійснюватиметься для спрощеного методу розрахунку де визначено 1,5 м ширини протипожежного карнизу та 1,25 висоти міжповерхового простінку. На основі отриманих результатів визначимо потенційні збитки від пожежі для обох випадків та порівняємо економічний ефект.

На рис. 7.3-7.4 наведено результати моделювання поширення пожежі для двох визначених випадків.



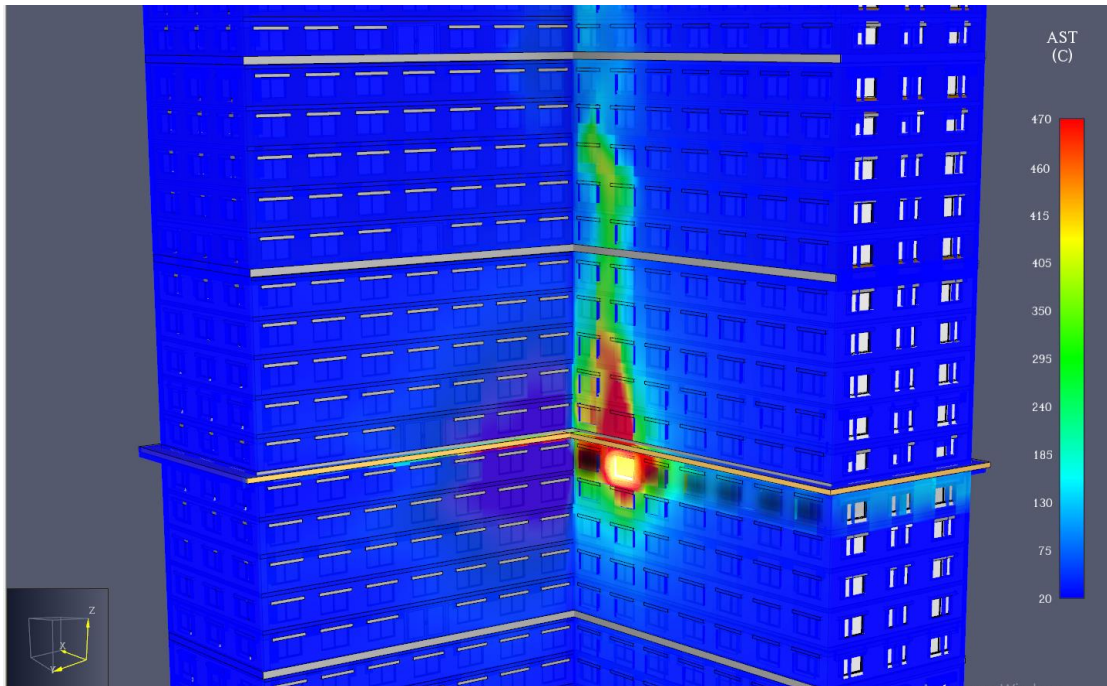


Рисунок 7.3 – Візуалізація теплових розподілів поширення фасадної пожежі для випадку застосування протипожежного карнизу шириною 1,5 м та міжповерхового віконного простінку висотою 0,7 м

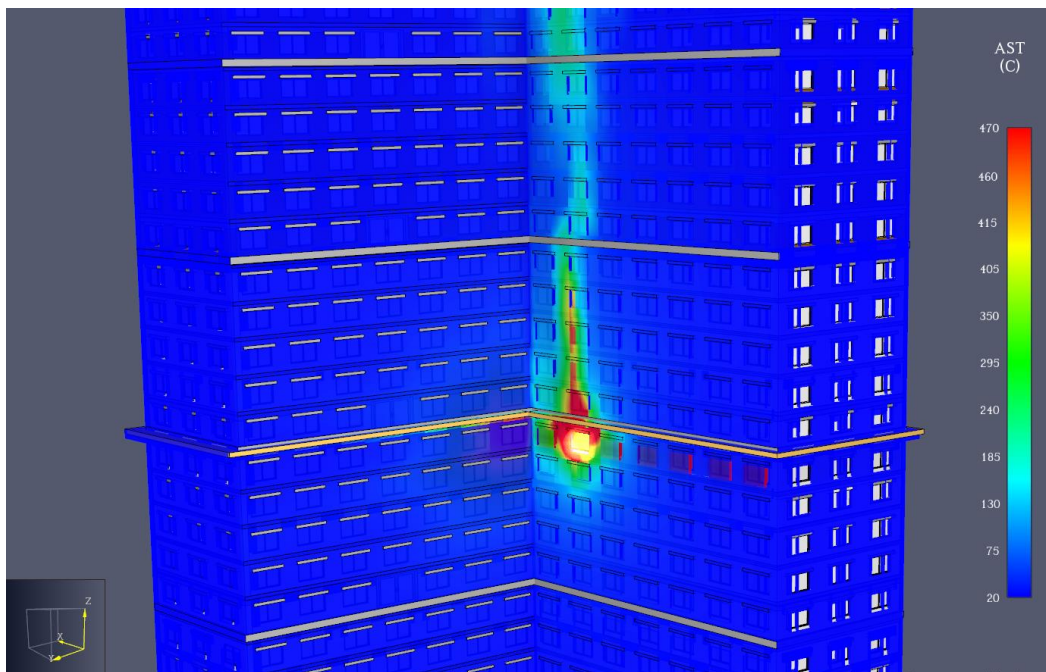


Рисунок 7.4 – Візуалізація теплових розподілів поширення фасадної пожежі для випадку застосування протипожежного карнизу шириною 1,5 м та міжповерхового віконного простінку висотою 1,25 м

За результатом моделювання встановлено, що площа пожежі у продовж 12 хвилин склала  $98 \text{ м}^2$  в середині квартири ( $S_{\text{вн}}$ ) для обох випадків моделювання. Разом із тим, температура біля поверхні фасаду, яка перевищила критичне значення температури в  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  займала площу  $48 \text{ м}^2$  ( $S_{\text{зов}}$ ) для першого етапу моделювання та  $17 \text{ м}^2$  ( $S_{\text{зов}}$ ) для другого етапу моделювання.

Вартість збитків від пожежі від втрати майна ( $\hat{E}_{\text{майн}}$ ) в середині об'єму будівлі приймаємо 120% від вартості будівництва  $1 \text{ м}^2$  ( $28800 \text{ грн/м}^2$ ) та пошкодження конструкцій ( $\hat{E}_{\text{конст}}$ ) приймаємо умовно 60% вартості нового будівництва ( $14400 \text{ грн/м}^2$ ). Таким чином, суму збитків від пожежі  $E_2$  можна виразити наступною залежністю [323]:

$$E_2 = (\hat{E}_{\text{майн}} \times S_{\text{вн}}) + (\hat{E}_{\text{конст}} \times S_{\text{зов}}). \quad \text{грн} \quad (7.16)$$

Таким чином, використовуючи залежність 7.13 визначено, що для випадку застосування протипожежного карнизу шириною 1,5 м та міжповерхового віконного простінку висотою 0,7 м прямі збитки від пожежі склали 1 987 200 грн. Для випадку застосування протипожежного карнизу шириною 1,5 м та міжповерхового віконного простінку висотою 1,25 м прямі збитки від пожежі склали 532 800 грн.

Виходячи із отриманої вартості капітальних витрат на етапі будівництва та суми збитків в разі пожежі визначено, що у випадку застосування розпорядчого чи табличного методу сума збитків становила 1 987 200 грн. В разі застосування спрощеного методу розрахунку з оцінювання заходів щодо забезпечення обмеження поширення пожежі по фасаду сума збитків становила 532 800 грн. При цьому, фактичні додаткові затрати на етапі капітального будівництва склали 30 000 грн. Таким чином, загальний економічний ефект  $E$  за запропонованими розрахунковими методами порівняно із розпорядчим методом нормування підходами для висотної житлової будівлі склав 502 800 грн для даного типу будинку, що означає що у відсотковому еквіваленті суму збитків вдалося зменшити на 25,3%.

## 7.5 Висновки до розділу 7

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. На основі виявлених закономірностей та обґрунтованих критеріїв, які характеризують небезпеку поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями розроблено спрощений розрахунковий метод визначення поширення пожежі по фасадах будівель із застосуванням емпіричних коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$ , які дозволяють врахувати кут прилягання суміжно розташованої площини фасаду та кут нахилу (схилу) фасаду.

2. За результатом проведення серії чисельних експериментів з використанням комп'ютерних моделей обчислювальної газо-гідродинаміки розроблено довідкову таблицю для визначення критичного значення температури для визначених рівнів висоти фасаду в залежності від кутів прилягання суміжних площин фасадів, значення кута його нахилу та типу фасадних протипожежних перешкод, які можуть застосовуватися для обмеження поширення пожежі. Отримані дані дозволили реалізувати розрахунково-табличний метод оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель.

3. Розроблено алгоритм оцінювання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель із використанням польових моделей, заснований на використанні повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса.

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

реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

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

## ВИСНОВКИ

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

1. На основі аналізу вітчизняних та зарубіжних статистичних даних, теоретичних та експериментальних досліджень, а також нормативної бази щодо оцінки поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівлі обґрунтовано та систематизовано чинники, які можуть впливати на обмеження поширення пожежі по фасадам або бути причиною більш швидкого поширення пожежі на вище розташовані поверхи будівлі. Доведено необхідність проведення комплексного прогнозування запобігання поширення пожежі ззовні будівлі на вище розташований поверх з прогнозуванням наслідків пожежі та врахуванням фактичних конструктивних параметрів фасаду.

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

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

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

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

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

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

впливу факелу пожежі може збільшуватись в 1,6-1,8 рази (для кутів від  $0^\circ$  до  $-20^\circ$ ) або зменшуватись в 1,9-2,4 рази (для кутів від  $0^\circ$  до  $+20^\circ$ ) відносно значення температури  $375-400^\circ\text{C}$  для поверхні фасаду, що знаходиться вертикально.

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

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

10. Розроблено науково-методичний апарат, який є системою, що об'єднує створений метод натурних випробувань, спрощений метод розрахунку температури полум'я вздовж висоти фасаду, а також табличний метод визначення температури полум'я вздовж висоти фасаду, що спільно з обґрунтованими критеріями, які характеризують умови поширення пожежі по фасаду, дозволяє визначити умови запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними

конструкціями будівель з негорючим облицюванням та реалізувати параметричний метод нормування вимог пожежної безпеки до будівель.

