

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ  
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**НІЖНИК ВАДИМ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 614.841.334.1

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ НЕБЕЗПЕКИ  
ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА СУМІЖНІ БУДІВЕЛЬНІ ОБ'ЄКТИ**

21.06.02 – пожежна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

**В.В. Ніжник**

Науковий консультант –

Поздєєв Сергій Валерійович,

доктор технічних наук, професор

Київ - 2020

## АНОТАЦІЯ

*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.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та будівельними об'єктами, що являється науковими основами для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для прогнозування можливості поширення пожеж від одного об'єкту на інший. Це дозволило розробити новий розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней між будівельними об'єктами, який може враховувати найбільш значущі параметри щодо прогнозування можливості поширення пожежі на суміжні об'єкти, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання. В роботі досліджувалися пожежі, як в будинках із горючим та не горючим фасадами, так і в зовнішніх технологічних установках.

На сьогоднішній день визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами реалізовується за допомогою розпорядчого методу нормування, який передбачає використання чітких табличних значень без можливих альтернатив. На основі аналізу практики використання зазначеного методу встановлені його недоліки. Серед таких недоліків неможливість враховувати під час визначення протипожежних відстаней таких суттєвих характеристик будинків та споруд, як величина пожежної навантаги, вид і пожежо-технічні характеристики горючих матеріалів і речовин, які в ньому

обертаються, конструктивні характеристики будинку (наявність прорізів у зовнішніх будівельних конструкціях, через які можливе поширення вогню на інший будинок, взаємне розташування пожежної навантаги в просторі), оснащеність будинку автоматичними системами пожежогасіння, наявність між будинками перешкод для поширення пожежі, взаємне розташування будинків та споруд один відносно одного тощо.

Під час розвинення більш гнучкого підходу для визначення протипожежних відстаней обґрунтовано сценарії виникнення та розвитку пожеж, при яких має місце поширення пожежі на сусідній будинок, а також перелік найбільш значущих параметрів щодо прогнозування можливості поширення пожежі на суміжні об'єкти:

- теплоутворювальна здатність пожежної навантаги;
- коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях;
- тривалість опромінювання.

Запропонований новий підхід щодо критеріїв небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, при цьому, виконуючи умову прямої фіксації можливості утворення пожежі на суміжному будинку, враховуючи природу його матеріалів, в якості такого критерію має використовуватись температура займання матеріалів, що піддаються тепловому впливу з боку факелу пожежі, на суміжному будинку. Оскільки значення параметру теплового потоку біля елементів будинку, який суміжний із будинком, що горить є нестабільним та змінним в часі, а значення теплового потоку не можливо порівняти із відповідними характеристиками матеріалів, які використовуються у суміжному будинку.

Можливість дослідження взаємного впливу зазначених критеріїв на значення протипожежних відстаней під час пожежі може забезпечити використання математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами газодинаміки та математичної моделі процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами у сукупності із рівнянням променистого теплообміну. Такий підхід надає змогу враховувати

кількість та вид пожежної навантаги у кожному із суміжних будинків, наявність прорізів у суміжних будинках їх геометричні параметри та розташування, наявність автоматичних систем пожежогасіння та протипожежних перешкод між суміжними будинками.

На основі проведених розрахунків показана висока ефективність математичних моделей, які дозволяють прогнозувати небезпеку поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти (газо-гідродинамічна модель з урахуванням найбільш значущих факторів поширення пожежі та рівняння променистого теплообміну), на прикладі таких об'єктів, як житловий будинок, автозаправна станція, виробництво біогазу. При цьому, показано, що обрані параметри теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання впливають на значення температури на поверхні елементів будинків, що опромінюються від осередку пожежі, визначення яких дозволило обґрунтувати безпечну протипожежну відстань яка склала 20 м для житлового будинку та автозаправної станції та 20 м для ферментаторами для виробництва біогазу. На основі чого зроблено висновок про можливість використання загального підходу заснованого на використанні альтернативних розрахункових методів, що мають ієрархічну структуру.

На основі розробленої методики вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та будівельними об'єктами, включаючи будинки та промислові підприємства, в яких використовуються горючі рідини, що максимально наближені до реальних умов, запропоновано нову принципову схему дослідження небезпечного теплового впливу пожежі на суміжний будинок з використанням зразків нової конструкції, що імітують даний будинок із врахуванням найбільш несприятливих умов.

Проведено експериментальне дослідження процесів теплового впливу факела пожежі, яким є модельне вогнище пожежі класу 55 В, як фрагмент технологічної установки, будинок із негорючим фасадом, коли

опромінювання відбувається через віконний проріз та будинок із горючим фасадом, коли опромінювання відбувається, як через віконний проріз, так і від горючого фасаду будинку. Встановлено, що продовж 10 хвилинного впливу джерела теплового потоку модельного вогнища пожежі класу 55В на досліджуваний зразок на висоті установки термопар 1 м, температура на його поверхні зростає по експоненційному розподілу та досягає на відстані 2 м – 110 °С, 4 м – 58 °С, 6 м – 48 °С, а продовж 30 хвилинного впливу джерела теплового потоку через віконний проріз будинку на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка досягає максимальних значень 161 °С, 94 °С та 55°С відповідно для відстаней від осередку горіння 2 м, 4 м та 6 м.

Експериментально доведено, що впродовж 10 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання від модельного вогнища пожежі класу 55 В зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d)=509-337,1d+81,5d^2-6,4d^3$ , впродовж 30 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання від фрагменту будинку із негорючим фасадом зміна температури – описується залежністю  $\Theta(d)= 883-629,25d+160,25d^2-13,063d^3$ , впродовж 60 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання від фрагменту будинку із горючим фасадом зміна температури - описується залежністю  $\Theta(d)= 589+194,083d-140,5d^2+15,604d^3$ .

Розроблено математичну модель теплового впливу факела пожежі, яким є модельне вогнище пожежі класу 55 В, як фрагмент технологічної установки, будинок із негорючим фасадом, коли опромінювання відбувається через віконний проріз та будинок із горючим фасадом, коли опромінювання відбувається, як через віконний проріз, так і від горючого фасаду будинку. Показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 19%, 16,9 %, 20 %, 17 °С, 12,2 °С, 8 °С відповідно, а критерій Фішера не перевищує табличних значень та становить 4,63; 5,08 відповідно.

Розроблено методологію розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами, яка включає в себе: розрахунково-табличний метод оцінювання протипожежних відстаней, спрощений метод оцінювання протипожежних відстаней, метод заснований на рівнянні нестационарної теплопровідності, та польовий метод. Шляхом проведення чисельного експерименту з використання математичних моделей обчислювальної газо-гідродинаміки (польового методу) виявлено закономірність залежності мінімальних безпечних відстаней для суміжних будівельних об'єктів у випадку пожежі у будинку з негорючим та горючим фасадом, а також на промислових об'єктах з використанням горючих рідин, що залежить від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання у вигляді регресійних залежностей:

$y = 5,09 + 1,34x_1 + 0,475x_2 + 1,573x_3 + 0,225x_1x_2 + 0,073x_1x_3 + 0,134x_2x_3 + 0,134x_1x_2x_3$  (для будинку із горючим фасадом);

$y = 4,275 + 1,1x_1 + 0,525x_2 + 1,65x_3 + 0,5x_1x_2 + 0,475x_1x_3 - 0,1x_2x_3 - 0,125x_1x_2x_3$  (для будинку із не горючим фасадом);

$y = 7,247 + 2,215x_1 + 0,698x_2 + 2,243x_3 + 0,125x_1x_2 + 0,21x_1x_3 - 0,037x_2x_3 + 0,39x_1x_2x_3$  (для промислових об'єктів з використанням горючих рідин),

де  $y$  – значення протипожежної відстані,  $x_1$  – величина пожежної навантаги,  $x_2$  – коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях,  $x_3$  – тривалість теплового випромінювання

Побудовані таблиці безпечних відстаней у залежності від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання для реакції спрощеного табличного методу розрахунку.

Запропоновано методичну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней шляхом створення структурних схем-методів, що разом складають ієрархічну структуру та є

теоретичною основою для створення відповідного національного стандарту України ДСТУ «Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами розрахунковими методами. Основні положення».

Розроблені алгоритми щодо реалізації розрахунків обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней за одним із запропонованих методів.

В результаті проведених досліджень вирішена актуальна науково-практична проблема розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та будівельними об'єктами, що являється науковими основами для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні. Це дозволило розробити новий розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней між будівельними об'єктами, що враховує найбільш суттєві характеристики об'єкта, які впливають на процес теплопередачі під час пожежі між об'єктами та дозволяє раціонально використовувати території під час їх забудови.

**Ключові слова:** протипожежна відстань, вогнище, температура, тепловий вплив, теплопередача, поширення пожежі, навантага, математична модель, тепловий потік, теплоприймач.

## SUMMARY

*Nizhnyk V.V.* Development of scientific foundations of fire propagation to adjacent construction facilities. – Qualification scientific paper which is typescript.

Dissertation work for the competition of the scientific degree of Doctor of Sciences (Engineering) by specialty of 21.06.02 – Fire safety. Ukrainian Civil Protection Research Institute, Kyiv; National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv 2020.

The dissertation work is dedicated to the solution of an actual scientific problem in the sphere of fire safety which is revelation of the regularities of the parameters of heat exchange between flames coming from fire and construction facilities which are principal from scientific view-point for the computational

substantiation of fire separation distances between such facilities at their design and use and which serve as theoretical basis for the prediction of risks of fire propagation from a facility to another one. This made it possible to develop a new computational method for the evaluation of fire separation distances between construction facilities which can allow for the most significant parameters as to prediction of risks of fire propagation to adjacent facilities, in particular: heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and irradiation duration. Fires involving buildings both with combustible and non-combustible facades as well as external engineering plants were studied in the work.

At present day determination of fire separation distances between buildings and constructions is implemented by regulatory method of standardization which envisages use of tabular values without any possible options. Based on analysing practice of use of the mentioned method its drawbacks were revealed. Impossibility of taking into consideration such significant characteristics of buildings and constructions as fire load magnitude, type and fire performance of combustible materials and substances circulated there, constructional specific features of the building (availability of any openings in the external building constructions through which fire can spread to another building, relative position of fire load in the space), availability of automatic fire-fighting systems in the building, presence of any obstructions to fire spread between the buildings, positions of the buildings and constructions relative to each other etc. when determining fire separation distances are among these drawbacks.

When developing more flexible approach to the determination of fire separation distances a number of fire scenarios were substantiated which were characterized with fire propagation to adjacent building as well as list of the most significant parameters for the prediction of risks of fire propagation to adjacent facilities, in particular:

- Heat-producing power of fire load;
- Factor of openings in the external boundary constructions;

– Duration of irradiation.

A new approach was proposed as to criteria of fire propagation hazard to adjacent facilities; at that when meeting provision for direct registration of possibility of fire occurrence in the adjacent building taking into consideration nature of its materials such the criterion shall be ignition temperature of the materials experiencing heat impact from the flames involving adjacent building. Due to the facts that magnitude of the heat flux parameter near the elements of the building adjacent to that involved in fire is non-stable and changing in the course of time magnitude of heat flux cannot be compared with appropriate characteristics of the materials used in the adjacent building.

Possibility of investigation of mutual influence of the mentioned criteria on the values of fire separation distances at the time of fire can be ensured due to use of appropriate mathematical model of heat exchange between facilities during the fire by gas dynamics methods and mathematical model of the processes of heat exchange between the flames and adjacent facilities together with radiation heat exchange equation. Such the approach allows taking into account amount and type of fire load within each of the adjacent buildings, availability of any openings in the adjacent buildings, their dimensions and location, and presence of appropriate fire-fighting systems as well as any obstructions to fire spread between the adjacent buildings.