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



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про надання будівельної продукції на ринку : Закон України від 02.09.2020 р. № 850-ІХ. *Відомості Верховної Ради України*. 2021. №14 стор. 2.
2. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. ДБН В.1.2-7-2008 [Чинний від 2008-10-01]. – К.: Мінрегіонбуд від 26.01.2008 № 39. – 2008. 31 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Одинець А. В., Балло Я. В., Голікова С. Ю., Несенюк Л. П. Аналіз стану з пожежами та їх наслідками у висотних громадських будинках в Україні *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. №2 (10). С. 91 – 102.
4. Фещук Ю. Л., Ніжник В. В., Балло Я. В. Аналіз закордонних нормативних документів щодо вимог пожежної безпеки під час проектування висотних громадських будинків *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2020. Т. 4, №2 . С. 77–88.
5. Spearpoint, M., Fu, I., & Frank, K.. Façade Fire Incidents in Tall Buildings. *CTBUH Journal*.2019. Issue 2, p. 34.
6. White, N., & Delichatsios, M.. Fire hazards of exterior wall assemblies containing combustible components. *Fire Protection Research Foundation*, Ireland 2015. p. 84.
7. Visual Capitalist. Visualizing the Importance of Fire Safety in High-rise Buildings. [www.visualcapitalist.com](http://www.visualcapitalist.com). URL: <https://www.visualcapitalist.com/sp/visualizing-the-importance-of-fire-safety-in-high-rise-buildings/> (дата звернення: 09.05.2022).
8. United states skyscraper diagram. *Skyscraper Page Diagrams* URL: <https://skyscraperpage.com/diagrams/?countryID=2>. (дата звернення: 06.05.2022).
9. News. UL Solutions URL: <https://www.ul.com/services/exterior-wall-system-testing-and-certification> (дата звернення: 12.05.2022).
10. Pti. China building fire: Smoke billows out of 42-storey building in Changsha; no deaths reported. *Zee Business*. URL:

<https://www.zeebiz.com/world/news-china-building-fire-smoke-billows-out-of-42-storey-building-in-changsha-no-deaths-reported-199331>. (дата звернення: 15.05.2022).

11. Massive fire engulfs London high-rise, leaves at least 12 dead. *ABC News*. URL: <https://abcnews.go.com/International/fire-engulfs-london-high-rise-400-fire-engines/story?id=48020634>. (дата звернення: 15.05.2022).

12. LATEST: Grenfell Tower fire investigation. *Mynewsdesk*. URL: <https://web.archive.org/web/20180620052605/http://news.met.police.uk/news/latest-grenfell-tower-fire-investigation-250453> (дата звернення: 15.05.2022).

13. 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).

14. Висотні будівлі. Основні положення. ДБН В.2.2-41:2019. – [Чинний від 2020-01-01]. – К.: Мінрегіон України від 26.03.2019 № 86. – 2019. – 53 с. – (Державні будівельні норми України).

15. Koolhaas building in CCTV complex engulfed by fire. *Artforum. By News Desk* URL: <https://nyartsnewmedia.wordpress.com/2009/02/11/koolhaas-building-in-cctv-complex-engulfed-by-fire> (дата звернення: 17.05.2022).

16. NBC Universal. China TV sorry for fireworks that caused blaze. *NBC News*. URL: <https://www.nbcnews.com/id/wbna29099358> (дата звернення: 19.05.2022).

17. Roaring fire at top of high-rise apartment building injures scores. *CBS News - Breaking news, 24/7 live streaming news & top stories*. URL: <https://www.cbsnews.com/news/ulsan-south-korea-roaring-fire-top-high-rise-apartment-building-injures-scores/> (дата звернення: 19.05.2022).

18. Azerbaijan: heydar aliyev cultural center on fire. *Global Voices*. URL: <https://globalvoices.org/2012/07/20/azerbaijan-heydar-aliyev-cultural-center-on-fire/> (дата звернення: 19.05.2022).

19. DNA India | Latest News, Live Breaking News on India, Politics, World, Business, Sports, Bollywood. URL: <https://www.dnaindia.com/mumbai/report->

mumbai-4-die-but-11-year-old-saves-15-in-parel-s-crystal-tower-fire-2653458.

(дата звернення: 05.02.2022).

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

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. ДСТУ Б В.1.1-4-98. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги. На заміну СТ СЭВ 1000-88 ; чинний від 2006-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2006. 44 с.

24. Балло Я. В. Яковчук Р. С. Кагітін О. І. Стилик І. Г. Аналіз основних методів оцінювання поширення пожежі по фасадах будівель. *Пожежна безпека*, 2022. №41, С. 20-30;

25. Балло Я. В., Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Гордеев П. М. Вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі в висотних будинках: *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції, м. Черкаси. ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 139-141.

26. ДСТУ 9192:2022. Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м. [Чинний від 2023-05-01]. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2023. 39 с.

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

28. National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 285, Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components". Quincy, MA, USA: *National Fire Protection Association*. 2012. 20, p.480.

29. 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. p. 20.

30. ÖNORM B 3800-5:2013. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen. Austrian Standards plus, 2013. s.14.

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

32. Сізіков О. О., Балло Я. В., Добряк Д. О. та ін. До питань розрахунку протипожежного водозабезпечення об'єкта після реконструкції. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2018. № 1 (5). С. 26-31.

33. Балло Я. В., Балло В. П., Голікова С. Ю., Скоробагатько Т. М. Проблемні питання протипожежного водопостачання висотних будинків. *Проблеми надзвичайних ситуацій : матеріали міжнародної наук.-практ. конф.*, 20 трав. 2020 р. Харків : НУЦЗУ, 2020, С. 15-17.

34. Klopovic S., Turan Ö. F. A comprehensive study of externally venting flames—Part I: experimental plume characteristics for through-draft and no-through-draft ventilation conditions and repeatability. *Fire safety journal*. 2001. Vol. 36, no. 2. pp. 99–133.

35. Van Hees P., Semi-natural fire test for façades and curtain walling systems, SPAR 2000:39, *SP Technical Research Institute of Sweden*, 2000. p. 39.

36. Hermodsson T. & Månsson L., Façades: Fire testing of materials and constructions- a first proposal for a test method, SP AR 1992:64, *SP Technical Research Institute of Sweden*, 1992. та Hermodsson T. & Månsson L., Façades: Fire testing of materials and constructions- a first proposal for a test method, SP AR 1992:64, *SP Technical Research Institute of Sweden*, 1992.

37. Ondrus J., Pettersson O. Fire hazards of façades with externally applied additional thermal insulation. Full scale experiments. *Lund Institute of Technology*, 1985, Vol. 3021, p.10.

38. Guillaume, E., Fateh, T., Schillinger, R., Chiva, R., & Ukleja, S.. Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. *Fire and Materials*. 2018. 42(5), pp. 561-577.

39. Modeling of fire exposure in facade fire testing / J. Anderson et al. *Fire and materials*. 2017. Vol. 42, no. 5. pp. 475–483.

40. McKenna S. T., Jones N., Peck G., Dickens Hull T. R.. Fire behaviour of modern façade materials–Understanding the Grenfell Tower fire. *Journal of hazardous materials*, 2019. 368, pp. 115-123.

41. ASTM D1929-96 - Standard Method for Determining Ignition Temperatures of Plastics.–[Published:10/07/1996] American society for testing and materials. 1996. p. 5

42. Alvares, N., & Hasegawa, H. In Search of Standard Reference Materials for ASTM E05 Fire Standards. In *Uncertainty in Fire Standards and What to Do About It. ASTM International*.2012. Volume 22, Issue 4, p. 14.

43. Macdonald, N. J. A comparison of BS 8414-1 &-2, draft DIN 4102-20, ISO 13785-1 &-2, EN 13823 and EN ISO 11925-2. *Herts, UK: BRE Global*, 2012. p. 28.

44. DIN 4102-20-2017. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. GIS, 2017. 25 h.

45. ÖNORM B 3800-5:2013.Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen.Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen. *Austrian Standards plus*, 2013. p.14.

46. Teibinger M., Matzinger I., Schober P. Experimental study of the fire performance of wooden facades. In *MATEC web of conferences* 2013. (Vol. 9, p. 02004). EDP Sciences.

47. International Electrotechnical Commission. Thermocouples—part 1: EMF specifications and tolerances. *Technical Report 60584-1*. 2013. p. 78.
48. Engel, T., & Werther, N. Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. *Fire Technology*, 2021. pp. 1-35.
49. JIS A 1310:2015 Test method for fire propagation over building façades.— [Published:25/01/2015] *Japanese Standards Association*. 2015. 25 p.
50. Yuhei N., Takafumi N., Hideki Y., Manabu K.. A study on heat output for JIS A 1310 “Test method for fire propagation over building façades”. *Journal of Environmental Engineering (Japan)*, 2018. 83(753), pp. 851-860.
51. Oleszkiewicz I. Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. *Fire Technology*, 1991. 27(4), pp. 334–340.
52. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility. In *MATEC Web of Conferences*. 2016. (Vol. 46, p. 03001). EDP Sciences.
53. Résultats de l’essai au feu LEPiR 2 réalisé sur une paroi en béton de chanvre au centre d’essais eu feu du cerib. *CERIB* : веб-сайт. URL: <https://www.cerib.com/espace-presse/resultats-de-lessai-au-feu-lepir-2-realise-sur-une-paroi-en-beton-de-chanvre-au-centre-dessais-eu-feu-du-cerib/> (дата звернення: 15.06.2022).
54. Hirschler, M. M. Façade requirements in the 2021 edition of the US International Building Code. *Fire and materials*, 2021. 45(5), pp. 586-597.
55. Kweon, O. S., Yoo, Y. H., & Kim, H. Y. The Study on Real Scale Fire Test of Building Exterior Wall Assemblies. In *Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference*. 2011. pp. 295-300.
56. Hansbro, J. NFPA 285-2006 Approval for wall assemblies using foam plastic insulation. *Interface*, 2010. pp. 34-6.
57. GOST 31251-2008. Facades of buildings. Fire hazard test method. Interstate council for standardisation, metrology and certification; [Published:01/05/2010] *Interstate standard*. 2008. p. 27.

58. Cemintel Territory: Secures AS 5113 with EW classification. *Architecture & Design* : веб-сайт. URL: <https://www.architectureanddesign.com.au/suppliers/cemintel/non-combustible-fibre-cement-cladding#>. (дата звернення: 20.06.2022).

59. AS 1530.4:2014 Standards Australia (SA). AS/NZS 1530.4-2014, Methods for Fire Tests on Building Materials, Components and Structures – Fire-Resistance Test of Elements of Construction, 2015. Sydney, Australia, p. 37.

60. Móder, I., Varga, Á., Geier, P., Vágó, B., & Rajna, E. Brief summary of the Hungarian test method (MSZ 14800-6: 2009) of fire propagation on building façades. In *MATEC web of conferences*. 2016. (Vol. 46, p. 01002). EDP Sciences.

61. Smolka, M., Messerschmidt, B., Scott, J., & le Madec, B. Semi-natural test methods to evaluate fire safety of wall claddings. In *MATEC Web of Conferences*. 2013. (Vol. 9, p. 02012). EDP Sciences.

62. Yoshioka, H., Ohmiya, Y., Noaki, M., & Yoshida, M. Large-scale facade fire tests conducted based on ISO 13785-2 with noncombustible facade specimens. *Fire Science and Technology*, 2011. 31(1), pp. 1-22.

63. Методика натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблюваних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню К.: УкрНДІПБ МНС України, 1999, 18. с.

64. 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. [Чинний від 2021-01-08]. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2021. 15 с.

65. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека (261 – Пожежна безпека). – *Український науково-дослідний інститут захисту, Київ; Національний університет цивільного захисту України, Харків*, 2020, 409 с.

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

67. Crinson M. What Is Modern Architecture?. In *The Routledge Companion to Contemporary Architectural History*. 2021. (pp. 86-99). Routledge.

68. Gilbert-Rolfe, J., & Gehry, F. O. *Frank Gehry: the city and music*. Psychology Press, 2021. p. 91.

69. М. М. Семерак, М. Р. Михайлишин. Вплив швидкості вітру на процеси теплообміну між вертикальними сталевими резервуарами (на прикладі пожежі на нафтобазі "БРСМ Нафта"). *Пожежна безпека*. 2017. № 30. С.137-147.

70. Wan P.; Han X.; Mao J. Very Large Eddy Simulation of turbulent flow and heat transfer for single cylinder and cylindrical pin matrix. *Appl. Therm. Eng.* 2020, 169, 114972.; Battista, G, Mauri, L.: Numerical study of buoyant flows in street canyon caused by ground and building heating. *Energy Proc.* 2016. 101, pp. 1018–1025.

71. Huang K. T., Li Y. J. Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings*, 2017. 154, pp. 448-464.

72. Krüger E., Pearlmutter D., Rasia F. Evaluating the impact of canyon geometry and orientation on cooling loads in a high-mass building in a hot dry environment. *Applied energy*, 2010. 87(6), pp. 2068-2078.

73. Ni, Shuna & Gernay, Thomas. Evaluation of expected damage costs from fire in concrete building structures / The 11th International Conference on Structures in FireAt: *The University of Queensland, Brisbane, Australia*, 2020. p. 301-312.

74. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPIR2 testing facility. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 46. P. 03001.



75. DIN 4102-20 Fire behaviour of building materials and building components - Part 20: Complementary verification for the assessment of the fire behaviour of external wall claddings – [Published:10/01/2017] Standard by Deutsches Institut Fur Normung E.V. 2017. – 25 p. – (German National Standard).

76. Delichatsios, M. A. Enclosure and Façade fires: Physics and applications. *Fire Safety Science*, 2014. 11, 3-27.

77. Lee, Y. P., Delichatsios, M. A., Ohmiya, Y., Wakatsuki, K., Yanagisawa, A., & Goto, D. Heat fluxes on opposite building wall by flames emerging from an enclosure. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009. 32(2), p.2551-2558.

78. Fang, X., Zhang, X., Yi, J., Sun, X., Tang, F., Ren, F., & Hu, L. Experimental study on vertical temperature of facade fire plume ejected from compartment constrained by adjacent single sidewall. *International Journal of Thermal Sciences*, 2023. 193, 108470.

79. Lu, K., Hua, L., Delichatsios, M.A., Tang, F., Qiu, Z., and He, L. Merging Behavior of Façade Flames Ejected from Two Windows of an Under-ventilated Compartment Fire. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. Vol. 35 (3). pp. 2615–2622.

80. White, N., and Delichatsios, M.A, “Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components”, Fire Protection Research Foundation, Document Number: EP142293, *Quincy, Massachusetts*, U.S.A, 2014. p. 159

81. Delichatsios, M. A., Ryan, J., Tian, N., & Zhang, J. Vertical safe separation distance between openings in multi-storey buildings having a fire resistant spandrel. In *MATEC web of conferences*. 2016. (Vol. 46, p. 04003). EDP Sciences.

82. Carlsson Emil. External Fire-spread to Adjoining Buildings - A review of fire safety design guidance and related research. Report. *Department of Fire Safety Engineering Lund University*, 1999. Sweden p. 125.

83. X. Ma et al. Experimental Study of Thermal Behavior of Insulation Material Rigid Polyurethane in Parallel, Symmetric, and Adjacent Building Façade Constructions / *Polymers*. 2018. Vol. 10, no. 10. p. 1104.

84. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (*EN 1991-1-2:2002, IDT*); чинний від 2014-07-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2014. 18 с.

85. Ma, X., Tu, R., Ding, C., Zeng, Y., Xu, L., & Fang, T.. Experimental study on thermal safety analysis of flexible polyurethane at various facade inclined structures under low ambient pressure condition. *Engineering Structures*, 2018. 176, pp. 11-19.

86. Kashiwagi T., Newman D. L. Flame spread over an inclined thin fuel surface. *Combustion and Flame*. 1976. Vol. 26. pp.163–177.

87. Modeling the Pyrolysis and Combustion Behaviors of Non-Charring and Intumescent-Protected Polymers Using “FiresCone” / L. Shi et al. *Polymers*. 2015. Vol. 7, no. 10. pp. 1979–1997.

88. Buchanan A.H. Fire Engineering Design Guide, Centre for Advanced Engineering, Editor, *University of Canterbury*, 1994. p. 203.

89. Thomas P. H., Webster C. T., Raftery M. M. Some experiments on buoyant diffusion flames. *Combustion and Flame*. 1961. Vol. 5. pp. 359–367.

90. Mizuno T., Kawagoe K. Burning behaviour of upholstered chairs. part 3. flame and plume characteristics in fire test. *Fire science and technology*. 1986. Vol. 6, no. 1/2. pp. 29–37.

91. Oleszkiewicz, I. Heat transfer from a window fire plume to a building facade. ASME HTD – Collected Papers in Heat Transfer, Canada. 1989. p. 163–170

92. Floyd J., Forney G., Hostikka S., Korhonen T., McDermott R., McGrattan, K. B., & Weinschenk, C. (2012). Fire dynamics simulator user’s guide. *NIST special publication*, p. 1019.

93. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania, 1984. p. 358.

94. Hassan M. K., Hossain M. D., Gilvonio M., Rahnamayiezekavat P., Douglas, G., Pathirana S., Saha S. Numerical investigations on the influencing

factors of rapid fire spread of flammable cladding in a high-rise building. *Fire*, 2022. 5(5), p.149.

95. Choi J. H., Cho K. S., Chae S. U. Combustion extension of expansion architectural bond for EIFS with BS 8414. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 2019. 19(1), pp.153-159.

96. Jansson R., Anderson J. Experimental and numerical investigation of fire dynamics in a façade test rig. *Proceedings of fire computer modeling, Santander, Spain*, 2012. p. 247.

97. Nilsson M., Mossberg A., Husted B., Anderson J. Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK*. 2016. Vol. 2, pp. 1163-1174.

98. Markus Nilsson. The impact of horizontal projections on external fire spread- A numerical comparative study, Division of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden Rapport 5510, Lund 2016. p. 147

99. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings—Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*, 2010. 71(4), pp. 373-385.

100. Nwadike A., & Wilkinson S. Challenges facing building code compliance in New Zealand. *International Journal of Construction Management*, 2022. 22(13), pp. 2493-2503.

101. Norwegian Building Codes. Veiledning om tekniske krav till byggverk Kapittel 11. Sikkerhet ved brann. Direktoratet For Byggkvalitet, 2015. Norway.

102. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 46, p. 03001). 2016. EDP Sciences.

103. Corticos N. D. Improving residential building efficiency with membranes over façades: The Mediterranean context. *Journal of Building Engineering*, 2020. 32, 101421.

104. Drean V., Schillinger R., Leborgne H., Auguin G., Guillaume E. Numerical simulation of fire exposed facades using LEPiR II testing facility. *Fire Technology*, 2018. 54(4), pp. 943-966.

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

106. Drean, V., Schillinger, R., & Auguin, G. Assessment of an insulating air layer model of façade external system: contribution to fire simulation of facade performance fire test. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2018. Vol. 1107, No. 4, p. 042004.

107. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model / К. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1018-5. 2009. p. 94.

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

109. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Рівняння Нав'є – Стокса : навч. посіб. / В. А. Каліон. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2016. – 221 с.

110. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Модельні задачі / В. А. Каліон. – К. : ВПЦ "Київський університет". – 2011.

111. Griebel, M., Dornseifer, T., & Neunhoffer, T. (1998). *Numerical simulation in fluid dynamics: a practical introduction*. Society for Industrial and Applied Mathematics. p. 14.

112. Тепломасообмінні процеси в системах ТГВ підручник / В. Й. Лабай. Нац ун-т "Львів. політехніка". Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2021. 339 с.

113. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій.

Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздєєв С. В. [та ін.]. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. 120 с.

114. Чепурний М. М. Застосування теорії подібності для розв'язання задач тепломасообміну / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко, В. В. Бужинський. – Вінниця: ВДГУ, 2001.– 110 с.

115. Сохацький А. В. Порівняння нових та відомих в змінних вихор-функція течії в криволінійній неортогональній системі координат. А. В. Сохацький. *Придніпровський науковий вісник*. Дніпропетровськ : Дніпропетровський державний університет. 1996. № 4. С. 20.

116. Pozrikidis C. Fluid dynamics: theory, computation, and numerical simulation. – USA: *Kluwer academic publishers*, 2001. – 557 p.

117. Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць / редкол.: А. П. Дзюба (відп. ред.) та ін. – Дніпро: Ліра, 2019. – Вип. 30. – 220 с. Укр., рос. та англ. мовами.

118. Беляєв Н.М. Основи теплопередачі. К.: *Вища школа.*, 1989. - 344 с.

119. Graham, R. Concrete Mathematics. A Foundation for Computer Science / R. Graham, D. Knuth, O. Patashnic. Ed. 2. *Addison-Wesley*, 1998. — 657 p.

120. Перестюк М.О., Маринець В.В. Теорія рівнянь математичної фізики. – К.: *Либідь*, 2001. 334 с.

121. Гончаренко В.М. Основи теорії рівнянь з частинними похідними. – К.: *Вища школа*, 1995. –350 с.

122. Nieto M., Lopéz F., Cruz-Roldan F. Performance analysis of technology using the S curve model: The case of digital signal processing (DSP) technologies. 1998. Vol. 18, №. 6. pp. 440-448.

123. Неспляк Д. М. Дослідження процесів нелінійної теплопровідності у товстостінних складених тілах / Д. М. Неспляк , І. С. Муха // *Мат. методи та фіз.-мех. поля.* – 2007. – Т. 50, № 2. – С. 176 – 182.

124. Walter, E. Numerical Methods and Optimization: a Consumer Guide [Text] / E. Walter. — Springer, 2014. — 476 p.

125. K. Kesava Rao. An Introduction to Granular Flow [Text] / K. Kesava Rao, Prabhu R.Nott. — New York : Publ. in the USA by Cambridge University Press, 2008. — 490 p.

126. Yunus, Shah M., Pawlak, Timothy P., and Cook R.D., Solid Elements with Rotational Degrees of Freedom Part 1 and Part 2, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1991. Vol. 31, pp. 573 – 610.

127. Сізіков О. О., Ніжник В. В., Балло Я. В. та ін. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2019. 2 (8). С. 41-49.

128. Ніжник В. В., Балло Я. В., Поздеев С. В., Некора В. С. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією. *Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування КНУБА*. Київ, 2019. №69. С. 278-290.

129. 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.

130. ДСТУ 3855-99. Пожежна безпека. Визначення пожежної небезпеки матеріалів та конструкцій. Терміни та визначення. Чинний від 1991-03-19. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2000. 34 с.

131. Zhou, B., Yoshioka, H., Noguchi, T., & Wang, K. Experimental study on vertical temperature profile of EPS external thermal insulation composite systems masonry façade fire according to JIS A 1310 method. *Fire and Materials*, 2021. 45(5), С. 648-662.

132. White N., Delichatsios M. () Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components. Australia : *Fire Protection Research Foundation*, 2018. Vol.10. p.152.

133. Пазен О. Ю., Бережанський Т. Г., Башинський О. І., Пелешко М. З. Вплив температурних режимів пожеж на вогнестійкість будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць «Пожежна безпека»*, 2017. №31, С. 6-10.

134. Dos Santos, W. N., De Sousa, J. A., & Gregorio Jr, R. Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperatures. *Polymer Testing*, 2013. 32(5), pp. 987-994.

135. H. Lobo, Thermal conductivity and diffusivity of polymers, in: *Handbook of Plastics Analysis*, Marcel Dekker Inc, 2003.