Based on the calculations having been performed high efficiency of appropriate mathematical models was confirmed which allow prediction of hazard of fire propagation to adjacent construction facilities (gas hydrodynamic model taking into consideration the most significant factors of fire propagation as well as radiation heat exchange equations) taking as examples such facilities as dwelling house, filling station and bio gas production plant. It was shown at that that the parameters having been selected namely heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and duration of irradiation influence values of temperature at the surface of the elements of the buildings being irradiated from the fire source; their determination made it possible to

substantiate safe fire separation distance which appeared equal to 20 m for dwelling house and filling station and 20 m for bio gas production fermenters. Based on this conclusion was made on possibility of use of general approach based on application of some alternative computational methods, the latter having hierarchical structure.

Using developed protocol of fire investigations of heat exchange processes between heat radiation source and construction facilities including buildings and industrial plants where combustible liquids are handled which are maximally similar to real conditions a new principal scheme was proposed for studying of hazardous heat impact of fire on the adjacent building using specimens of new construction which simulated this building taking into account the most unfavourable conditions.

Experimental study was conducted of the processes of heat impact of flames produced by fire source which was 55B test fire as a fragment of a process installation upon a building with non-combustible facade with the irradiation through the window opening, and a building with combustible facade with the irradiation both through the window opening and combustible facade of the building. It was revealed that in the course of 10-minutes impact of heat flux (55B test fire) upon the specimen under study at the height of installation of thermocouples equal to 1 m temperature of its surface was growing by exponential distribution and reached 110 °C at a distance of 2 m, 58 °C at a distance of 4 m, and 48 °C at a distance of 6 m; during 30-minutes impact of the heat flux source through the window opening of the building upon the specimen under study temperature of its surface reached maximum values of 161 °C, 94 °C and 55 °C, respectively for the distances to the burning source of 2 m, 4 m and 6 m.

It was proved experimentally that in the course of 10-minutes impact of heat radiation from 55B test fire trend of temperature of the surface of the elements at the adjacent facility was described by 3<sup>rd</sup> order polynomial relation, namely  $\Theta(d)=509-337.1t+81.5t^2-6.4t^3$ ; in case of 30-minutes impact of heat radiation from a fragment upon a building with non-combustible facade trend of temperature was

described by relation of  $\Theta(d)=883-629.25d+160.25d^2-13.063d^3$ , but in the course of 60-minutes impact of heat radiation from the fragment upon a building with combustible facade trend of temperature was described by relation of  $\Theta(d)=589+194.083d-140.5d^2+15.604d^3$ .

A mathematical model was developed for heat impact of flames coming from 55B test fire as fragment of a process plant upon a building with non-combustible facade with the irradiation through the window opening and a building with combustible facade with the irradiation both through the window opening and combustible facade of the building. It was shown that the results of mathematical simulation were adequate as their relative and root-mean-square deviations from appropriate experimental results were 19 %, 16.9 %, 20 %, and 17 °C, 12.2 °C, 8 °C, respectively; Fisher criterion at that did not exceed tabular values and was equal to 4.63 and 5.08, respectively.

Methodology was developed for the computational evaluation of fire separation distances between facilities which included the following: computational and tabular method of evaluation of fire separation distances, simplified method of evaluation of fire separation distances, method based on non-stationary heat conduction equation, and field method. While conducting numerical experiment using proper mathematical models of computational gas hydrodynamics (field method) trend was revealed of the dependency of minimum safe distances for adjacent construction facilities in case of fire involving buildings with non-combustible and combustible facades as well as at industrial plants consuming combustible liquids which depended on heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and irradiation duration in the form of the following regression relations:

$$y=5.09+1.34x_1+0.475x_2+1.573x_3+0.225x_1x_2+0.073x_1x_3+0.134x_2x_3+0.134x_1x_2x_3 \text{ (for a building with combustible facade);}$$

$$y=4.275+1.1x_1+0.525x_2+1.65x_3+0.5x_1x_2+0.475x_1x_3-0.1x_2x_3-0.125x_1x_2x_3 \text{ (for a building with non-combustible facade);}$$

$$y=7.247+2.215x_1+0.698x_2+2.243x_3+0.125x_1x_2+0.21x_1x_3-0.037x_2x_3+0.39x_1x_2x_3 \text{ (for industrial plants consuming combustible liquids).}$$

A number of tables were compiled showing safe distances depending on heat-producing power of fire load, factor of openings in the external boundary constructions and duration of irradiation for the realization of simplified tabular computational method.

Methodical base was proposed for the computational substantiation of minimum safe distances and prediction of risk of fire spread to adjacent facilities by way of creation of structural scheme methods which formed together hierarchic structure and were theoretical substantiation for the development of appropriate national standard DSTU “Fire safety. Evaluation of fire separation distances between adjacent facilities by computational methods. Basic provisions”.

Some algorithms were developed for the implementation of computations for the substantiation of minimum safe distances and prediction of risk of fire spread to adjacent facilities using one of the proposed methods.

As results of the studies having been conducted an actual scientific problem was solved which was related to the revelation of the regularities of the parameters of heat exchange between flames coming from fire and construction facilities which were scientific foundations for the computational substantiation of fire separation distances between such facilities at their designing and use; they served as theoretical basis for the prediction of risks of fire propagation from one facility to another. This allowed development of a new computational method of evaluation of fire separation distances between construction facilities which takes into account the most significant characteristics of the facility those influence heat transfer process between the facilities at the time of fire and makes it possible to use territories efficiently when developing them.

**Key words:** fire distance, fireplace, temperature, thermal impact, heat transfer, the spread of fire, load, mathematical model, heat flow, heat flux receiver.

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

### Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях

1. Забезпечення пожежної безпеки наземного космічного ракетного комплексу «Циклон-4» в Федеративній Республіці Бразилія / О.О. Сізіков, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, О.Г. Доценко // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук.журнал. – К., 2012. – № 2 (26). – С. 86 – 91.
2. Ніжник В.В. Удосконалення системи функціонування джерел зовнішнього протипожежного водопостачання/ О.О. Сізіков, Н.М. Довгошеєва, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, С.Ю. Голікова // Науковий вісник УкрНДІПБ – Київ, 2013. №1 (27). – С. 49 – 57.
3. Ніжник В.В. Визначення параметрів подавання води з системи пожежогасіння в підкупольних дерев'яних конструкціях культових споруд / В.В. Ніжник // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2013. №2(28). – С. 168 – 174.
4. Ніжник В.В. Удосконалення будівельних норм з пожежної безпеки об'єктів / В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, Р.В. Уханський, С.В. Новак, Л.М. Нефедченко, С.В. Жартовський, Д.В. Мартюк // Науковий вісник УкрНДІПБ – Київ, 2014. №1 (29). – С. 65 – 72.
5. Ніжник В.В. Оцінка класу вогнестійкості самонесучої стіни залізобетонних модулів сховища відпрацьованого ядерного палива / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, В.В. Ніжник, О.П. Борис // «Пожежна безпека: теорія і практика». – Черкаси, 2015. № 20. – С. 81 – 90.
6. Ніжник В.В. Феноменологічне моделювання процесу зменшення горючості карбамідоформальдегідних пінопластів / С.В. Жартовський, О.В. Новіков, В.В. Ніжник, Е.А. Лінчевський // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2015. – № 1(31). – С. 93 – 98.
7. Ніжник В.В. Удосконалення методичних підходів до оцінювання пожежного ризику / Р.В. Климась, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, О.П. Якименко,

А.В. Нетребя, Н.М. Довгошеєва // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2016. №2 (2). – С. 83.

8. Ніжник В.В. Щодо розрахунку часу евакуації дітей з шкільних і дошкільних закладів у разі пожежі / В.В. Ніжник, О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий, Н.В. Кравченко // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2016. №1(1). – С. 81 – 88.

9. Білошицький М.В. Особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху парів сумішей горючих рідин / М.В. Білошицький, В.В. Ніжник, Н.В. Кравченко., О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2017. №2 (4). – С. 14 – 24.

10. Ніжник В.В. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2017 – № 1 (3). – С. 98 – 103.

11. Ніжник В.В. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.

12. Ніжник В.В. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности. – Харків. – 2017. – № 42., С. 155 – 164.

13. Ніжник В.В. Обґрунтування швидкості руху пожежних автомобілів для визначення дислокації пожежно-рятувальних підрозділів / О.М. Крикун, В.С. Кропивницький, В.В. Ніжник, О.П. Жихарєв, Д.О. Добряк // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2018 – № 1 (5). – С. 21 – 25.

14. Ніжник В.В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами / В.В. Ніжник // Науково-технічний збірник

«Сучасні проблеми архітектури та містобудування». – КНУБА. – К., 2019. – № 53. – С. 215 – 226.

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

16. Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу вогнища пожежі через віконний проріз будівлі на елементи суміжних об'єктів / В.В. Ніжник // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2019. – № 1(7). – С. 26 – 33.

### **Статті у міжнародних фахових виданнях**

17. Ніжник В.В. Активная противопожарная защита деревянных конструкций куполов церквей с применением огнетушащих веществ / С.В. Жартовский, В.В. Ніжник., Р.В. Уханський. – Пожаровзрывобезопасность. М.: Пожнаука 4 – 2013 с. 65 – 94.

18. Нижник В.В. Влияние целевых добавок к воде на эффективность системы пожаротушения / А.А. Сизиков, С.В. Жартовский, В.В. Нижник, Я.В. Балло, В.С. Бенедюк // Вестн. ун-та гражд. защ. МЧС Беларуси. – Минск, 2017. – Вип. 25. – С. 35 – 43.

19. Нижник В.В. Обоснование безопасного противопожарного расстояния между ферментаторами для производства биогаза / С.В. Поздеев, В.В. Нижник, Я.В. Балло, А.Н. Нуянзин, Р.В. Уханский, В.С. Кропивницкий / Naukowy wydawany. BIP. Bezpieczeństwo i technika pożarnicza. – Vol. 51 ISSUE 3, 2018. – 60 – 67. (Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).

20. Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / S.Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid // International Journal of Engineering & Technology; Vol. 7, № 4.3 (2018): Special Issue 3. – 288-292. (Видання індексується бібліометричними

платформами ProQuest (USA), Directory of Open Access Journals (DOAJ (Sweden)).

21. Нижник В.В. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник, А.Ю. Новгородченко // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2018. – № 3 (31). – С. 64 – 73.

22. Нижник В.В. Исследования теплового влияния факела модельного очага пожара класса В на элементы смежных объектов / В.В. Нижник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, А.А. Сизиков // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2019 – № 2 (34). – С. 62 – 71.

### **Інші публікації**

23. Нижник В.В. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – № 14. – С. 74 – 81. (Видання індексується бібліометричними платформами: Index Copernicus International (ICI), Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

24. Ніжник В.В. Аналіз теоретичних та експериментальних методів досліджень теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі / В.В. Ніжник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2019. – Вып. №3 (65)/2019. – С. 86 – 92. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

25. Ніжник В.В. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку / В.В. Ніжник, С.В. Поздеев, С.В. Жартовський, Ю.Л. Фещук // Міжнародний науковий

журнал "Інтернаука". – 2019. – №11 (73). – С. 47 – 51. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

26. Ніжник В.В. Моделювання теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку на елементи суміжних об'єктів / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, І.Я. Олійник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2019. – №10 (72). – С. 50 – 56. (Видання індексується бібліометричними платформами: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index, Polish Scholarly Bibliography).