136. BS EN 1634-1:2014+A1:2018; Fire Resistance and Smoke Control Tests for Door and Shutter Assemblies, Openable Windows and Elements of Building Hardware - Part 1: Fire Resistance Test for Door and Shutter Assemblies and Openable Windows. *British Standards Institution*. London, UK, 2018; p. 38.

137. Lau, K. W., & Chow, W. K. A study on the fire safety issues for large window openings in supertall residential buildings in Hong Kong. In *Purdue Conferences*. 2014. p.18.

138. Kinowski, J., Sędlak, B., & Sulik, P. Large glazing in curtain walls—study on impact of fixing methods on fire resistance. In *MATEC Web of Conferences* 2016. Vol. 46, p. 05004. EDP Sciences.

139. Новак С.В. Валідація та верифікація розрахункових методів у сфері пожежної безпеки / С.В. Новак, М.С. Новак, Б.Б. Грог'ян // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю: «Надзвичайні ситуації «Безпека та захист». Черкаси. 2017. с.38 – 40.

140. Ballo Y., Yakovchuk R., Nizhnyk V., Borysova A. Determining the effect of fire from external air conditioning units on buildings' facades *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, 10 (117). P. 72–79. (Scopus Q3).

141. EN, B. (2009). 13501-1: 2007+ A1: 2009, “Fire Classification of Construction Products and Building Elements—Part 1: Classification Using Data from Reaction to Fire Tests”. *British Standard Institution (BSI), London, UK*.

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

143. Anderson J., Boström L., Jansson R., Milovanović B. Fire dynamics in façade fire tests: Measurement, modeling and repeatability. In *Proceedings of the International Conference in Dubrovnik*. 2015. Vol. 15, p. 16.

144. Nilsson M., Mossberg A., Husted B., Anderson J. Protection against external fire spread - Horizontal projections or spandrels. *14th International Fire Science & Engineering Conference*, Royal Holloway College, University of London, UK, 2016. Vol. 2, pp. 1163-1174.

145. Ghassempour N., Tannous W. K., Avsar G., Agho K. E., Harvey L. A. Estimating the total number of residential fire-related incidents and underreported residential fire incidents in New South Wales, Australia by using linked administrative data. *International journal of environmental research and public health*, 2021. 18(13), 6921.

146. Сізіков О. О., Балло Я. В., Голікова С. Ю., Жихарев О. П. Визначення процедури проведення суб'єктом управління пожежною безпекою внутрішнього аудиту з оцінки протипожежного стану об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. – Київ, 2020. №1(9). С. 84-93.

147. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019. – [Чинний від 2019-10-01]. – К.: Мінрегіон України від 26.04.2019 № 104. – 2019. – 185 с. – (Державні будівельні норми України).

148. Дворкін Л.Й. Опоряджувальні матеріали і вироби. Довідник. – К.: Вища шк., 1993. – 325 с.

149. Gavryliuk A., Yakovchuk, R., Ballo Y., Rudyk Y. Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building *SAE International Journal of Transportation Safety*. 2023, T. 11(3), P. 421–434 (Scopus Q3).

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



151. Будинки і споруди. Проектування висотних житлових і громадських будинків. ДБН В.2.2-24:2009 – [Чинний від 2009-09-01]. – К.: Мінрегіон України від 12.02.2009 № 67. – 2009. – 105 с. – (Державні будівельні норми України).

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

153. Балло Я. В., Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Гордєєв П. М. Вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі в висотних будинках Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», м. Черкаси, 2020. С. 139-141.

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

155. Marija J. R., Carević M., Pečur I. B. (2017). Fire protection of façades. *University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering Zagreb, Croatia*, pp. 26-35.

156. Zhang S, Teizer J, Lee J, Eastman C, Venugopal M. Building information modeling (BIM) and safety: automatic safety checking of construction models and schedules. *Autom Constr.* 2013; 29: pp. 183-195.

157. Chen, H., Hou, L., Zhang, G. K., & Moon, S. Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, 2021. 125, 103631.

158. Yildiz M. A., Beyhan F. Developing a Performance-Based Approach to the Effect of Roof Features on Fire Safety in Buildings with Atriums. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 2024 11(1), pp. 33-48.

159. Al-Waked R., Nasif M., Groenhout N., Partridge L. Natural ventilation of residential building Atrium under fire scenario. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021. 26, 101041.

160. Wang Y., Zhang X., Zhou J. Study on Fire Characteristics of Typical Atrium. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 510, No. 5, p. 052011.

161. McGrattan Kevin, et al. Fire Dynamics Simulator User's Guide, Sixth Edition. *National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA. NIST Special Publication*. 2015. 1019. p. 147.

162. Heinisuo M., Laasonen M., Hyvärinen T., Berg T. Product model in fire safety concept, effect of grid size and obstacles. In *IABSE Conference 2008, Information and Communication Technology (ITC) for Bridges, Buildings and Construction Practice, Helsinki, Finland, June 4-6, 2008*. pp. 82-83.

163. Kim W. O., Park W. C. A study on grid aspect ratio of fire dynamics simulator. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 2015. 39(9), pp. 923-928.

164. Mirjana Laban, Jelena Marković, Edisa Nukic / Fire safety in buildings: a Western Balkan approach and practice/University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences ISBN: ISBN 978-86-6022-279-6 2020.

165. ВБН В.2.2-58.1-94, Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа – [Чинні від 1999-12-24]. – К.: МНТКБ від 18.03.1994 № 133. – 1994. – 196 с. – (Відомчі будівельні норми України).

166. ДСТУ Б CEN/TS 14816:2013 Стаціонарні системи пожежогасіння. Дренчерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування 139 (CEN/TS 14816:2008, IDT). Чинний від 2014-04-01. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2013. 45 с.

167. ДСТУ Б 13565-2:2013 Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пінного пожежогасіння. Частина 2. Проектування, монтування та технічне

обслуговування (EN 13565-2:2009, IDT). Чинний від 2014–04–01. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2013. 98 с.

168. Антонов А.В. Експериментальні дослідження властивостей та вогнегасної здатності тонкорозпилених водних розчинів неорганічних солей. А.В. Антонов, А.І. Турчин. *Пожжежна безпека: Збірник* – Львів : 2001.- 45 с.

169. Узагальнення і розвиток наукових основ розроблення та технологій застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Антонов Анатолій Васильович ; Держ. екол. акад. післядиплом. освіти та упр. - Київ, 2017. - 55 с.

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

171. Approved Document B (fire safety) volume 1: Dwellings, 2019 edition incorporating 2020 amendment. *RIBA Books*, p. 180.

172. Norme di prevenzione incendi generali e semplificate. Premessa generale. Con l'emanazione del decreto del Presidente della Repubblica 1 agosto 2014. p. 201.

173. ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. Конструкції будинків і споруд. Настанова щодо проектування й улаштування вікон та дверей. Чинний від 2011-07-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2011. 42 с.

174. Anirudh Sundar. Innovative structural designs – case Gate. *Sastra University*, 2017. p. 6.

175. Tomás Domínguez del Castillo (1996). Las Torres Puerta de Europa, Madrid. Espana. *Informes de la Construcción*, 48(444), p. 5-36.

176. West, P. L., & Coad, C. The CCTV Headquarters—Horizontal Skyscraper or Vertical Courtyard? Anomalies of Beijing Architecture, Urbanism, and Globalisation. *M/C Journal*, 2020. 23(5). p. 74.

177. Chow W. K., Chau C. Y. General views on fire aspects of atrium buildings in Hong Kong. *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 1994. 18(1), 43-52.

178. Trimble B. E. Design of unique landscape walls and their use in building facades. In *Proceedings of the 12th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, BC, Canada*. 2013. pp. 2-5.

179. Robak A., Pieńko M., Błazik-Borowa, E. Examples of unusual construction scaffoldings used for renovation works of historic buildings. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 2015. 18(3), pp.115-120.

180. Ilgin H. E. Use of aerodynamically favorable tapered form in contemporary supertall buildings. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 2022. 3(2), pp. 183-196.

181. Nizhnyk V., Ballo Y., Pozdieiev S., Borovykov V., Feshchuk Y. Simulation of thermal impact of flames coming from class “B” test fire on the elements of the adjacent facilities *International Scientific Journal «Internauka»*. Київ, 2019. №14 (76). С. 39-44.

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

183. Paugam, R., Wooster, M. J., & Roberts, G. Use of handheld thermal imager data for airborne mapping of fire radiative power and energy and flame front rate of spread. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012. 51(6), 3385-3399.

184. Amon F., Bryner N. P., Lock A., Hamins, A. *Performance Metrics for Fire Fighting Thermal Imaging Cameras-Small-and Full-scale Experiments*. National Institute of Standards and Technology. Building and Fire Research Laboratory. Fire Research Division. 2008. pp. 116-132.

185. Valero M. M., et al. "Automated location of active fire perimeters in aerial infrared imaging using unsupervised edge detectors." *International journal of wildland fire* 27.4. 2018. pp.241-256.

186. Cohen, Fred E., and Michael JE Sternberg. "On the prediction of protein structure: the significance of the root-mean-square deviation." *Journal of molecular biology* 138.2. 1980. pp. 321-333.

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

188. Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. УкрНІЦЗ. Київ. 2007. с. 32.

189. Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України. Затверджені наказом МНС України від 07.05.2007 № 312, зареєстровані в Міністерстві юстиції України 20 лютого 2012 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0241-12>.

190. Дослідження хімічних речовин, як складників вогнегасних порошків для гасіння легких матеріалів / В.В. Ковалишин, В.М. Марич, Я.Б. Кирилів, В.В. Кошеленко, О.Л. Мірус - *Збірник наукових праць "Пожежна безпека"*, ЛДУБЖД. - № 29. - 2016. - С. 46-56.

191. В. Ковалишин, Я. Кирилів, Б. Гусар, Т. Войтович, Вол. Ковалишин, А. Корнієнко, В. Чернецький. 2017. Перспективи гасіння пожеж водопінними вогнегасниками. *Пожежна безпека* №31, С. 49-58.

192. Degaev Evgeniy. New classification of foaming agents for fire extinguishing. *MATEC Web of Conferences*. Vol. 193. EDP Sciences, 2018.

193. Liu Zhigang, Don Carpenter, Andrew K. Kim. "Cooling characteristics of hot oil pool by water mist during fire suppression." *Fire safety journal* 43.4 2008. pp. 269-281.

194. ДСТУ 8936:2019. Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови. Чинний від 2019-11-13. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2019. 23 с.
195. Циганенко Л. А., Жолобка А. І. Дослідження роботи несучих елементів навісної фасадної системи. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Будівництво*, 2015. 10, С. 61-64.
196. ДСТУ Б В.2.7-61:2008. Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні рядові і лицьові. Технічні умови (EN 771-1:2003, NEQ). Чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2008. 45 с.
197. Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів : навч. посіб. / Т. П. Говорун, А. Ф. Будник, В. Б. Юскаєв. – Суми : Сумський державний університет, 2014. – 255 с.
198. Ishchenko, I. I., et al. "Investigation of the influence of heat-resistant coatings on the fatigue strength of heat-resistant steel." *Strength of Materials* 3.10 1971. pp. 1208-1213.
199. Gołębiowski W., Wolak A., Zajac G. Definition of oil change intervals based on the analysis of selected physicochemical properties of used engine oils. *Combustion Engines*, 2018. p. 57.
200. Growcock F. B., S. L. Andrews, T. P. Frederick. Physicochemical properties of synthetic drilling fluids. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. SPE, 1994. pp. 181-190.
201. Gross D. Measurements of fire loads and calculations of fire severity. *Wood and Fiber Science*. 1977. pp.72-85.
202. Choi Su-Young, et al. Comparative study on the estimation method of fire load for residential combustibles. *Fire Science and Engineering* 27.6 2013. pp. 38-43.
203. Балло Я. В. Сізіков О. О., Ніжник В. В., Жихарєв О. П. Критерії оцінювання впливу висхідного теплового потоку на поширення пожежі по фасадним системам. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України*, 2022. С. 6-7.

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

205. 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*, Vol.5 10 (125), p. 43–52.

206. Khuri A. I., Conlon M. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions. *Technometrics*, 1981. 23(4), pp. 363-375.

207. Kekatos V., Giannakis G. B. Sparse Volterra and polynomial regression models: Recoverability and estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011. 59(12), pp. 5907-5920.

208. GB15763.1-2009. Safety glazing materials in building. Part 1 : Fire-resistant glass. Effective from 2001-07-13. Official edition. Republic of China : Former State Building Materials Industry Bureau, 2001. 13 p.

209. A. Borysova, V. Nizhnyk, Ya. Ballo, O. Kyrychenko Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated cardboard. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport » (Scopus)*, Kharkiv, 2021. С. 1-7.

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

211. Rossa Carlos G., Paulo M. Fernandes. An empirical model for the effect of wind on fire spread rate. *Fire* 1.2. 2018. p. 31.

212. Weise David R., and Gregory S. Biging. A qualitative comparison of fire spread models incorporating wind and slope effects. *Forest Science* 43.2. 1997. pp. 170-180.

213. Pimont François, J-L Dupuy, and R. R. Linn. Coupled slope and wind effects on fire spread with influences of fire size: a numerical study using FIRETEC. *International journal of wildland fire* 21.7. 2012. pp. 828-842.

214. Pitts W. M. Wind effects on fires. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1991. 17(2), pp. 83-134.

215. Ковалишин Б. М. "Обґрунтування ефективності спалювання вуглеводневого палива в електричному полі високої напруги." *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК* 174 (1). 2012. С. 92-98.

216. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. М. Нуянзін, С. В. Поздєєв, В. М. Андрієнко [та ін.]. *Пожезна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць*. Черкаси : АПБ, 2013. № 13. С. 91 – 100.

217. Nilsson M., Mossberg A., Husted B., & Anderson J. Protection against external fire spread-Horizontal projections or spandrels. In *14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK*. 2016. Vol. 2, pp.1163-1174.

218. Nilsson M., Husted B., Mossberg A., Anderson J., McNamee R. J. A numerical comparison of protective measures against external fire spread. *Fire and Materials*, 2018. 42(5), pp. 493-507.

219. Huang Z., Tian Z., Chen, X. Numerical study of effects of wind on the vertical fire spread with vertical/horizontal spandrel. *The 13th International Conference on Computational Methods (ICCM)*. 2022. 9 p.

220. Luo M., Zhao L., Cheng V., Yau R. Performance-based fire engineering design: Application of a CFD model for the prevention of external fire spread. *Preliminary Proceedings, 5th AOSFST, Newcastle, 2001*. Australia. pp. 429-439.



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

222. Собошанський Д. І., Анохін Г. О., Склизкова Л. А. Водяні завіси в системах забезпечення протипожежного захисту об'єктів різного призначення. *Науковий вісник УкрНДІПБ*, 2010. (2), С. 22.

223. Бенедюк В. та ін. «Результати лабораторних досліджень екрануючої здатності водяних завіс від проникнення небезпечних факторів пожежі.» *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* 2(14). 2022. С. 52-64.

224. Стилик І., та ін. «Шляхи та проблемні питання впровадження водяних протипожежних завіс в Україні». *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* 2 (10), 2020. С. 22-31.

225. Бенедюк В. та ін. «Натурні експериментальні дослідження екранувальної здатності суцільних водяних завіс від проникнення потоку теплового випромінювання та диму» *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* 2 (16). 2023. С. 77-87.

226. Баланюк В. М., Копистинський, Ю. О. Чинники, що забезпечують екрануючу здатність теплового випромінювання вогнегасними аерозолями. *The 3 rd International scientific and practical conference—Modern research in world science SPC—Sci-conf. com. ua*, Lviv, Ukraine. 2022. 1867 p. (p. 360).

227. Баланюк В., Герасім'юк О., Копистинський Ю, Гринова А. Перспективи використання вогнегасного аерозолію на основі неорганічних солей калію для екранування теплового випромінювання на пожежах. *Пожежна безпека*, 2021. 39, С. 56-62.

228. Регуш А. Я., Желяк В. І. Рекомендації для гідравлічного розрахунку автоматичних систем водяного пожежогасіння. *УкрНДЦЗ*, Київ, 2016. с. 479.

229. ДСТУ Б EN 12845:2011. Стационарні системи пожежогасіння. Автоматичні спринклерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування (EN 12845:2004+A2:2009, IDT). Вид. офіц. Київ : (УкрНДІПБ) МНС України, 2011. 247 с.

230. Waldemar Wnęk, Kubica Przemysław, Basiak Mariusz. Standard s for the installation of automatic sprinkler systems-the comparison of the general parameters. *Safety & Fire Technology* 27. 2012. p.p. 83-96.

231. Корнієнко О. В., Бенедюк В. С., Стилик І. Г., Тимошенко О. М. Актуальні питання нормативної бази в Україні щодо застосування водяних завіс. : *Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Київ, 9-10 жовт. 2018 р.* – Київ: Видавничий дім «Гельветика», 2018. 223 с.

232. ДСТУ Б CEN/TS 14816:2013. Стационарні системи пожежогасіння. Дренчерні системи. Проектування, монтування та технічне обслуговування. Вид. офіц. Київ : ДП УкрНДНЦ, 2013. 72 с.

233. Жартовський С. В., Уханський Р. В., Копильний М. І. Використання водних вогнегасних речовин комплексної дії для гасіння твердих і рідких речовин. *Пожежна безпека: теорія і практика* 14. 2013. С. 112-119.

234. Скоробагатько Т. М., А. В. Антонов, М. І. Копильний. "Ефективність гасіння бінарних сумішей дизельного та біодизельного палива тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами." *Науковий вісник УкрНДІПБ* 1. 2013. С. 92-99.

235. Жартовський С. В. Сучасні засоби активного і пасивного захисту об'єктів культового призначення. *Пожежна безпека* 22. 2013. С. 81-86.

236. Антонов А.В., Боровіков В.О.; Орел В.П., Жартовський В.М., Ковалишин В.В. Вогнегасні речовини. Посібник. Київ: *Пожінформтехніка*. 2004. 176 с.

237. Ковалишин В. В. Обґрунтування та розрахунок параметрів гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях. В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, С. І. Гончаренко. *Пожежна безпека : зб. наук. праць.* – Черкаси : ЧПБ, 2014. – № 17. – С. 39-46.

238. Сізіков О. О., Балло Я. В., Бенедюк В. С. Вплив цільових добавок до води на ефективність гасіння пожеж твердих речовин. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2016. 26(8), С. 298-303.

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

240. Щодо комплексної оцінки пожежної небезпеки вогнезахищеної деревини [Електронний ресурс] / О. Д. Гудович, О. В. Корнієнко // Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту. - 2013. - № 1. - С. 104-110. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nzidu\\_2013\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nzidu_2013_1_19).

241. Гринюк Т. Ю. "Безпека людини як комплексний підхід до питань охорони праці, безпеки життєдіяльності, цивільного захисту та пожежної безпеки." *Психолого-педагогічні основи гуманізації навчально-виховного процесу в школі та ВНЗ* 2. 2013. зб. наук. пр.- Рівне. С. 38-43.

242. Цапко Ю. В., Цапко, О. Ю. Комплексний підхід до оцінювання ефективності вогнезахисту інтумесцентного покриття для деревини. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*, 2017. С. 220-228.

243. Chuvieco Emilio, et al. "Integrating geospatial information into fire risk assessment." *International journal of wildland fire* 23.5 2012. pp. 606-619.

244. Benali A., Sá A. C., Ervilha A. R., Trigo, R. M., Fernandes P. M., Pereira, J. M. Fire spread predictions: Sweeping uncertainty under the rug. *Science of the total environment*, 592, 2017. pp. 187-196.

245. Kanga, S., Sharma, L. K., Pandey, P. C., & Nathawat, M. S. GIS Modelling approach for forest fire risk assessment and management. *International Journal of Advancement in Remote Sensing, GIS and Geography*, 2014. 2(1), pp. 30-44.

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

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

248. Цвіркун С. В., Удовенко М. Ю. Застосування програмного комплексу fds для визначення осередку пожежі. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2019. (11), С.148-158.

249. Forney, G. P., & McGrattan, K. B. *User's Guide for Smokeview Version 4: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data*. Washington, DC, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. 2004. p. 32.

250. Forney G. P., McGrattan K. B. *User's Guide for Smokeview Version 1.0: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data (NISTIR 6513)*. 2000. 39 p.

251. Yildiz, M. A., & Beyhan, F. Developing a Performance-Based. Approach to the Effect of Roof Features on Fire Safety in Buildings with Atriums. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 2024. 11(1), 33-48.

252. Valencia J. J., Queded P. N. Thermophysical properties. *Modeling for casting and solidification processing*, 2001. 189 p.

253. Fecht H. J., Wunderlich R., Battezzati L., Etay J., Ricci E., Seetharaman, S., Egry I. Thermophysical properties of materials. *Europhysics news*, 2008. 39(5), pp. 19-21.

254. Wei G., Wang G., Xu C., Ju X., Xing L., Du X., Yang, Y. Selection principles and thermophysical properties of high temperature phase change

materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2018. pp. 1771-1786.

255. Abid M., Hammerschmidt U., Köhler J. Temperature and moisture dependent thermophysical properties of Sander sandstone. *International journal of thermal sciences*, 86, 2014. pp. 88-94.

256. Shen Y., Yang Y., Yang G., Hou X., Ye, W. You, Z., Xi J. Damage characteristics and thermo-physical properties changes of limestone and sandstone during thermal treatment from – 30 C to 1000 C. *Heat and Mass Transfer*, 2018. 54, 3389-3407.

257. Oktay H., Yumrutaş R., Akpolat A. Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 96, 2015. pp. 217-225.

258. Conde M. R. Estimation of thermophysical properties of lubricating oils and their solutions with refrigerants: an appraisal of existing methods. *Applied Thermal Engineering*, 1996. 16(1), pp. 51-61.

259. Villamayor A., Guimarey M. J., Mariño F., Liñeira del Río, J. M., Urquiola F., Urchegui R., Fernández J. High-Pressure Thermophysical Properties of Eight Paraffinic, Naphthenic, Polyalphaolefin and Ester Base Oils. *Lubricants*, 2023. 11(2), p. 55.

260. Pinheiro C. T., Pais R. F., Ferreira A. G. M., Quina M. J., Gando-Ferreira L. M. Measurement and correlation of thermophysical properties of waste lubricant oil. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2018. 116, pp. 137-146.

261. Meunders A., Baker G., Arnold L., Schroeder B., Spearpoint M., Pau D. . Parameter optimization and sensitivity analysis for fire spread modelling with FDS. *Conference: 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design*. 2014. p.11.