### **Патенти**

27. Пат. 132896 Україна, МПК (2019.01) G09B 25/04 (2006/01), A62C 3/00, A62C 99/00, G01N 25/00, G01N 25/12 (2006.01). Зразок для дослідження процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами / В.В. Ніжник, С.В. Поздєєв, Ю.Л. Фещук, заявник та патентовласник Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. – № u 2018 10891, заяв. 05.11.2018; опубл. 11.03.2019, бюл. № 5.

### **Матеріали науково-практичних конференцій**

28. Ніжник В.В. Запобігання надзвичайним ситуаціям, що обумовлені загораннями і пожежами на об'єктах критичної інфраструктури / М.Г. Шкарабура, І.Г. Маладика, С.В. Жартовський, В.В. Ніжник // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2015. – С. 178 – 180.

29. Ніжник В.В. Висвітлення основних положень ДСТУ Б В.1.1-36:2016 у Посібнику по практичному застосуванню ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою / М.В. Білошицький, Н.В. Кравченко, В.В. Ніжник, Т.М. Скоробагатько, С.В. Семічаєвський, О.М. Тесленко // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної

конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» 20-21 жовтня 2017 року. – Черкаси, 2017. – С. 12 – 14.

30. Ніжник В.В. Адекватність вимірювання у фрагментах дерев'яних колон під час вогневих випробувань / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Технології та інфраструктура транспорту». – Харків. – 2018. – С. 311 – 313.

31. Ніжник В.В. Застосування FDS моделювання для дослідження наслідків розвиненої стадії пожежі / Я.В. Балло, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, С.Ю. Голікова Н.М. Довгошеєва // Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». – Київ. – 2018. – С. 29 – 30.

32. 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 // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті». – Харків. – 2018. – С. 131 – 133.

33. Ніжник В.В. Розрахунковий табличний метод визначення межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, В.В. Ніжник // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2018. – С. 245 – 249.

34. Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between industrial constructions / О. Kyrychenko, О. Tarasenko, А. Shvydenko, S. Hovalenkov // MATEC Web of Conferences 230, 02021 (2018). ISSN: 2261236X. (Видання індексується бібліометричною платформою SCOPUS).

35. Ніжник В.В. Моделювання процесів теплопередачі пожежі класу В / В.В. Ніжник, Я.В. Балло, О.О. Сізіков, С.Ю. Голікова // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси. – 2019. – С. 222 – 225.

36. Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу модельного вогнища пожежі через віконний проріз на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв // Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах». – Київ. – 2019. – С. 198 – 201.

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

38. Нижник В.В. Расчетно-табличный метод оценки противопожарных расстояний между смежными строительными объектами / В.В. Нижник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, С.Ю. Голикова, Я.В. Балло // Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Минск. – 2019. – С. 373 – 383.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів.....                                                                                                              | 24  |
| ВСТУП.....                                                                                                                                                                  | 27  |
| РОЗДІЛ 1 Аналіз сучасних теоретичних та експериментальних методів досліджень теплообміну між об'єктами промисловості та будівництва під час пожежі .....                    | 44  |
| 1.1 Аналіз статистичних даних про пожежі та наслідки від них на об'єктах промисловості та будівництва під час яких мало місце поширення пожежі з одного об'єкту на інший... | 44  |
| 1.2 Особливості нормування протипожежних відстаней між об'єктами будівництва.....                                                                                           | 48  |
| 1.3 Особливості експериментальних методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі.....                                                                         | 63  |
| 1.4 Особливості теоретичних методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі.....                                                                               | 74  |
| 1.5 Особливості методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі за допомогою обчислювальних методів комп'ютерної математики.....                               | 104 |
| 1.6 Узагальнення результатів огляду та обґрунтування задач досліджень.....                                                                                                  | 116 |
| РОЗДІЛ 2 Розроблення математичних моделей процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами .....                                                              | 120 |
| 2.1 Критерії для обґрунтування мінімально допустимих протипожежних відстаней між об'єктами .....                                                                            | 120 |
| 2.2 Математична модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за польовим методом.....                                                                                    | 127 |
| 2.2.1 Загальна математична модель.....                                                                                                                                      | 127 |
| 2.2.2 Модель горіння.....                                                                                                                                                   | 130 |
| 2.2.3 Граничні умови.....                                                                                                                                                   | 131 |
| 2.2.4 Числова апроксимація .....                                                                                                                                            | 135 |
| 2.2.5 Модель турбулентності. ....                                                                                                                                           | 136 |
| 2.2.6 Променистий теплообмін. ....                                                                                                                                          | 137 |
| 2.2.7 Моделювання потоків частинок. ....                                                                                                                                    | 139 |
| 2.3 Математична модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами теплопередачі у сукупності із рівнянням променистого теплообміну.....                           | 141 |

|          |                                                                                                         |     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.3.1    | Загальна математична модель .....                                                                       | 141 |
| 2.3.2    | Променистий теплообмін .....                                                                            | 142 |
| 2.3.3    | Граничні умови .....                                                                                    | 143 |
| 2.3.4    | Розв'язок рівняння теплопровідності .....                                                               | 143 |
| 2.3.5    | Узагальнення процедур щодо створення математичної моделі за методами променистого теплообміну .....     | 147 |
| 2.4      | Висновки за розділом .....                                                                              | 148 |
| РОЗДІЛ 3 | Математичне моделювання процесів теплового впливу факела пожежі на елементи суміжних об'єктів.....      | 150 |
| 3.1      | Моделювання процесів теплового впливу під час пожежі на АЗС та суміжних житлових будинках.....          | 151 |
| 3.1.1    | Загальний опис об'єкту .....                                                                            | 150 |
| 3.1.2    | Сценарій аварійної ситуації .....                                                                       | 151 |
| 3.1.3    | Розрахункові схеми .....                                                                                | 153 |
| 3.1.4    | Теплофізичні властивості матеріалів .....                                                               | 156 |
| 3.1.5    | Граничні умови .....                                                                                    | 157 |
| 3.1.6    | Методика оцінювання можливості поширення пожежі .....                                                   | 159 |
| 3.1.7    | Результати розрахунку для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності .....        | 160 |
| 3.1.8    | Результати розрахунку для польової моделі.....                                                          | 167 |
| 3.2      | Моделювання процесів теплового впливу під час пожежі у технологічних установках видобування біогазу ... | 169 |
| 3.2.1    | Опис об'єкта .....                                                                                      | 169 |
| 3.2.2    | Сценарій аварійної ситуації .....                                                                       | 170 |
| 3.2.3    | Результати розрахунку .....                                                                             | 171 |
| 3.3      | Математичне моделювання відстані від перекриття до низу завіси, що обмежує поширення пожежі.....        | 174 |
| 3.3.1    | Вибір та формування сценарію пожежі .....                                                               | 174 |
| 3.3.2    | Результати розрахунку .....                                                                             | 178 |
| 3.4      | Висновки за розділом .....                                                                              | 188 |
| РОЗДІЛ 4 | Розроблення методик експериментальних досліджень процесів теплообміну.....                              | 190 |

|          |                                                                                                                                                             |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1      | Методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та промисловими спорудами.....                             | 191 |
| 4.2      | Методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та будинками.....                                          | 204 |
| 4.3      | Висновки за розділом .....                                                                                                                                  | 219 |
| РОЗДІЛ 5 | Результати експериментальних досліджень.....                                                                                                                | 221 |
| 5.1      | Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела модельного вогнища пожежі класу В на елементи суміжних об'єктів .....              | 221 |
| 5.1.1    | За критерієм температури .....                                                                                                                              | 221 |
| 5.1.2    | За критерієм теплового потоку .....                                                                                                                         | 245 |
| 5.2      | Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела вогнища пожежі класу А на елементи суміжних об'єктів .....                         | 251 |
| 5.3      | Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела вогнища пожежі під час горіння фасаду будинку на елементи суміжними об'єктів ..... | 266 |
| 5.4      | Висновки за розділом .....                                                                                                                                  | 277 |
| РОЗДІЛ 6 | Оцінка адекватності розроблених математичних моделей....                                                                                                    | 280 |
| 6.1      | Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу В .....                                                                            | 280 |
| 6.2      | Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу А в споруді з негорючим фасадом .....                                              | 300 |
| 6.3      | Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу А в споруді з горючим фасадом.....                                                 | 316 |
| 6.4      | Висновки за розділом .....                                                                                                                                  | 323 |
| РОЗДІЛ 7 | Розробка методології розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами .....                                                                       | 324 |
| 7.1      | Загальна методологія розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами .....                                                                       | 324 |
| 7.2      | Розрахунково-табличний метод оцінювання протипожежних відстаней між об'єктами .....                                                                         | 329 |
| 7.3      | Розрахунок протипожежних відстаней між об'єктами за                                                                                                         | 339 |

|                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| спрощеним методом .....                                                                                                                                                            |     |
| 7.4 Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності. ....                    | 347 |
| 7.5 Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням польових моделей .....                                                                                 | 350 |
| 7.6 Порівняння економічних параметрів за запропонованими розрахунковими методами із існуючими підходами.....                                                                       | 354 |
| 7.7 Висновки за розділом.....                                                                                                                                                      | 360 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                                                                      | 362 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                                                                    | 366 |
| ДОДАТОК А прДСТУ Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва розрахунковими методами. Основні положення.....                           | 400 |
| ДОДАТОК Б Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.....                      | 402 |
| ДОДАТОК В Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України.....                                         | 404 |
| ДОДАТОК Г Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у діяльність ТОВ «Шілд-Фаєр» .....                                                                                     | 406 |
| ДОДАТОК Д Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у діяльність ДП Український державний науково-дослідний інститут проектування міст «ДІПРОМІСТО» ім. Ю.Б. Білоконя..... | 408 |

### **Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів**

Проектна протипожежна відстань – мінімальна відстань між суміжними об'єктами будівництва, яка забезпечує умову обмеження поширення вогню з одного об'єкту будівництва на інший та дорівнює розрахунковій протипожежній відстані помноженій на коефіцієнт безпеки.

Розрахункова протипожежна відстань – протипожежна відстань, що визначена розрахунковим методом.

Суміжні об'єкти будівництва – об'єкти будівництва, в одному із яких або на його поверхні може виникнути пожежа, що поширює тепло назовні, а інший (або інші) сприймають це тепло.

Розрахункова температура - температура, що визначена розрахунковим методом.

Допустима температура – температура, значення якої складає не більше ніж 80% від значення температури займання речовини або матеріалу.

Коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку – відношення площі прорізів у зовнішній огорожувальній конструкції (в тому числі площі скління) будинку, до загальної площі цієї огорожувальної конструкції.

Коефіцієнт безпеки – чисельне значення, на яке збільшують розрахункову протипожежну відстань.

$K_6$  – коефіцієнт безпеки.

$O$  – коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку.

$\Phi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання.

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

$A_s$  – площа поверхні, яка випромінює тепло,  $m^2$ .

$A_t$  – загальна площа зовнішніх огорожувальних конструкцій (враховуючи прорізи),  $m^2$ .

$A_{t1}$  – загальна площа зовнішньої огорожувальної конструкції (враховуючи прорізи) будинку, в якій виникла пожежа протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло,  $m^2$ .

$A_v$  – загальна площа прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку,  $m^2$ .

$A_{v1}$  – загальна площа прорізів у стіні будинку, в якій виникла пожежа протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло,  $m^2$ .

$L_f$  – довжина поверхні, що випромінює тепло, м.

$L_H$  – горизонтальна проекція поверхні, що випромінює тепло, м.

$L_L$  – висота поверхні, що випромінює тепло, м.

$Q$  – пожежна навантага у протипожежному відсіку,  $Dж/m^2$ .

$R_I$  – проектна протипожежна відстань, м.

$R$  – розрахункова протипожежна відстань ( $R_{1,2}$  – розрахункова протипожежна відстань для першого та другого проектного сценарію пожежі у будинку), м.