262. Nguyen H. T., Abu-Zidan Y., Zhang G., Nguyen K. T. Machine learning-based surrogate model for calibrating fire source properties in FDS models of façade fire tests. *Fire Safety Journal*, 2022. 130, 103591.

263. Van Hees P. Validation and verification of fire models for fire safety engineering. *Procedia Engineering*, 2013. 62, pp. 154-168.
264. Smardz, P., & Novozhilov, V. Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows. *University of Ulster*, 2006. 16-20.
265. Suard S., Lapuerta C., Babik F., Rigollet L. Verification and validation of a CFD model for simulations of large-scale compartment fires. *Nuclear engineering and design*, 2011. 241(9), pp. 3645-3657.
266. Балло Я. В. Вплив нахилу фасаду на поширення пожежі по зовнішніми огорожувальними конструкціями. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. Київ, 2023. №1 (15). С. 32-40.
267. Čolić A., Pečur I. B. Influence of horizontal and vertical barriers on fire development for ventilated façades. *Fire technology*, 2020. 56(4), pp. 1725-1754.
268. Srivastava G., Nakrani D., Ghoroi, C. Performance of combustible facade systems with glass, ACP and firestops in full-scale, real fire experiments. *Fire technology*, 2020. 56, pp. 1575-1598.
269. Rukavina M. J., Carevic M., Pecur I. B. Fire protection of facades. *The Guidelines for Designers, Architects, Engineers and Fire Experts*, 2017. p. 12-15.
270. Shnal T., Pozdieiev S., Yakovchuk R., Nekora O. Development of a Mathematical Model of Fire Spreading in a Three-Storey Building Under Full-Scale Fire-Response Tests. In *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*, 2020. pp. 419-428.
271. Giraldo M. P., Lacasta A., Avellaneda J., Burgos, C. Computer-simulation study on fire behaviour in the ventilated cavity of ventilated façade systems. In *MATEC Web of Conferences*. 2013. Vol. 9, p. 03002). EDP Sciences.
272. 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.

273. Т. М. Шналь, С. В. Поздєєв, Р. С. Яковчук, О. В. Некора, С. О. Сідей Математична модель розвитку пожежі у триповерховій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань. *Пожежна безпека: Зб. наук. праць.*—Львів: ЛДУ БЖД, 2020. № 36. С.121–130.

274. Chow Nadia CL, S. S. Li, D. X. Huang. "Apron design for protecting double-skin façade fires." *Fire and Materials* 39.3. 2015. p. 189-206.

275. Магльована Т., Нижник Т., Сергій С., Колесніков Д., Стрікаленко Т. Підвищення ефективності роботи систем водяного пожежогасіння шляхом використання гідродинамічно активних полімерів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 2021. 5(2), С. 58-66.

276. Виноградов А. Г., Малигін Г. О. Екрануючі властивості водяних завіс: методика розрахунків і порівняння з експериментом. *Пожежна безпека: теорія і практика*, 2013 (15), С. 49-56.

277. Бенедюк В. С., Стилик І. Г., Тимошенко О. М., Грачов, А. О. До питання використання водяних завіс в Україні. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*, м. Харків, 2018, С. 88.

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

279. Ballo Y., Yakovchuk R., Kovalchuk V., Nizhnyk V., Veselivskyi R. Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings. *AIP Conference Proceedings*. (Scopus). 2023. Vol. 2684 (1), p. 1-9.

280. Andriienko M., Shoiko V. Розвиток профілактичної роботи в сфері пожежної безпеки. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 2018. (35), С. 200-209.

281. Теоретичні основи попередження каскадного розповсюдження пожежі в резервуарних парках з нафтопродуктами і підвищення ефективності її ліквідації [Текст] : автореф. дис... д-ра техн. наук: 21.06.02 / Басманов Олексій Євгенович ; Університет цивільного захисту України. - Х., 2006. - 35 с.

282. Ніжник В. В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*, 2019 (53), С. 215-226.

283. Гуліда Е. М. Зменшення тривалості вільного розвитку пожежі на основі оптимізації шляху слідування пожежників до місця її виникнення. *Пожежна безпека*, 2013 (23), С. 64-70.

284. Паснак І. В. Розкриття особливостей впливу організаційних чинників на тривалість вільного розвитку пожежі. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2014. 24(3), С. 372-377.

285. Прогнозування виникнення пожеж в житловому секторі на підставі аналізу техногенного ризику [Електронний ресурс] / Е. М. Гуліда, О. І. Башинський, І. О. Мовчан // *Пожежна безпека*. - 2012. - № 20. - С. 150-154. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb\\_2012\\_20\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2012_20_26).

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

287. Ніжник В., Савченко О., Некора В. Теоретичні підходи для дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 2023. 7(1), С. 67-76.

288. Нуянзін О. М., Самченко Т. В., Перегін А. В., Кришталь, В. М. Повний факторний експеримент з визначення температурних режимів пожежі у кабельних тунелях. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 2019. 3(2), С. 83-89.

289. Трошкін С., Сур'янінов М., Трошкіна Д. Проведення повного факторного обчислювального експерименту щодо визначення температурного



режиму при пожежі у вертикальному кабельному тунелі атомної електричної станції. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*, 2023. 7(2), С. 241-255.

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

291. Васильєв, О. Б. Використання імітаційного моделювання при оптимізації параметрів системи забезпечення пожежної безпеки об'єктів. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*, (2), 2014. С. 223-226.

292. Nishio Y., Yoshioka H., Noguchi T., Kanematsu M. Fire spread caused by combustible facades in Japan. *Fire technology*, 2016. 52, P. 1081-1106.

293. Kolbrecki A. Model of fire spread out on outer building surface. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 2015. 63(1), P. 135-144.

294. Hakkarainen T., Oksanen, T. Fire safety assessment of wooden facades. *Fire and Materials*, 2002. 26(1), pp. 7-27.

295. Bong F. N. P., Fire Spread on Exterior Walls. Fire Engineering Research Report 2000/1, ISSN 1173-5996, *Department of Civil Engineering, University of Canterbury*, 2000. New Zealand. p. 161.

296. McLaggan M. S., Gupta, V., Hidalgo, J. P., & Torero, J. L. Upward flame spread for fire risk classification of high-rise buildings. *International Journal of High-Rise Buildings*, 2021. 10(4), pp. 299-310.

297. Пріщенко О., Черемська, Н., Черногор, Т. (2021). Побудова математичних моделей за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*, (2), С. 29-36.

298. Овсієнко Ю. І., Флегантов Л. О. (2011). Методика вивчення алгоритму побудови нелінійних математичних моделей методом найменших

квадратів із використанням комп'ютерної техніки [Електронний ресурс]. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 21(1), 21 с.

299. Karlberg J., Engström I., Karlberg P., Fryer J. G. (1987). Analysis of linear growth using a mathematical model: I. From birth to three years. *Acta Paediatrica*, 76(3), pp. 478-488.

300. Павлов О., Головченко М., Ревич М. Метод оцінки коефіцієнтів при лінійних членах багатовимірної поліноміальної регресії, заданої надлишковим описом. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2022. Т. 1, № 40. С. 110–117.

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

302. Ніжник В.В. Удосконалення методичних підходів до оцінювання пожежного ризику. Р.В. Климась, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, О.П. Якименко, А.В. Нетреба, Н.М. Довгошеєва. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. – Київ, 2016. №2(2). – С. 83.

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

304. McNaught A. D. (1997). *Compendium of chemical terminology* (Vol. 1669). Oxford: Blackwell Science, p. 464.

305. Голобородько М. Ю., Зотова І. Г., Левшенко О. С., Петрушен М. В. (2014). Загальні вимоги до видів, послідовності та умов проведення випробувань радіоелектронного обладнання. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*, (3), С. 86-92.

306. Лук'янчук Ю. А., Симонюк В. П., & Трохимчук Г. П. (2014). Про випробування засобів вимірювальної техніки на стійкість до зміни температури. *Перспективні технології та прилади*, (5), С. 101-106.

307. Кузик А.Д., Меньшикова О.В., Чмир О.Ю. Теорія ймовірностей та математична статистика. *Навчальний посібник*. – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 192 с.

308. Безсонов Ю., Андрєєв В. Обґрунтування та формалізація підходу до оцінки регіональної екологічної безпеки. *Східно-Європейський журнал технологій підприємства*, 2016. 2 (10), С. 9-18.

309. Thompson T. N., Carroll M. B., & Deaton J. E. Justification for use of simulation. *Human factors in simulation and training*, 2009. pp. 39-48.

310. Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двутавровими сталевими балками [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Кропива Михайло Олександрович ; Держ. служба України з надзв. ситуацій, Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. - Львів, 2016. - 19 с.

311. Обґрунтування математичної моделі процесу обвуглювання зразків-фрагментів дерев'яної балки з вогнезахисним облицюванням. С. Поздєєв та ін. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2019. Т. 3, № 2. С. 90–97.

312. Levitt L. B. The probability table method for treating unresolved neutron resonances in Monte Carlo calculations. *Nuclear Science and Engineering*, 1972. 49(4), С. 450-457.

313. Чисельне моделювання теплових процесів у основних елементах обмотки і осердя статора потужного турбогенератора АЕС. О.В. Виговський. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр.* К.: ІЕД НАНУ, 2009. — Вип 24. — С. 132-137.

314. Отрош Ю. А., Щолоков, Е. Е., Васильєв, О. Б., Олейник, О. С. Pyrosim-польова модель пожежі (Doctoral dissertation). *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 73-74.

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

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

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

318. Онищук Г. І. Визначення укрупнених показників вартості будівництва багатопверхового житлового будинку. Г. І. Онищук, Г. М. Агєєва, С. М. Коломієць. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.* - Х., 2012. - Вип.№ 106. - С.139-147.

319. Кадол Л. В. (). Сучасні аспекти визначення вартості будівництва висотних будівель на Україні. *Причорноморські економічні студії*, 2018. 26 (1), С. 63-66.

320. Жураковська М. О. (). Управління вартістю реновації житлового фонду. *Економічний аналіз*, 2014. 17, № 2, С. 39-46.

321. Заяць Є. І., Тріфонов І. В., Броневицький С. П., Єпіфанцева, С. В. Обґрунтування вартості будівництва житла з урахуванням чинника інвестиційної привабливості територій. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 2015. (11), С. 31-37.

322. Сафонов І. В., & Шаров С. В. Аналіз програмних засобів для складання кошториса будівництва житлової нерухомості. *Інформаційні технології в освіті та науці: зб. наук. пр.*, 2017. 1(9), С. 243-247.

323. Економічна енциклопедія / Відповідальний редактор С. В. Мочерний. - Київ: Видавничий центр "Академія". - Т. 1, 2000. - 863 с.; Т. 2, 2001. - 847 с.; Т. 3, 2002. - 952 с.

324. Сорокіна Л. В., Гойко А. Ф., Регіда О. В. «Нечітка арифметика» як засіб оцінювання економічного ефекту від зміни строків виконання будівельних робіт. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 2014. (32), С. 99-111.

325. Арутюнян І. А., Данкевич Н. О. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень в будівництві. *навч.-метод. посібник для студ. ЗДА спец*, 2018, 192 с.

326. Паранюк Я. Методичні аспекти оцінювання ефективності інноваційних проектів. *Вісник Тернопільського національного економічного університету*, 2018 (2), С. 66-73.

327. Пожежно-рятувальні частини. Вимоги до дислокації та району виїзду, комплектування пожежними автомобілями та проектування ДСТУ 8767:2018 [Чинний від 01.01.2019] ДП УкрНДНЦ від 12.04.2018 р. № 98 – 52 с. (Національний стандарт України)

328. Наказ МВС від 20.11.2015 № 1470, зпреєстрований в Міністерстві юстиції України 09 грудня 2015 р. за № 1528/27973 «Про затвердження Нормативів виконання навчальних вправ з підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту та працівників Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС України до виконання завдань за призначенням».

329. Koval R., Yemelyanenko S., Kuzyk A., Starodub, Y. Assessing the Risk of Material Damage of Building Construction of High-Rise Rooms Due to Fires and Emergencies. *Construction Technologies and Architecture*, 2023. 9, С. 49-57.

330. Гуліда Е. М. Вплив різних видів пожежного навантаження на димовиділення та на пониження концентрації кисню при пожежі в закритому приміщенні. *Пожежна безпека*, 2014. (24), С. 129-136.

331. Шналь Т.М. Повномасштабні пожежні випробування фрагменту великопанельної будівлі. Т.М. Шналь , М.С. Коваль, Б.Г. Демчина, П.М. Коваль, І.І. Кархут. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва»*. 2008. № 627. С. 208–212.

332. Підвищення ефективності гасіння пожеж в житлових будівлях шляхом удосконалення характеристик системи внутрішнього водопостачання: монографія. С.М. Щербак, О.А. Петухова, С.А. Горносталь, О.А. Тарасенко. Харків: НУЦЗУ, 2021. – 112 с.

**ДОДАТОК А**  
**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Статті у періодичних виданнях,  
включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України,  
або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних  
Scopus та/або Web of Science Core Collection**

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

**Статті в наукових періодичних виданнях інших держав**

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

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

5. Сізіков О. О., **Балло Я. В.**, Добряк Д. О. та ін. До питань розрахунку протипожежного водозабезпечення об'єкта після реконструкції. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2018. 1 (5). С 26-31.

6. Сізіков О. О., Ніжник В. В., **Балло Я. В.** та ін. Систематизація процесу управління пожежною безпекою об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. Київ, 2019. 2 (8). С 41-49.

7. Ніжник В. В., **Балло Я. В.**, Поздєєв С. В., Некора В. С. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією. *Науково-технічний збірник Містобудування та територіальне планування КНУБА*. Київ, 2019. №69. С. 278-290.

8. Сізіков О. О, **Балло Я. В.**, Голікова С. Ю., Жихарєв О. П. Визначення процедури проведення суб'єктом управління пожежною безпекою внутрішнього аудиту з оцінки протипожежного стану об'єкта захисту *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека УкрНДІЦЗ*. – Київ, 2020. №1(9). С. 84-93.

9. Фещук Ю. Л., Ніжник В. В., **Балло Я. В.** Аналіз закордонних нормативних документів щодо вимог пожежної безпеки під час проектування висотних громадських будинків *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. Черкаси, 2020. Т. 4, №2 . С. 77-88.

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

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

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

13. Яковчук Р. С., **Балло Я. В.**, Кузик А. Д. та ін. FDS моделювання ефективності протипожежних карнизів на запобігання поширенню пожежі

фасадними конструкціями висотних будівель *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. Львів, 2021 – №23, С. 39-45.

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

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

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

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

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

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

#### **Патенти на корисну модель**

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



**Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації**

21. Nizhnyk V., **Ballo Y.**, Pozdieiev S., Borovykov V., Feshchuk Y. Simulation of thermal impact of flames coming from class “B” test fire on the elements of the adjacent facilities *International Scientific Journal «Internauka»*. Київ, 2019. №14 (76). С. 39-44.

**Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

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

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

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

25. **Балло Я. В.**, Сізіков О. О., Голікова С. Ю., Гордєєв П. М. Вплив конструктивних параметрів фасадних протипожежних карнизів на запобігання поширення пожежі в висотних будинках *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*, м. Черкаси, 2020. С. 139-141.

26. **Балло Я.В.**, Балло В. П., Голікова С. Ю., Скоробагатько Т. М. Проблемні питання протипожежного водопостачання висотних будинків

*Матеріали «Міжнародна науково-практична конференція Проблеми надзвичайних ситуацій»*, м. Харків, 2020, С. 15-17.

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

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

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

30. A Borysova, V Nizhnyk, **Ya Ballo**, O Kyrychenko Justification of reference table data of dependence of wind effect on critical surface density heat flux for corrugated cardboard. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport » (Scopus)*, Kharkiv, 2021. С. 1-7.

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

32. **Балло Я. В.** Сізіков О. О., Ніжник В. В., Жихарев О. П. Критерії оцінювання впливу висхідного теплового потоку на поширення пожежі по фасадним системам. *Матеріали Міжнародної науково-практичної*

конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2022. С. 6-7.

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

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

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

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

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

38. Nizhnyk V., Savchenko O., **Ballo Y.**, Nekora V. Theoretical Approaches to Justify the Coefficients of Influence of Fire Protection Systems on Individual Fire

Risk. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering (Scopus)*. 2023. Vol. 1, no. 290. P. 299–306.

39. **Ballo Y.**, Yakovchuk R., Kovalchuk V., Nizhnyk V., Veselivskyi R. Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings. *AIP Conference Proceedings*. (Scopus). 2023. Vol. 2684 (1), p. 1-9.

## ДОДАТОК Б

### ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

1. XX Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку»  
м. Київ: XVII Міжнародна спеціалізована виставка «Технології захисту/ПожТех - 2018», Міжнародний виставковий центр, 9-10 жовтня, 2018 р., форма участі – очна.
2. XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»  
м. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 24-25 жовтня 2019 р., форма участі – заочна.
3. III Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми техногенної та екологічної безпеки: освіта, наука, практика»  
м. Харків: НУЦЗУ, 21-22 листопада 2019 р, форма участі – заочна.
4. I Львівський науковий форум матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Пріоритетні напрямки досліджень в науковій та освітній діяльності»  
м. Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка, 5-6 травня 2019 р. форма участі – заочна.
5. XI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»  
м. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 9-10 квітня 2020 р., форма участі – очна.
6. VI Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій»  
м. Харків: НУЦЗУ, 20 травня 2020; р., форма участі – заочна.
7. VI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»  
м. Харків: НУЦЗУ, 16 квітня 2021 р., форма участі – очна.
8. IX міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»

м. Харків: УкрДУЗТ, 17 листопада 2021 р., форма участі – очна.

9. III Міжнародна науково-технічна конференція «*International Scientific Conference Energy Efficiency in Transport*»

м. Харків: УкрДУЗТ, 18-20 листопада 2021 р., форма участі – очна.

10. V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій»

м. Харків: НУЦЗУ, 30 березня 2021 р., форма участі – заочна.

11. XIII Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 27 квітня 2022 р., форма участі – заочна.

12. VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій»

м. Харків: НУЦЗУ, 19 травня 2022 р., форма участі – заочна.

13. XII всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»

м. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 27-28 жовтня 2022 р., форма участі – очна.

14. III Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»

м. Львів: ЛДУ БЖД, 13 жовтня 2022 р., форма участі – очна.

15. XIV Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

м. Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ, 27 квітня 2023 р., форма участі – очна.

16. 3-rd International scientific and practical conference «*Science and innovation of modern world.*»

м. Лондон: Cognum Publishing House, 26 листопада 2023 р, форма участі – заочна.

17. XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»

м. Львів: ЛДУ БЖД, 30 березня 2023 р., форма участі – очна.

18. VI AIP Conference Proceedings «International conference on engineering and computer science»

м. Харків: УкрДУЗТ, 31 травня 2023 р., форма участі – заочна.

## ДОДАТОК В

### АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Г.в.о. начальника Черкаського інституту  
 пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
 Національного університету  
 цивільного захисту України  
 генерал-майор служби цивільного захисту

Ігор РОМАНЮК  
 «23» \_\_\_\_\_ 2024 року



#### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Балло Ярослава В'ячеславовича за темою: «Розвиток наукових  
 основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними  
 конструкціями будівель»

Розробник Балло Ярослав В'ячеславович, з однієї сторони, та завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи доктор технічних наук, професор Кириченко Оксана В'ячеславівна з іншої сторони, склали акт про те, що результати дисертаційної роботи за темою: «Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу.

У дисертаційній роботі розроблені табличний та спрощений-розрахунковий метод визначення умов запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями, що дозволяє забезпечити актуальний характер навчання, підвищити ефективність підготовки фахівців ДСНС України під час вивчення дисципліни.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього рівня «бакалавр» на кафедрі пожежно-профілактичної роботи за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Пожежна безпека територій, будівель та споруд» та при підготовці фахівців освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Пожежна профілактика в населених пунктах».

Впровадження результатів забезпечує актуальний характер освіти та високий науково-методичний рівень викладання даних дисциплін і дозволяє підвищити якість проведення лекційних і практичних занять для здобувачів вищої освіти.

Завідувач кафедри  
 пожежно-профілактичної роботи  
 доктор технічних наук, професор

Оксана КИРИЧЕНКО

Розробник

Ярослав БАЛЛО





ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор департаменту  
запобігання надзвичайним  
ситуаціям ДСНС  
кандидат юридичних наук

Олександр ЧЕКРИГІН

2024 року

АКТ

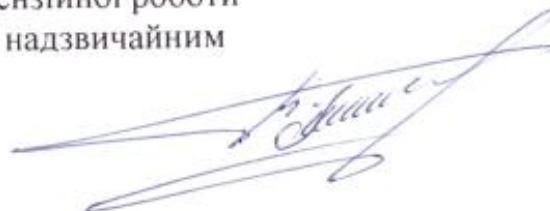
про впровадження результатів дисертаційної роботи  
БАЛЛО Ярослава В'ячеславовича на тему:  
«Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми  
огороджувальними конструкціями будівель»

Цей акт складений про те, що результати дисертаційних досліджень Балло Я.В. апробовано та впроваджено в роботу Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Розроблені табличний та спрощений-розрахунковий метод визначення умов запобігання поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями дозволяють забезпечити реалізацію параметричного методу нормування у будівництві під час розрахункової оцінки поширення пожежі зовнішніми огороджувальними конструкціями будівель

Результати дисертаційних досліджень Балло Я.В. можуть бути використані під час оцінювання ефективності заходів щодо обмеження поширення пожежі по зовнішнім огороджувальним конструкціям та встановлення вимог пожежної безпеки для фасадів будівель.

Заступник начальника управління  
пожежної безпеки – начальник  
відділу нормативної та ліцензійної роботи  
Департаменту запобігання надзвичайним  
ситуаціям апарату ДСНС



Павло КУЛИК

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

Заступник голови правління з  
операційної діяльності  
та корпоративної стратегії  
АТ «Позняки-Жил-Буд»

В.В.Белашев

« 18 » січня 2024 р.

**АКТ**Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Балло Ярослава В'ячеславовича за темою: «Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» застосовані під час проектування висотних будинків «TARYAN TOWERS» (вул. Іоанна Павла II, 12, м. Київ), «JACK HOUSE» (бульв. Лесі Українки, 7-В, м. Київ) для забезпечення основних вимог пожежної безпеки даних об'єктів, а також під час здійснення прогнозування поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель і проведення оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження.

Акт не призначено для використання під час комерційних або фінансових операцій.