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

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

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

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

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

$T_s$  – початкова температура на поверхні суміжного об'єкту, що опромінюється теплом  $^{\circ}C$ .

$T_H$  – температура середовища, в яке передається тепло від поверхні, суміжного об'єкту, що опромінюється теплом,  $^{\circ}C$ .

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

$W_1$  – ширина зовнішньої стіни будинку, в якому виникла пожежа протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло, м.

$W_2$  – ширина зовнішньої стіни будинку, в якій виникла пожежа та перпендикулярна до стіни, яка протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло, м.

$W_i$  – ширина  $i$ -го прорізу, м.

$W_t$  – сумарна ширина прорізів, м.

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

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

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

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

$\varepsilon_f$  – ступінь чорноти полум'я.

$\varepsilon_m$  – ступінь чорноти поверхні матеріалу або речовини.

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

$q$  – кількість теплоти, що передається від пожежі, Вт.

$t$  – тривалість теплового опромінювання, с.

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

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

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Згідно із статистичними даними про пожежі встановлено, що кожного року в Україні від загальної кількості пожеж близько 2000 мають місце випадки, коли відбувається поширення пожежі від вогнища пожежі до суміжних об'єктів в наслідок теплового випромінювання або конвективних потоків. Одним із превентивних заходів щодо недопущення поширення вогню від об'єкту, що горить до суміжного об'єкту є протипожежні відстані, які встановлюють між суміжними об'єктами.

Визначення протипожежних відстаней між об'єктами нового будівництва або реконструкції існуючих є першочерговою задачею під час розроблення ситуаційного розташування таких об'єктів на плані, а також планування прибудинкової території. Обґрунтоване визначення протипожежних відстаней забезпечує не тільки безпеку суміжних об'єктів, але і має істотний вплив на економічну складову з точки зору раціонального використання території. Зокрема, визначення зменшеного значення протипожежної відстані відносно необхідного, яке забезпечує умову безпеки щодо не поширення вогню на суміжні об'єкти. А не обґрунтоване збільшення протипожежної відстані відносно необхідного значення сприяє не раціональному використанню земельних ресурсів. Зокрема, на сьогодні встановлено, що 1 м<sup>2</sup> незабудованої території становить близько 20 % вартості такої ж площі забудованої території.

Дослідженнями щодо експериментальної та розрахункової оцінки протипожежних відстаней присвячені роботи: Грушевського Б.В., Гундаря С.В., Кривошеєва І.А., Ликова А.В., Лободи Е.А., Підгрушного А.В., Ройтмана М.Я., Романенка П.Н., Яковлева Л.І., Peter Collier. Під час дослідження процесів теплообміну між вогнищем пожежі та речовинами і матеріалами, на які впливає тепло від пожежі внесли значний вклад вітчизняні та закордонні вчені: Бакширцев М.П., Басманов А.Е., Беліков А.С., Кашмаров Ю.А., Ковалишин В.В., Костенко В.К., Новак С.В., Новіков І.Т., Нуязін О.М., Поздєєв С.В., Тищенко О.М., Хасанов І.Р., E. Garlsson, P. Tofito

та ін. Але при цьому поза увагою залишилися питання створення методу за допомогою якого можлива кількісна оцінка можливості поширення пожежі від вогнища пожежі на смужні об'єкти із урахуванням найбільш значущих параметрів, що впливають на процеси теплообміну під час пожежі.

Слід також відмітити, що забезпечення мінімально необхідних протипожежних відстаней між суміжними об'єктами є підтвердженням дотримання основної вимоги до споруд щодо пожежної безпеки, а саме: поширення вогню та диму на сусідні споруди і прилеглі території повинно бути обмежене така ж вимога також визначена Регламентом Європейського Союзу № 305/2011 та в державних будівельних нормах.

Для реалізації зазначеної вимоги в ДБН В.1.1-7 визначено перелік інженерних рішень для запобігання поширенню вогню та диму на сусідні споруди і прилеглі території, а саме:

- розміщення вибухопожежонебезпечних та пожежонебезпечних виробничих і складських будинків, зовнішніх установок, складів горючих рідин, горючих газів з урахуванням переважаючого напрямку вітру, а також рельєфу місцевості;

- встановлення протипожежних відстаней між будинками, зовнішніми установками, а також відкритими майданчиками для зберігання пожежонебезпечних речовин і матеріалів;

- зниження пожежної небезпечності будівельних матеріалів, що використовуються в зовнішніх огорожувальних конструкціях, у тому числі облицювання, оздоблення, опорядження фасадів будинків, а також у покриттях;

- застосуванням конструктивних рішень, спрямованих на створення перешкоди поширенню пожежі між будинками, наприклад: влаштування протипожежних стін, обмеження площі віконних та інших прорізів у зовнішніх стінах, використання вогнестійкого скління віконних прорізів, протипожежних завіс (екранів) тощо.

Разом за цим документом неможна оцінити зниження можливості поширенню вогню на сусідні будинки у разі використання одного або іншого рішення. Також не дає рекомендації щодо переваг використання тих чи інших рішень, в залежності від особливостей планування території.

Обмеження поширення вогню на сусідні будівельні об'єкти може досягатись шляхом обмеження інтенсивності теплового випромінювання за рахунок встановлення і виконання вимог щодо відстані між будівельними об'єктами.

При існуючих підходах до оцінювання протипожежних відстаней за допомогою розпорядчого методу, який передбачає використання чітких табличних значень не має можливості врахування параметрів, що впливають на процеси теплообміну між об'єктами під час пожежі. При цьому, як свідчать вчені табличні значення встановлені без відповідного наукового обґрунтування та визначалися експертним шляхом.

Використання такого методу не дозволяє враховувати під час визначення протипожежних відстаней таких суттєвих характеристик будинків та споруд, як величина пожежної навантаги, вид і пожежо-технічні характеристики горючих матеріалів і речовин, які в ньому обертаються, конструктивні характеристики будинку (наявність прорізів у зовнішніх будівельних конструкціях, через які можливе поширення вогню на інший будинок, взаємне розташування пожежної навантаги в просторі), оснащеність будинку автоматичними системами пожежогасіння, наявність між будинками перешкод для поширення пожежі, взаємне розташування будинків та споруд один відносно одного тощо. Також слід зазначити, що під час встановлення нормативних значень протипожежних відстаней у будівельних нормах закладаються високі коефіцієнти запасу, які не піддаються керуванню і в деяких випадках можуть суттєво впливати на економічні показники забудови у специфічних умовах. Окрім цього, в літературних джерелах зазначається, що таблиці державних будівельних норм, які встановлюють нормовані значення протипожежних відстаней не мають відповідного наукового

обґрунтування та, як правило, визначалися експертним шляхом із урахуванням практичного досвіду, що на даний час є застарілим в умовах щільності забудови, сучасної інфраструктури та застосування новітніх будівельних матеріалів та технологій.

У якості переваги розпорядчого методу слід відмітити простоту його використання. Цей метод реалізовано в Україні шляхом встановлення мінімальних значень протипожежних відстаней між будинками (спорудами), зовнішніми установками, а також відкритими майданчиками для зберігання пожежобезпечних речовин і матеріалів в будівельних нормах, які поширюються на планування і забудову територій населених пунктів та міжселенних територій на державному, регіональному та місцевому рівні.

Таким чином, описаний вище розпорядчий метод нормування протипожежних відстаней досить простий у використанні, але він встановлює жорсткі вимоги, які зумовлюють необґрунтовано великі коефіцієнти запасу, рекомендовані значення протипожежних відстаней між будинками та спорудами не дозволяють визначати можливість поширення пожежі шляхом врахування конструктивних, кліматичних, рельєфних та інших особливостей забудови, що суттєво впливають на параметри процесів теплообміну під час пожежі між суміжними об'єктами. Це означає, що жорсткі вимоги до проектних рішень при застосуванні розпорядчого методу не дозволяють реалізувати гнучкий підхід з врахуванням соціально-економічних показників, застосування вогнестійких матеріалів, збільшення щільності протипожежних підрозділів, специфіки пожежної навантаги та ін. У деяких випадках існування особливих вимог та обмежень планування під час забудови території містобудівних умов рекомендованих значень протипожежних відстаней не можливо дотриматись, тому їх необхідно обґрунтовувати із використанням більш точних методів нормування та визначення мінімально необхідних (безпечних) протипожежних відстаней, таких як розрахунковий та/або експериментальний.

Перспективним є розроблення та впровадження розрахункових (параметричних) методів, які дадуть змогу врахувати суттєві характеристики об'єктів (в якому можлива пожежа та який опромінюється під час пожежі), що впливають на процеси теплообміну під час пожежі. Для цього можна використовувати різні математичні моделі, які за складністю мають відповідну ієрархію, в основі якої лежать прості розрахунково-табличні методи або методи із використанням простих алгебраїчних співвідношень, а на її вершині знаходяться польові моделі із використанням систем диференціальних рівнянь у часткових похідних у числовій реалізації із застосуванням потужних комп'ютерних систем.

Не зважаючи на те, що параметричний метод визначення безпечних значень протипожежних відстаней вважається більш точним, на сьогоднішній день, його сфера використання обмежена будівельними нормами. Зокрема ДБН В.1.1-7 передбачає можливість застосування розрахункових методів визначення необхідних значень протипожежної відстані лише для об'єктів, на яких вона не встановлена розпорядчим методом.

Така ситуація призвела до того, що застосування даних методів не виправдано обмежується, і, як наслідок, в Україні на сьогоднішній день відсутні унормовані методики реалізації розрахункових методів визначення необхідного значення протипожежних відстаней. І таким чином у випадку неможливості забезпечення обов'язкових вимог щодо нормованих значень протипожежних відстаней, відхилення від таких норм обґрунтовуються таким же самим експертним шляхом без належного наукового (розрахункового та/або експериментального) обґрунтування, що в свою чергу може призвести до помилки експерта та у разі виникнення на одному із суміжних об'єктів пожежі поширення її на сусідній будинок (споруду).

Отже, стан порушеного питання характеризується протиріччями:

- на практиці:

а) з одного боку, наявна система табличних значень щодо встановлення протипожежних відстаней та перелік рішень при яких такі значення можуть бути зменшені;

б) з іншого боку мають випадки поширення пожежі від одного будинку на інший та відсутні методи щодо кількісної оцінки зниження можливості поширення пожежі від об'єкту, що горить до суміжного об'єкту у разі використання одного чи комплексу рішень.

- в теорії:

а) з одного боку, наявне підґрунтя щодо математичного описання процесів теплопередачі від об'єкту, що горить до суміжного об'єкту;

б) з іншого боку, відсутні науково обґрунтовані закономірності параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами.

Тож дослідження спрямовані на розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами, що являється науковими основами для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для прогнозування можливості поширення пожеж від одного об'єкту на інший є актуальною науковою задачею.

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукової діяльності УкрНДІЦЗ в рамках Переліку розробок на створення науково — технічної продукції з нормування у сферах будівництва та житлової політики на 2018 рік за бюджетною програмою КПКВК 2751030 затвердженого наказом Мінрегіону № 30 від 12.02.2018, Програми робіт з національної стандартизації на 2019 рік затвердженої наказом ДП «УкрНДНЦ» від 25 лютого 2019 року № 33, Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої» ратифікованої із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014, Стратегії розвитку системи технічного регулювання на період до 2020 року

затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 № 844-р, замовленнями Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України на науково-дослідні роботи, які виконано в УкрНДІЦЗ за участю здобувача у якості керівника роботи, результати яких використано в дисертації: «Провести дослідження та обґрунтувати вимоги до розрахункового методу визначення мінімальних протипожежних відстаней» (ДР № 0118U004739), «Провести дослідження та обґрунтувати загальні вимоги пожежної безпеки до об'єктів різного призначення» (ДР № 0117U001199), «Провести дослідження і розробити проект зміни № 2 до ДБН В.1.1.7-2002» (ДР № 0113U004932).

Мета і завдання дослідження: виявлення закономірностей зміни параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами для розвитку наукових основ щодо розрахункових методів оцінювання небезпеки поширення пожежі з одного об'єкта на інший як наукового підґрунтя для встановлення протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати теоретичні дослідження та нормативну базу щодо оцінки безпечних відстаней між об'єктами промисловості та будівництва з точки зору пожежної безпеки та виявити шляхи їх удосконалення;
- обґрунтувати критеріальну базу, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти та яка враховує їх конструктивні особливості, властивості матеріалів та сценарій пожежі;
- провести обґрунтування математичних моделей для описання теплообміну між об'єктом, на якому виникла пожежа та суміжним об'єктом з метою створення розрахункової бази із застосуванням комп'ютерних технологій;
- розробити методики експериментальних досліджень процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами;

- провести експериментальні дослідження за розробленими методиками та на основі отриманих експериментальних даних побудувати регресійні моделі температури нагріву поверхні суміжного об'єкту;

- порівнюючи результати експериментальних досліджень з відповідними їм газо-гідродинамічною моделлю, моделлю на основі рівняння теплообміну та регресійною моделлю довести їх адекватність і оцінити точність;

- використовуючи розроблені математичні моделі провести чисельний експеримент щодо визначення протипожежних відстаней в залежності від найбільш значущих факторів;

- на основі отриманих закономірностей розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки протипожежних відстаней між суміжними об'єктами;

- дослідити економічну ефективність розробленого методичного забезпечення щодо розрахункової оцінки протипожежних відстаней.

**Об'єкт дослідження** — — процеси теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами, а також умови загорання матеріалів зовні чи всередині будівельних об'єктів унаслідок цих процесів.

**Предмет дослідження** — зв'язок параметрів суміжних будівельних об'єктів та параметрів процесів теплообміну при пожежі, а також можливість загорання матеріалів на даних об'єктах, що є причиною поширення пожежі між ними, як основа для розвитку розрахункових методів оцінювання протипожежних відстаней..

**Методи дослідження:** під час виконання дисертаційної роботи використано: комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо оцінювання протипожежних відстаней; математичне моделювання процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами шляхом використання методів стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності та польових методів; методи кінцевих різниць за схемою «предиктор-коректор», кінцевих об'ємів для розв'язання диференціальних рівнянь; метод Ейлера для

розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса під час моделювання процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами; методи вимірювання температури та вологості повітря, атмосферного тиску, швидкості вітру під час експериментальних досліджень; метод наявності викидів та квазिवикидів у результатах досліджень (Габса); метод перевірки належності дисперсій результатів досліджень до однієї генеральної сукупності (Фішера); метод дихотомії для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей; табличний метод, спрощений метод, розрахунковий метод із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності, розрахунковий метод із використанням польових моделей для оцінювання протипожежних відстаней; метод визначення пожежної навантаги; метод планування експерименту; методи полігонних вогневих випробувань (за розробленими методиками) для дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами; методи математичної статистики для оброблення результатів експериментальних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі одержані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми розвитку наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти. Наукова новизна, яких полягає у розкритті закономірностей впливу параметрів теплообміну при пожежі суміжних будівельних об'єктів на величину протипожежних відстаней між ними.

У результаті **вперше** отримані наступні наукові результати:

1. Для визначення протипожежних відстаней обґрунтована критеріальна база, яка заснована на прямій індикації можливості утворення пожежі на суміжному будівельному об'єкті за величиною температури нагріву матеріалів даного будівельного об'єкту, якщо величина цієї температури перевищує 80 % від значення температури їх займання.

2. Показано, що врахування у математичних моделях газо-гідродинаміки та теплопереносу впливу параметрів, саме: теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання на температурні показники поверхні елементів будівельних об'єктів, що опромінюються від факелу пожежі, дозволяє обґрунтувати безпечні протипожежні відстані для різних будівельних об'єктів.

3. Обґрунтовано розміри та конструкція експериментального зразка, що імітує фрагмент будинку для якого визначається протипожежна відстань, з метою дослідження найбільш несприятливих умов, при яких нагрівання поверхні суміжного будівельного об'єкту, що імітує зразок, буде максимальним.

4. Експериментальним шляхом виявлено і формалізовано у вигляді регресійної поліноміальної залежності третього порядку закономірності зміни температури на суміжному будівельному об'єкті в залежності від відстані між цим об'єктом і полум'ям пожежі.

5. Виявлені залежності величини протипожежних відстаней між будівельними об'єктами із горючим, негорючим фасадами, а також об'єктами промислових підприємств із використанням горючих рідин від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання, що мають вигляд лінійних (по кожному з факторів) регресійних залежностей.

6. Обґрунтовані довідникові таблиці для реалізації спрощеного метода визначення протипожежних відстаней за значеннями параметрів теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання.

### **Набули подальшого розвитку:**

1. Експериментальне визначення параметрів теплообміну при пожежі у суміжних будівельних об'єктах із використанням зразків, що імітують їх частини, і які піддаються найбільшому тепловому впливу.

2. Застосування розрахункових інженерних методів обґрунтування протипожежних відстаней для будинків з горючим та негорючим фасадами, а також промислових підприємств з горючими рідинами з використанням довідникових таблиць за параметрами приміщень із пожежами.

#### **Удосконалено:**

1. Науково-методичну базу забезпечення пожежної безпеки при розташуванні будівель і споруд для запобігання поширення пожежі між ними.

2. Методичну та експериментальну базу дослідження теплового впливу пожежі на суміжні будівельні об'єкти.

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

Практична цінність досліджень полягає у створенні методичної бази щодо розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між суміжними об'єктами, що дозволяє більш раціонально використовувати територію забудови тим самим досягти суттєвого скорочення економічних витрат. Це може бути досягнуто за рахунок комплексного врахування найбільш значущих факторів, які можуть вплинути на теплообмін між пожежею та суміжними об'єктами будівництва.

Розроблена методична база є підґрунтям для створення нормативного забезпечення для оцінювання протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами і впроваджена при розробці національного стандарту ДСТУ «Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами. Основні положення».

Результати проведених досліджень також впроваджені у навчальний процес Черкаського інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України при викладанні дисциплін «Пожежна профілактика в населених пунктах», «Будівлі і споруди та їх поведінка в умовах пожежі» (акт від 05.09.2019 року), у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України (акт від 26.08.2019 року), ТОВ «Шілд-Фаєр» (акт від 10.10.2019 року), ДП Український державний науково-дослідний інститут проектування міст «Діпромісто» ім. Ю.М. Білоконя (акт від 19.09.2019 року).

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

**Особистий внесок здобувача** полягає в участі у формулюванні науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійному визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень, аналізі вітчизняних та закордонних джерел інформації, удосконаленні та розробленні методів і методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень, а також в обробленні їх результатів, формуванні висновків. Дана дисертація є самостійною роботою автора. Всі положення, винесені на захист, та результати їх застосування приведені в роботах [1 - 38].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [1] проведено теоретичні дослідження щодо небезпеки поширення пожежі між будинками наземного космічного ракетного комплексу «Циклон-4» в Федеративній Республіці Бразилія та встановлено вимоги щодо протипожежних відстаней. В роботі [2] на підставі аналітичних досліджень запропоновані вимоги щодо встановлення можливості доступу та безпечних відстаней від будинків до джерел протипожежного водопостачання. У роботі [3] проведені експериментальні дослідження процесів теплопередачі від вогнища пожежі до поверхонь конструкцій будівель та споруд і вплив на дані процеси автоматичних систем пожежогасіння на основі полігонних вогневих випробувань фрагментів таких конструкцій із вогнищами пожежі. У роботі [4] проведено аналіз ДБН В.1.1-7 з урахуванням сучасних підходів щодо нормування пожежної безпеки об'єктів будівництва, зокрема в частині щодо виконання основної вимоги «Пожежна безпека», а саме: поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти повинно бути обмежено. Визначено шляхи удосконалення будівельних норм щодо обмеження поширення пожежі на суміжні об'єкти, розглянуті критерії, що впливають на процеси теплообміну між суміжними об'єктами під час пожежі. В роботі [5] досліджені процеси теплообміну при пожежі з використанням методу кінцевих елементів у

модулях сховища відпрацьованого ядерного палива як наукове підґрунтя щодо розрахункової оцінки небезпеки поширення пожежі між секціями та окремими будівельними об'єктами підприємств ядерної енергетики. В роботі [6] представлена феноменологічна модель зменшення горючості карбомідоформальдегідних смол пінопластів, що можуть використовуватися у фасадних системах будинків та споруд як елемент теоретичної бази щодо обґрунтування протипожежних відстаней із урахуванням реальних теплових процесів під час горіння. В роботі [7, 28] обґрунтовано нові методичні підходи для розрахунку значення ступеня ризику негативних наслідків від пожежі, що можуть враховувати в тому числі значення протипожежних відстаней між суміжними об'єктами, а також критерій наявності автоматичних систем пожежогасіння. В роботі [8] проведено аналіз літературних джерел та обґрунтуванні залежності, що описують закономірності зв'язку між параметрами людського потоку при русі на різних видах шляху при пожежі із урахуванням критеріїв пожежної навантаги на шляхах евакуації та теплової дії осередку пожежі залежно від наявності прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях. В роботах [9, 29] проведені розрахунки надлишкового тиску вибуху в залежності від кількості пожежної навантаги та фізико-хімічних характеристик речовин та матеріалів, що її складають. Зроблено висновки щодо можливого впливу зазначених критеріїв на небезпеку поширення пожежі на суміжні будинки. В роботах [10] проаналізовано чинну нормативну базу щодо вогнестійкості будівельних конструкцій залежно від типу матеріалів, з яких вони виготовлені та запропонована модель дослідного зразка для оцінювання протипожежних відстаней експериментальними методами. В роботі [11] розглянуто ідею використання табличних, спрощених та уточнених розрахункових методів під час оцінювання теплового впливу на будівельні конструкції та матеріали. В роботі [12] запропоновано схему розташування термопар в середині дослідного зразка, що забезпечує наближення ізотерм, які відтворюють температурне поле у середині зразка та апробована модель дослідного зразка

для оцінювання протипожежних відстаней експериментальними методами. В роботі [13] обґрунтовано місця дислокації пожежно-рятувальних підрозділів та встановлений взаємозв'язок їх логістичних характеристик із тривалістю прибуття даних підрозділів на пожежу, що використовується як елемент теоретичної бази щодо оцінювання протипожежних відстаней. В роботі [15] проведені розрахунки щодо обґрунтування безпечних протипожежних відстаней між житловим будинком та АЗС із використанням сучасних комп'ютерних комплексів та здійснена верифікація запропонованих математичних моделей щодо оцінювання протипожежних відстаней розрахунковими методами. В роботі [17] розглянутий вплив на процеси теплопередачі між суміжними будівельними об'єктами та їх секціями при пожежі наявності автоматичних систем водяного пожежогасіння. В роботі [18] проведено обґрунтування параметрів пожежного навантаження для закритих вогневих боксів в яких відбувається імітування пожежі в середині будинку. В роботі [19] досліджено геометрію і енергетичні параметри факелу пожежі над ферментатором та проведені розрахунки з використанням методів обчислювальної газо-гідродинаміки щодо обґрунтування величини безпечної протипожежної відстані між ферментаторами. В роботах [20] обґрунтовано методики експериментальних досліджень процесів теплопередачі між суміжними будинками із прорізами у зовнішніх будівельних конструкціях та обґрунтовано місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання. В роботі [21, 30] здійснено апробацію методу інтерполяції температурних розподілів, який можна використати під час дослідження закономірностей зміни температури на суміжному будівельному об'єкті в залежності від відстані до цього об'єкту від полум'я, пожежі на прикладі фрагментів дерев'яних колон. В роботі [22, 35, 37] проведені експериментальних досліджень теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класу В на елементи суміжних об'єктів. Здійснено перевірку результатів дослідження на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса. Визначено залежність температури в