Начальник департаменту  
об'єктів будівництва



І.М. Яковенко

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник директора  
ПАТ "КиївЗНДЦП"  
з наукової діяльності,  
керівник науково-дослідного  
архітектурного центру,  
доктор архітектури, професор

**Вадим КУЦЕВИЧ**

2024 р.

**АКТ**

Впровадження результатів дисертаційної роботи БАЛЛО Ярослава В'ячеславовича на тему «Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель»

Цей акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Балло Ярослава В'ячеславовича було застосовано під час розроблення:

- Зміни № 1 ДБН В.2.2-15-2019 "Житлові будинки. Основні положення" (дата набрання чинності 01.09.2022);
- Зміни № 1 ДБН В.2.2-9:2018 "Громадські будинки та споруди. Основні положення" (дата набрання чинності 01.09.2022);
- Зміни № 3 ДБН В.2.3-15:2007 "Автостоянки і гаражі для легкових автомобілів" (дата набрання чинності 01.09.2022).

Впровадження результатів дисертаційної роботи Балло Я.В. сприяло створенню умов для забезпечення запобігання поширення пожежі по зовнішнім огорожувальним конструкціям будівель, а також було використано під час розроблення основних вимог та показників безпеки будівель і споруд, пов'язаних із їх суттєвими експлуатаційними характеристиками.

Розробник:

Заступник начальника відділу  
нормативно-технічного забезпечення  
науково-дослідного центру  
протипожежного захисту ІДУ НД ЦЗ  
канд.техн.наук., ст. дослідник.

**Ярослав БАЛЛО**

«11» Січня 2024 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

доктор наук з державного

управління, професор,

Заслужений діяч України,

лауреат Державної премії України

в галузі науки і техніки



**Петро ВОЛЯНСЬКИЙ**

«05» грудня 2023 року

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи

БАЛЛЮ Ярослава В'ячеславовича на тему: «Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель»

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 БАЛЛЮ Ярослава В'ячеславовича на тему «Розвиток наукових основ запобігання поширення пожежі зовнішніми огорожувальними конструкціями будівель» впроваджено:

- під час розробки ДСТУ 8828:2019 «Пожежна безпека. Загальні положення» в частині розроблення вимог до способів забезпечення пожежної безпеки комплексом протипожежного захисту;

- під час розробки ДСТУ 9058:2020 «Пожежна безпека. Визначення протипожежних відстаней між об'єктами розрахунковими методами. Основні положення» в частині розроблення критеріальної бази, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти та яка враховує конструктивні параметри будівель та споруд, властивості матеріалів та сценарії пожежі;

- під час розробки ДСТУ 9115:2021 «Система управління пожежною безпекою об'єкта захисту. Внутрішній аудит з оцінки протипожежного стану. Загальні положення» в частині визначення переліку потенційних небезпек, які впливають на поширення небезпечних чинників пожежі в середині об'єму

приміщень об'єкту захисту, а також на вище розташовані поверхи через зовнішні огорожувальні конструкції;

- під час розробки ДСТУ 9192:2022 «Пожежна безпека. Проектування висотних громадських будівель з умовною висотою від 100 м до 150 м» в частині визначення вимог пожежної безпеки до систем протипожежного захисту висотних будівель, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень висотних будівель та вимог пожежної безпеки до фасадів висотних будівель;

- під час розробки ДСТУ 9222:2023 «Пожежна безпека. Протипожежний захист систем зарядки електромобілів. Основні положення» в частині розробки протипожежних вимог під час встановлення систем зарядки електромобілів на фасадах будівель та встановлення вимог до параметрів безпеки під час проектування місця для паркування електромобілів біля стін будівель та споруд;

- 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 по зовнішнім огорожувальним конструкціям та оцінювання ефективності заходів щодо її обмеження.

Акт складено для надання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Голова комісії  
канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Віталій КОВАЛЕНКО

Члени комісії  
д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

канд. техн. наук, ст. дослід.

Олександр ДОБРОСТАН

## ДОДАТОК Г

**Патент на корисну модель «Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель»**



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153464** (13) **U**  
 (51) МПК  
**G09B 25/04** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ  
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ  
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

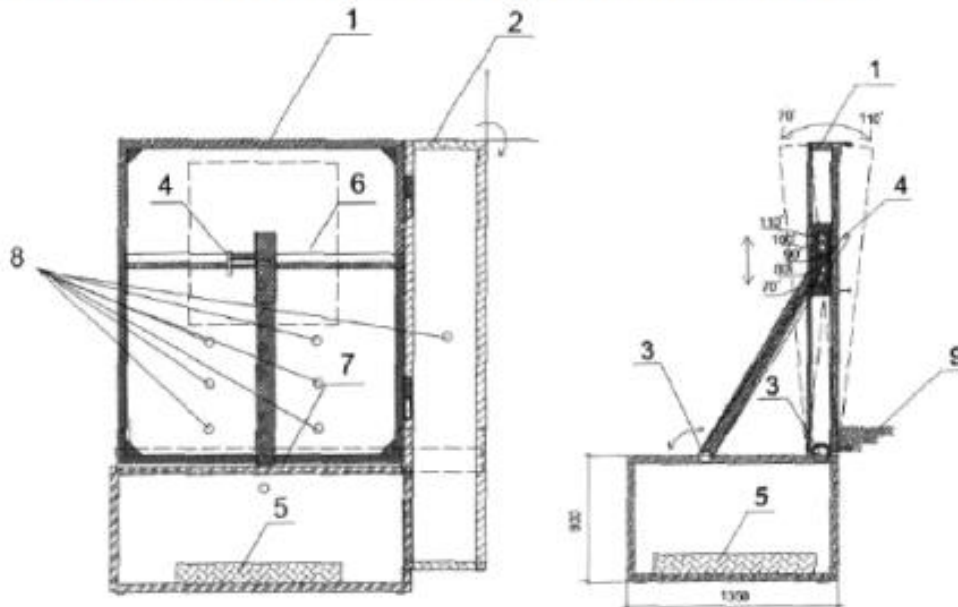
## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2022 04260</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>08.11.2022</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>13.07.2023</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>12.07.2023, Бюл.№ 28</b></p>	<p>(72) Винахідник(и):  <b>Балло Ярослав В'ячеславович (UA),          Ніжник Вадим Васильович (UA),          Сізіков Олександр Олександрович (UA),          Циганков Андрій Олександрович (UA),          Яковчук Роман Святославович (UA),          Некора Валерія Сергіївна (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці):  <b>ІНСТИТУТ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ          ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З          ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ,          вул. Вишгородська, 21, м. Київ, 04074 (UA)</b></p> <p>(74) Представник:  <b>Запольський Леонід Леонідович</b></p>
---	---

## (54) УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ ПО ФАСАДАХ БУДІВЕЛЬ

(57) Реферат:

Установка для прогнозування поширення пожежі по фасаді будівлі складається з вогневої камери, фрагмента відтвореної фасадної системи, а також вимірювальних засобів контролю температурного режиму на її поверхні. Додатково установка має шарнірно-опорний механізм для відтворення необхідних кутів ухилу фасадної площини та прилеглу рухоми площину, що може змінювати кут прилягання до основної частини фасадної системи установки.



UA 153464 U

## UA 153464 U

Корисна модель належить до випробувальних пристроїв в галузі пожежної безпеки та призначена для випробування фрагмента конструкції фасаду будівлі, зокрема дослідження поширення пожежі з нижнього поверху, де імітується пожежа, на розташований вище, а також для оцінки ефективності заходів для її обмеження.

5 Існують установки або стенди для оцінки пожежної безпеки систем облицювання фасаду, що містять фрагмент фасадної системи будівлі, вогневу камеру та джерело створення вогнища пожежі у вигляді твердого палива (модельне вогнище пожежі класу А); рідкого палива (модельне вогнище пожежі класу В) або газового пальника, в конструкції яких є кутовий елемент фасаду, розміщений під кутом 90° для імітації прилягання суміжної фасадної площини [ДСТУ 10 9072:2021].

Недоліком цих установок є велика похибка отриманих результатів через неможливість відтворити реальні конструктивні параметри фасадних систем будівель із врахуванням кутів ухилу фасаду відносно вертикальної площини та кутів прилягання суміжних площин фасадів. Також існуючі установки не можуть відтворити реальні розміри міжвіконних простінків зовнішніх стін між нижнім поверхом модельної пожежі та поверхом, розташованим над нею. Це обумовлюється практичною відсутністю реальної оцінки поширення пожежі по фасаду будинку або можливістю прогнозування заходів щодо обмеження фасадної пожежі.

Існуючі методи оцінювання пожежної небезпеки систем облицювання фасаду передбачають можливість дослідження лише однотипних фасадних систем, що обумовлює практичне відсутність реального відтворення фасадних систем інших типів або фасадних систем комбінованого типу. Для підвищення точності вимірювань при випробуванні фрагментів фасадних конструкцій пропонується здійснювати монтаж фасадних систем на рухому раму основу.

25 Поставлена задача вирішується тим, що установка для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель, що складається з вогневої камери, фрагмента відтвореної фасадної системи, а також вимірювальних засобів контролю температурного режиму на її поверхні, згідно з корисною моделлю, містить шарнірно-опорний механізм для відтворення необхідних кутів ухилу фасадної площини, прилеглої рухому площину, що може змінювати кут прилягання до основної частини фасадної системи. При цьому додатково установка оснащена засобами обмеження поширення пожежі, зокрема протипожежними карнизами та іншими вогневими перешкодами для дослідження їх ефективності.

На кресленні зображено установку для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель, де: 1 - основна рама для фрагмента фасадної системи; 2 - кутова рама для прилеглої частини фасадної системи; 3 - шарнірно-опорні механізми для регулювання кута встановлення фрагмента фасадної системи; 4 - механізм фіксації кутів ухилу; 5 - зона розміщення модельного вогнища пожежі; 6 - орієнтовна зона влаштування віконного прорізу; 7 - зона влаштування протипожежного карниза або іншої вогневої перешкоди; 8 - вимірювальні засоби контролю температурного режиму; 9 - зона встановлення протипожежного карниза чи іншої вогневої перешкоди.

40 Випробування фрагмента фасаду будівлі проводиться наступним чином: монтується фрагмент фасадної конструкції 1, за допомогою шарнірно-опорних механізмів 3 та механізмів регулювання кута 4 встановлюються площини фрагмента фасадної системи з відтворенням кутів ухилу фасаду 1 та прилягання суміжної площини 2, встановлюється протипожежний карниз або інша вогнева перешкода, 7 після чого встановлюються засоби вимірювальної техніки для контролю температурного режиму 8, підпалюється модельне вогнище пожежі 5. Відбувається вимірювання температурного режиму на рівні вікна 5 та в інших зонах встановлення теплових датчиків 8.

Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель пройшла апробацію на пожежно-випробувальному полігоні Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту.

50 Установка для прогнозування поширення пожежі по фасадах будівель є простою за своєю конструкцією, забезпечує точне вимірювання температурних розподілів на поверхні конструктивно відтвореного фрагмента фасадної системи в разі пожежі на розташованому нижче поверсі. Це дозволяє здійснювати аналіз та прогнозування можливості поширення пожежі по фасадах будівель або оцінювати ефективність заходів щодо її обмеження.

Джерела інформації:

1. SP Fire 105 External wall assemblies and facade claddings. Reaction to fire. - SP Technical Research Institute of Sweden, 1994.16 p.
2. 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.