модельному вогнищі пожежі класу 55 В на різних висотах від часу теплової дії. В роботі [23, 33] проведено повно факторний експеримент щодо прогнозування вогнестійкості дерев'яних колон та запропоновано використання зазначеного методу під час розроблення табличних даних щодо визначення протипожежних відстаней. В роботі [25] розроблено методику та проведено дослідження впливу густини теплового потоку на елементи суміжних будівельних об'єктів залежно від тривалості теплового впливу та відстані від вогнища пожежі. Запропонований новий підхід щодо критеріїв небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, в якості критерію має використовуватись температура займання матеріалів, що піддаються тепловому впливу з боку факелу пожежі, на суміжному будинку. В роботі [26, 31] розроблено математичну модель процесів теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку на елементи суміжних об'єктів за методами газодинаміки та проведено моделювання процесів теплового впливу пожежі на суміжний будинок та здійснено валідацію розробленої математичної моделі із результатами експериментальних досліджень. В роботі [27] розроблено зразок для дослідження процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами та запропоновано місце встановлення датчика вимірювання температури. В роботі [32, 34] обґрунтовано методики експериментальних досліджень процесів теплопередачі між промисловими спорудами, що не мають огорожувальних будівельних конструкцій та обґрунтовано місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання. В роботі [36] отримано регресійні залежності зміни температури на поверхні фасаду будівлі від відстані розташування такої будівлі від осередку горіння та різної тривалості теплового впливу (12 хв, 21 хв, 30 хв). В роботі [38] запропоновано використовувати критерій «температура займання матеріалів» як основний при визначенні протипожежних відстаней між суміжними будівельними об'єктами. На основі регресійної лінійної залежності

обґрунтовано розрахунково-табличний метод визначення протипожежних відстаней для трьох різних об'єктів.

В представленій докторській роботі не використані матеріали кандидатської дисертаційної роботи Ніжника В.В. за темою «Удосконалення систем протипожежного захисту під купольних дерев'яних конструкцій культових споруд», яка захищена у 2011 році.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю Надзвичайні ситуації: безпека та захист (м. Черкаси, 2015 р.), VII Всеукраїнська науково-практичної конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2017 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту» (м. Харків, 2018 р.); 20 Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (м. Київ, 2018 р.); VII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків, 2018 р.); VIII Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2018 р.); 7<sup>th</sup> International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Kharkiv, 2018); X Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2019 р.); 21 Всеукраїнська науково-практична конференція (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 2019 р.); XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2019 р.); VIII Международная научно-практическая конференция, посвященная 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным

ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» (г. Минск, 2019 г.).

**Публікації.** Основні положення і наукові результати дисертації увійшли до 38 опублікованих робіт, серед яких: 6 статей у закордонних фахових наукових виданнях; 16 статей у наукових фахових виданнях України, 4 статті в інших виданнях (індексуються міжнародними наукометричними базами даних); 11 доповідей і тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій; 1 патент на корисну модель.

### **Структура та обсяг роботи**

Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 316 найменувань, містить 409 сторінок друкованого тексту (з них 399 сторінок основного тексту), 62 таблиця, 203 рисунки, 5 додатків.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛООБМІНУ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ ПРИСЛОВОСТІ ТА БУДІВНИЦТВА ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ**

### **1.1. Аналіз статистичних даних про пожежі та наслідки від них на об'єктах промисловості та будівництва під час яких мало місце поширення пожежі з одного об'єкту на інший**

Упродовж 2013÷2018 років в Україні виникло 445 523 пожежі, із них у будинках та спорудах 205 938 (47 %). У наслідок таких пожеж загинуло 12 335 людей (у тому числі 389 дітей), на пожежах травмовано 8 732 людини (у тому числі 719 дітей), вогнем знищено або пошкоджено 147 101 будівлю і споруду, 24 983 одиниці техніки. Матеріальні втрати від пожеж склали 39 млрд 435 млн 323 тис. грн (із них прямі збитки становлять 9 млрд 523 млн 223 тис. грн, а побічні – 29 млрд 912 млн 100 тис. гривень) [1, 2].

У 6 650 випадках мало місце поширення пожежі від однієї будівлі до іншої, внаслідок чого пошкоджено 17 331 будівлю і споруду. Зокрема, впродовж 2018 року у 2 161 випадку спостерігалось поширення пожежі від одного будинку (споруди) на інший.

Вивчення причин розповсюдження пожежі між будівлями, серед яких є такі причини, як перенесення теплової енергії шляхом променевого та конвективного теплообміну, вибухи, скіпання і розлив горючих рідин, забрудненість території, що прилегла до будинків горючими матеріалами (сухою рослинністю) [1, 2].

Одним із заходів протипожежного захисту будівель і споруд від таких пожеж є нормування та встановлення протипожежних відстаней між ними для запобігання розвитку пожеж та можливості маневрування пожежно-рятувальних підрозділів під час їх гасіння.

Однією з причин поширення пожежі від одного будинку на інший є помилковість визначення протипожежних відстаней між такими будинками (спорудами) або не дотримання їх нормованих значень під час планування та забудови територій. Прагнення зменшити протипожежні відстані або ігнорування дотримання їх нормованих значень зумовлено перш за все економічною складовою. Встановлено, що 1 м<sup>2</sup> незабудованої території становить близько 20 % вартості такої ж площі забудованої території [3]. Але при цьому не обґрунтоване зменшення протипожежної відстані може призвести до поширення пожежі між будинками у разі її виникнення в одному із будинків.

У якості показових прикладів помилкового визначення протипожежних відстаней під час проектування та забудови територій, що призвели до поширення пожежі на суміжні об'єкти і мали суттєві соціально-економічні наслідки, можна навести такі випадки.

22 квітня 2017 року у торговельному павільйоні на території ТОВ «Ринок північний», що по проспекту Добровольського, 114/2 м. Одеси, виникла пожежа. Вогнем знищено та пошкоджено 134 торговельних павільйони на загальній площі близько 900 м<sup>2</sup>. Панорамний вид зверху пошкоджених павільйонів ТОВ «Ринок Північний» наведено на рисунку 1.1. Поряд з високою температурою та сильним задимленням, одним з чинників, що сприяв поширенню пожежі та ускладнював її гасіння, стало зменшення до 2,5 м повздовжніх та відсутність поперечних протипожежних відстаней між торговельними павільйонами [1, 2, 4].



Рисунок 1.1 – Панорамний вид зверху пошкоджених павільйонів ТОВ «Ринок Північний»

15 вересня 2017 року спалахнула пожежа у спальному корпусі № 5 комунального позашкільного навчального закладу “Одеський міський дитячий оздоровчо-спортивний комплекс “Вікторія”. Корпус №5 вогнем знищено повністю. Будівельні конструкції корпусів №4 і №6 комплексу “Вікторія” та корпусу пансіонату “Лазурний” на суміжній території, що розташовувались від осередку пожежі на протипожежних відстанях 15 м, 14,8 м та 13,5 м відповідно, під дією високої температури зазнали термічних ушкоджень, але поширення пожежі від однієї споруди до іншої не відбулося, що свідчить про правильність вибору протипожежних відстаней під час планування та забудови території комплексу та суміжних територій. Загальний вигляд термічних пошкоджень будівельних конструкцій корпусу №6 (вид з південного боку) зображено на рисунку 1.2 [4].



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд термічних пошкоджень будівельних конструкцій корпусу № 6

На рисунку 1.3 зображено приклад пожежі, що сталася в одному із житлових будинків. Внаслідок не достатнього значення протипожежної відстані до сусіднього житлового будинку пожежа поширилася з одного

житлового будинку на інший. В результаті пожежі обидва житлові будинки повністю знищено вогнем.



Рисунок 1.3 – Пожежа в житлових будинках

Таким чином, наведені випадки пожеж та статистичні дані [1, 2] свідчать, що визначення необхідних значень протипожежних відстаней експертним шляхом без належного наукового обґрунтування може призвести під час пожежі до поширення її на суміжні будинки та споруди, в наслідок чого збільшуються негативні наслідки від таких пожеж та вони можуть перейти у розряд катастрофічних.

Вивчення причин розповсюдження пожежі між будинками та спорудами, показало, що переважно основним фактором перенесення теплової енергії є промениста складова. Це необхідно брати до уваги під час розроблення та реалізації параметричних (розрахункових) методів визначення необхідної протипожежної відстані.

Таким чином, аналіз статистичних даних про пожежі та наслідки від них свідчить, що кожна 30-та пожежа в будинках та спорудах супроводжується поширенням горіння на суміжні будинки (споруди). Матеріальні збитки та наслідки від таких пожеж збільшуються та можуть класифікуватися як надзвичайні ситуації [1, 2]. Однією з причин поширення пожежі від одного будинку на інший є помилковість визначення протипожежних відстаней між такими будинками (спорудами). Така ситуація зумовлює необхідність перегляду або удосконалення існуючих підходів щодо

визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. Зокрема переходу від розпорядчого методу визначення протипожежних відстаней, який не дозволяють керувати можливістю поширення пожежі шляхом врахування конструктивних, кліматичних, рельєфних та інших особливостей забудови, що суттєво впливають на параметри процесів теплообміну під час пожежі між суміжними об'єктами до параметричного методу визначення протипожежних відстаней, який передбачає можливість досягнення необхідного рівня безпеки із урахуванням усіх суттєвих характеристик об'єкта будівництва [5]. Реалізація зазначеного методу дозволить керувати можливістю поширення пожежі від одного будинку на інший в напрямку їх зменшення.

## **1.2. Особливості нормування протипожежних відстаней між об'єктами будівництва**

Забезпечення мінімально необхідних протипожежних відстаней між суміжними об'єктами є підтвердженням дотримання основної вимоги до будинків та споруд щодо пожежної безпеки, а саме: *«...поширення вогню та диму на сусідні споруди і прилеглі території повинно бути обмежене»* [6, 7].

Для реалізації зазначеної вимоги в [8] визначено перелік інженерних рішень для запобігання поширенню вогню та диму на сусідні споруди і прилеглі території, а саме:

- розміщення вибухопожежонебезпечних та пожежонебезпечних виробничих і складських будинків, зовнішніх установок, складів горючих рідин, горючих газів з урахуванням переважаючого напрямку вітру, а також рельєфу місцевості;

- встановлення протипожежних відстаней між будинками, зовнішніми установками, а також відкритими майданчиками для зберігання пожежонебезпечних речовин і матеріалів;

- зниження пожежної небезпечності будівельних матеріалів, що використовуються в зовнішніх огорожувальних конструкціях, у тому числі

облицювання, оздоблення, опорядження фасадів будинків, а також у покриттях;

- застосуванням конструктивних рішень, спрямованих на створення перешкоди поширенню пожежі між будинками, наприклад: влаштування протипожежних стін, обмеження площі віконних та інших прорізів у зовнішніх стінах, використання вогнестійкого скління віконних прорізів, протипожежних завіс (екранів) тощо.

Разом з цим документ [8] не дає можливості оцінки поширення вогню на сусідні будинки у разі використання одного або іншого рішення. Також не дає рекомендації щодо переваг використання, тих чи інших рішень, в залежності від особливостей планування території.

Документ [8] дає визначення терміну протипожежна відстань, як нормована відстань між будинками, яку встановлюють для запобігання розвитку пожежі.

В Україні визначення та нормування протипожежних відстаней між об'єктами різного функціонального призначення базується на Радянських нормативах. Першим нормативним документом, що визначав норми протипожежних відстаней був [9]. В зазначеному нормативному документі розділ, який стосується протипожежних відстаней є удосконаленням вимог [10, 11].

На сьогоднішній день вимоги до протипожежних відстаней визначаються будівельними нормами [12]. Згідно із цим документом протипожежні відстані між будинками і спорудами приймаються у світлі між зовнішніми стінами або іншими конструкціями. За наявності конструкцій будинків і споруд, виготовлених із горючих матеріалів, що виступають більше, ніж на 1 м за площину фасаду, протипожежні відстані визначаються між цими конструкціями.

В документі протипожежні відстані за нормовані у вигляді табличних даних та встановлені для таких будинків за функціональним призначенням: житлових, громадських, виробничих, адміністративно-побутових будинків

промислових підприємств, гаражів, господарських і сільськогосподарських, складських, а також визначені протипожежні відстані від будинків до лісових ділянок, до відкритого залягання торфу, до трамвайних, тролейбусних, автобусних парків, депо метрополітену, до складів зберігання нафти і нафтопродуктів, до споруд автозаправних станцій, до розподільчих пристроїв трансформаторних пунктів, до складів відкритого зберігання сільськогосподарської продукції, до газгольдерів горючих газів, до контактних проводів трамвайних і тролейбусних ліній.

Приклад встановлення нормованого значення протипожежних відстаней згідно із [12] наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будинків і споруд

| Ступінь вогнестійкості | Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м |       |                        |
|------------------------|-------------------------------------------------|-------|------------------------|
|                        | I, II                                           | III   | IIIa, IIIб, IV, IVa, V |
| I, II                  | 6/9                                             | 8/9   | 10/12                  |
| III                    | 8/9                                             | 8/12  | 10/15                  |
| IIIa, IIIб, IV, IVa, V | 10/12                                           | 10/15 | 15/18                  |

В документі визначені критерії, які додатково впливають на значення протипожежних відстаней, а саме, які можуть збільшувати їх значення або зменшувати в порівнянні із значеннями встановленими в таблицях. Так критеріями, які збільшують значення протипожежних відстаней є: вибухопожежна (А, Б) та пожежна (В) категорія будинків і споруд, райони із сейсмічністю 9 балів, двоповерхові будинки V ступеня вогнестійкості, наявність даху виконаного із горючих матеріалів. Критеріями, які зменшують значення протипожежних відстаней є: відсутність прорізів у зовнішніх протилежних стінах будинків, наявність протилежної протипожежної зовнішньої стіни в одному із будинків, улаштування в будинках автоматичної

системи пожежогасіння, обмеження кількості пожежної навантаги для виробничих будинків категорії В за пожежною безпекою, що не повинно перевищувати  $10 \text{ кг/м}^2$ .

Також визначені випадки, в яких протипожежні відстані не нормуються, а саме:

- між житловими і господарськими будинками у межах однієї присадибної ділянки;

- між житловими, громадськими, а також житловими і громадськими будинками (крім індивідуальних житлових будинків) при сумарній площі забудови, включаючи незабудовану площу між ними, яка дорівнює найбільшій допустимій площі протипожежного відсіку в межах поверху, для будинку що має найменший ступінь вогнестійкості. При однаковому ступеню вогнестійкості житлового та громадського будинків сумарна площа забудови, включаючи незабудовану площу між ними, приймається як для житлових будинків;

- між виробничими будинками та спорудами:

- а) якщо загальна площа будинків і споруд III, IIIб, IV, IVa та V ступенів вогнестійкості (в межах одного поверху) не перевищує нормованої площі поверху в межах протипожежного відсіку одного будинку. Нормована площа протипожежного відсіку приймається по найбільш пожежонебезпечному виробництву та найменшому ступеню вогнестійкості будинку та споруди;

- б) якщо стіна більш високого або широкого будинку (споруди), що знаходиться зі сторони іншого будинку є протипожежною 1 типу;

- в) якщо будинки та споруди III, IIIб, IV, IVa та V ступеня вогнестійкості, незалежно від пожежної небезпеки розміщених у них виробництв, мають між собою протилежні стіни без отворів або стіни з отворами (за винятком ненесучих стін) заповненими вікнами, дверима, клапанами з класом вогнестійкості не менше EI 45;

- між господарськими будинками (сараями, банями), розміщеними за територією присадибних ділянок, за умови, якщо площа забудови зблокованих господарських будинків не перевищує 800 м<sup>2</sup>.

В документі [13] встановлені вимоги до протипожежних відстаней під час планування території складів лісних матеріалів, а також від таких складів до суміжних будинків і споруд. Зокрема в цьому документі визначено, що відстань від огорожі складу лісоматеріалів до штабелів та куп лісоматеріалу повинна бути не менше їх розрахункової висоти, але не менше 15 м.

В цьому документі визначені вимоги до протипожежних відстаней між штабелями лісоматеріалів, групами штабелів та кварталами штабелів, відкритих складів лісоматеріалу, що також залежить від висоти штабеля, їх площі, а також типу лісоматеріалу (круглий, пиляний, балансовий, осмол, дрова, щепи, опилки, кора тощо). Протипожежні відстані до суміжних будинків та споруд залежать від ємності складу лісоматеріалів та типу лісоматеріалу. Також визначено вимоги до протипожежних відстаней між закритими складами лісоматеріалів та штабелями лісоматеріалів, що залежить від ступеня вогнестійкості споруди закритого складу лісоматеріалу.

В Україні також є ряд відомих нормативних документів [14, 15, 16], які встановлюють вимоги до протипожежних відстаней для відповідних об'єктів промисловості. Зокрема [14] встановлює вимоги до проектування складів нафти і нафтопродуктів. В цьому документі визначені вимоги до протипожежних відстаней від складів нафти та нафтопродуктів до суміжних будинків та споруд, до лісових масивів та ділянок відкритого залягання торфу, до зливо-наливних пристроїв залізничних та автомобільних цистерн, суден, причалів, до очисних каналізаційних споруд, що залежить від категорії складу нафти і нафтопродуктів. А також визначені протипожежні відстані між резервуарами нафти і нафтопродуктів в групі, від резервуарів до будинків та споруд на території складів нафти і нафтопродуктів, яка також залежить від категорії та під категорії складу нафти і нафтопродуктів, типу та ємності резервуарів.

В документі [15] визначені вимоги до протипожежних відстаней в електроустановках, зокрема відстані від кабельних та електропровідникових ліній до будинків та споруд тощо.

Нормовані значення протипожежних відстаней також можна зустріти в нормативних документах, що діють на етапі експлуатації будинків [16]. Зокрема в цьому документі встановлені вимоги до протипожежних відстаней між місцями для розведення багаття, використання відкритого вогню, проведення ремонтних вогневих робіт до будинків (споруд), лісових масивів, місць стоянки автомобілів. Також встановлені вимог до протипожежних відстаней між світильниками із лампами розжарювання до горючих матеріалів і речовин.

Із зарубіжного досвіду нормування та визначення мінімально необхідних протипожежних відстаней між будинками та спорудами варто відзначити роботу та документ [17] (Великобританія). Ці джерела включають методику розрахунку радіусу теплового впливу на суміжні споруди. Нормування протипожежних відстаней не залежить від функціонального призначення об'єктів, а залежить від маси пожежної навантаги, що зосереджена на таких об'єктах, висоти об'єкта, площі отворів у зовнішній стіні об'єкта [18]. Так об'єкти за масою пожежної навантаги поділені на дві категорії – до  $25 \text{ кг/м}^2$  та більше. Висота об'єкта встановлена в межах від 3 м до 27 м. При більшій висоті об'єкта, протипожежні відстані визначаються в кожному випадку індивідуально [19, 20]. Нормування протипожежних відстаней згідно з [12] наведено в таблиці 1.2.

## Нормування протипожежних відстаней згідно з [16]

| Ширина<br>зовнішньої<br>стіни | Відстань від відповідної границі для незахищеного відсотка не перевищує                                      |           |             |             |             |             |              |             |             |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|                               | 20%                                                                                                          | 30%       | 40%         | 50%         | 60%         | 70%         | 80%          | 90%         | 100%        |
|                               | Мінімальне гранична відстань в (м). Цифри в дужках використовуються для житлових, офісних та монтажних робіт |           |             |             |             |             |              |             |             |
| Зовнішня стіна висотою 21 м   |                                                                                                              |           |             |             |             |             |              |             |             |
| 3                             | 2.0(1.0)                                                                                                     | 3.0(15)   | 3.5 (2.0)   | 4.5 (2.5)   | 5.0 (3.0)   | 5.5 (3.0)   | 6.0 (3.5)    | 6.5 (4.0)   | 7.0 (4.5)   |
| 6                             | 3.5(1.5)                                                                                                     | 5.0(2.5)  | 6.0 (3.5)   | 7.0 (4.0)   | 8.0 (5.0)   | 9.0 (5.5)   | 9.5 (6.0)    | 10.0 (6.5)  | 10.5 (7.0)  |
| 9                             | 4.5(2.0)                                                                                                     | 6.5(3.5)  | 7.5 (4.5)   | 9.0 (5.5)   | 10.0 (6.5)  | 11.0 (7.0)  | 12.0 (7.5)   | 13.0 (8.5)  | 13.5 (9.0)  |
| 12                            | 5.5(2.5)                                                                                                     | 7.5(4.0)  | 9.0 (5.5)   | 10.5 (6.5)  | 12.0 (7.5)  | 13.0 (8.5)  | 14.0 (9.0)   | 15.0 (10.0) | 16.0 (10 5) |
| 15                            | 6.5(2.5)                                                                                                     | 8.5(5.0)  | 10.5 (6.5)  | 12.0 (7.5)  | 13.5 (8.5)  | 14.5 (9.5)  | 16.0 (10.5)  | 16.5 (11.0) | 17.5 (12.0) |
| 18                            | 7.0(3.0)                                                                                                     | 9.5(5.5)  | 11.5 (7.0)  | 13.0 (8.0)  | 14.5 (9.5)  | 16.0 (10.5) | 17.0 (11.5)  | 18.0 (12.5) | 19.5 (D O)  |
| 21                            | 7.5(3.0)                                                                                                     | 10.0(6.0) | 12.5 (7.5)  | 14.0 (9.0)  | 15.5 (10.0) | 17.0 (H O)  | 18.5 (12.5)  | 20.0 (13.5) | 21.0 (14.0) |
| 24                            | 8.0(3.5)                                                                                                     | 10.5(6.0) | 13.0 (8.0)  | 15.0 (9 5)  | 16.5 (10.5) | 18.0 (12.0) | 20.0 (13.0)  | 21.0 (14.0) | 22.0 (15.0) |
| 27                            | 8.5(3.5)                                                                                                     | 11.5(6.5) | 14.0 (8.5)  | 16.0 (10.0) | 18.0 (11.5) | 19.0 (13.0) | 21.0 (14 .0) | 22.5 (15.0) | 23.5 (16.0) |
| 30                            | 9.0(4 0)                                                                                                     | 12.0(7.0) | 14.5 (9.0)  | 16.5 (10.5) | 18.5 (12.0) | 20.5 (13.0) | 22.0 (14.5)  | 23.5 (16 0) | 25.0 (16.5) |
| 40                            | 10.0(4.5)                                                                                                    | 13.5(7.5) | 16.5 (10.0) | 19.0 (12.0) | 21.5 (13.5) | 23.0 (15.0) | 25.5 (16.5)  | 27.0 (IS O) | 28.5 (19.0) |
| 50                            | 11.0 (4.5)                                                                                                   | 14.5(8.0) | 18.0 (11.0) | 21.0 (13.0) | 23.5 (14.5) | 25.5 (16 5) | 28.0 (18.0)  | 30.0 (20.0) | 31.5 (21.0) |

## Продовження таблиці 1.2

| Ширина<br>зовнішньої<br>стіни | Відстань від відповідної границі для незахищеного відсотка не перевищує                                      |           |              |             |             |             |             |             |             |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                               | 20%                                                                                                          | 30%       | 40%          | 50%         | 60%         | 70%         | 80%         | 90%         | 100%        |
|                               | Мінімальне гранична відстань в (м). Цифри в дужках використовуються для житлових, офісних та монтажних робіт |           |              |             |             |             |             |             |             |
| Зовнішня стіна висотою 21 м   |                                                                                                              |           |              |             |             |             |             |             |             |
| 60                            | 11.5(4.5)                                                                                                    | 15.5(8.5) | 19.5 (11.5)  | 22.5 (13.5) | 25.5 (15.5) | 28.0 (17.5) | 30.5 (19.5) | 32.5 (21.0) | 33.5 (22.5) |
| 80                            | 12.0(4.5)                                                                                                    | 17.0(8.5) | 21.0 (12 .0) | 25.0 (14.5) | 28.5 (17.0) | 31.5 (19.0) | 34.0 (21.0) | 36.5 (23.5) | 38.5 (25.0) |
| 100                           | 12.0(4.5)                                                                                                    | 18.0(9.0) | 22.5 (12.0)  | 27.0 (15.5) | 31.0 (18.0) | 34.5 (20.5) | 37.0 (22.5) | 40.0 (25.0) | 42.0 (27.0) |
| 120                           | 12.0(4.5)                                                                                                    | 18.5(9.0) | 23.5 (12.0)  | 28.5 (16 0) | 32.5 (18.5) | 36.5 (21.5) | 39.5 (23.5) | 43.0 (26.5) | 45.5 (28.5) |
| Без<br>обмежень               | 12.0(4.5)                                                                                                    | 19.0(9.0) | 25.0 (12.0)  | 29.5 (16.0) | 34.5 (19.0) | 38.0 (22.0) | 41.5 (25.0) | 45.5 (26.5) | 48.0 (29.5) |

На рисунку 1.4 наведено приклад визначення протипожежної відстані у разі різної площі отворів у зовнішній стіні будинку, зокрема 100% засклення та 30 % засклення зовнішньої стіни згідно із [21, 22].



Рисунок 1.4 – Приклад визначення протипожежної відстані у разі різної площі отворів у зовнішній стіні будинку

В Республіці Польща, критеріями для встановлення протипожежних відстаней також є площа отворів у зовнішній стіні будинку, що виражається коефіцієнтом  $k$ , а також взаємне розміщення будинків один до одного [22, 23]. На рисунку 1.5 наведено приклад згідно з рекомендаціями [22], щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами.

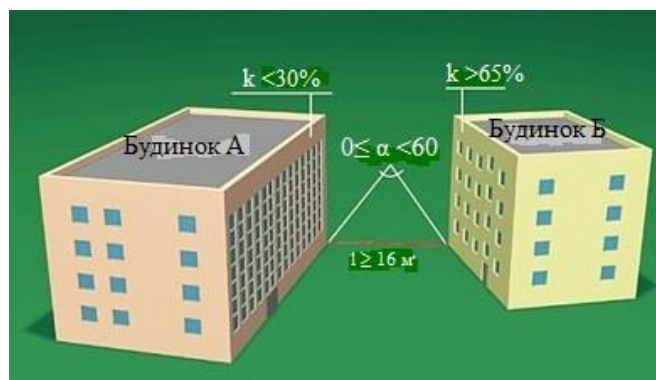


Рисунок 1.5 – Приклад визначення протипожежних відстаней згідно з рекомендаціями [22]:  $l$  - допустима відстань між зовнішніми стінами;  $k$  - коефіцієнт, який визначає, яка частина поверхні стіни відповідає вимогам вогнестійкості (E)

Особливим моментом є те, що під час визначення протипожежних відстаней враховується ступінь вогнестійкості будівлі та відповідно клас вогнестійкості зовнішніх стін та конструкцій, а пожежне навантаження в середині будинків є другорядним фактором. При цьому, головним чинником, який впливає на протипожежну відстань є співвідношення площі віконних прорізів у будинках до загальної площі зовнішніх стін [24, 25]. На рисунку 1.6 наведено принцип визначення протипожежних відстаней між будинками, якщо в будинку коефіцієнт застління фасаду  $k$  різний для однієї будівлі.

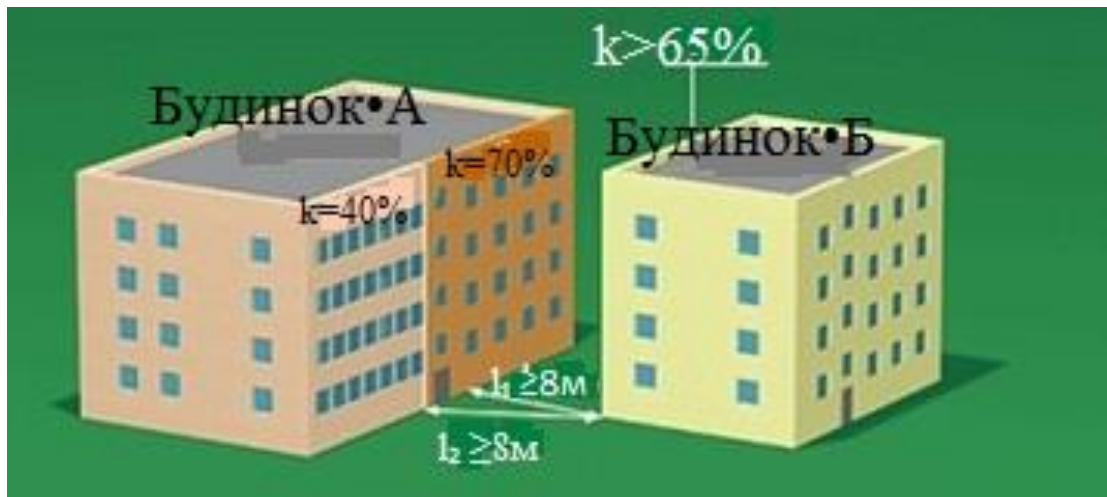


Рисунок 1.6 – Приклад визначення протипожежних відстаней, якщо коефіцієнт застління фасаду  $k$  різний для однієї будівлі :  $l$ - допустима відстань між зовнішніми стінами;  $k$ - коефіцієнт, який визначає, яка частина поверхні стіни відповідає вимогам вогнестійкості (E)

У 2018 році у Польщі введені додаткові критерії визначення значень протипожежних відстаней між будинками, що враховують пожежне навантаження та функціональне призначення будинків. В таблиці 1.3 наведено додаткові дані для визначення протипожежних відстаней між будинками [26].

Таблиця 1.3

Додаткові дані для визначення протипожежних відстаней між будинками в Республіці Польща

| Тип будівлі за<br>максимальною<br>щільністю<br>теплового потоку Q<br>[МДж/м <sup>2</sup> ] | Тип будівлі за максимальною щільністю теплового потоку Q [МДж/м <sup>2</sup> ] |    |           |                   |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|-----------|-------------------|-----------|
|                                                                                            | ZL                                                                             | IN | PM        |                   |           |
|                                                                                            |                                                                                |    | Q < 1.000 | 1.000 < Q < 4.000 | Q > 4.000 |
| ZL                                                                                         | 8                                                                              | 8  | 8         | 15                | 20        |
| IN                                                                                         | 8                                                                              | 8  | 8         | 15                | 20        |
| Q < 1.000                                                                                  | 8                                                                              | 8  | 8         | 15                | 20        |
| 1 000 < Q < 4.000                                                                          | 15                                                                             | 15 | 15        | 15                | 20        |
| Q > 4.000                                                                                  | 20                                                                             | 20 | 20        | 20                | 20        |

Документ Королівства Швеція [27] містить декілька методик розрахунку протипожежних відстаней із детальним обґрунтуванням коефіцієнтів, що впливають на значення протипожежних відстаней. Також зазначений документ містить додатки із прикладами розрахунків.

Нормативним документом, що регулює визначення протипожежної відстані в США є [28]. Цей документ встановлює методику визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. Спочатку визначається критерій пожежного навантаження, що має встановлену класифікацію, а саме: незначне, помірне та велике. В таблиці 1.4 наведено значення пожежного навантаження, яке встановлює клас будівлі за безпекою.

Таблиця 1.4

Класифікація будівлі за пожежним навантаженням

| Пожежне навантаження |      | Класифікація за ступенем |
|----------------------|------|--------------------------|
| кг/м <sup>2</sup>    | фут  |                          |
| 0-34                 | 0-7  | Незначне                 |
| 35-73                | 8-15 | Помірне                  |
| ≥74                  | ≥16  | Велике                   |

Після цього за документом [29] розраховується індекс поширення полум'я в середині будівлі, що залежить від горючості матеріалу, що обертається в будинку, а також типу систем протипожежного захисту, якими обладнано будинок, за результатом чого, якщо будинок набрав до 25 балів – його відносять до будинку невеликої небезпеки, якщо від 26 до 75 – середньої небезпеки, і якщо більше 76 балів то до будівлі значної небезпеки. Визначивши ці два класи (клас небезпеки та пожежного навантаження), обирається той що має більшу класифікацію небезпеки. Наступним кроком є визначення конструктивного коефіцієнту, що визначається шляхом ділення довжини будинку на його висоту або навпаки в залежності від того, який геометричний параметр має більше значення [30]. Також визначається відсоток світлових прорізів у зовнішній стіні, яка суміжна з сусідньою будівлею, що складає від 5% до 100%. Після цього визначається протипожежна відстань шляхом множення конструктивного коефіцієнту на коефіцієнт небезпеки та додається 1,5 м, як коефіцієнт запасу за таблицею 1.5.

## Визначення протипожежної відстані між будинками згідно з [12]

| Клас небезпеки              |         |        | Значення співвідношень ширина/висота або висота/ширина                                                                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Відсоток світлових прорізів |         |        | Довідковий коефіцієнт [помножити на менший розмір, додати 1,5 (5 футів), щоб отримати протипожежну відстань між будинками] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| невелика                    | середня | значна | 1.0                                                                                                                        | 1.3  | 1.6  | 2.0  | 2.5  | 3.2  | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 13   | 16   | 20   | 25   | 32   | 40   |
| 20                          | 10      | 5      | 0.36                                                                                                                       | 0.40 | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 0.49 | 0.50 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.51 |
| 30                          | 15      | 7.5    | 0.60                                                                                                                       | 0.66 | 0.73 | 0.79 | 0.84 | 0.88 | 0.90 | 0.92 | 0.93 | 0.94 | 0.94 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| 40                          | 20      | 10     | 0.76                                                                                                                       | 0.85 | 0.94 | 1.02 | 1.10 | 1.17 | 1.23 | 1.27 | 1.30 | 1.32 | 1.33 | 1.33 | 1.34 | 1.34 | 1.34 | 1.34 | 1.34 |
| 50                          | 25      | 12.5   | 0.90                                                                                                                       | 1.00 | 1.11 | 1.22 | 1.33 | 1.42 | 1.51 | 1.58 | 1.63 | 1.66 | 1.69 | 1.70 | 1.71 | 1.71 | 1.71 | 1.71 | 1.71 |
| 60                          | 30      | 15     | 1.02                                                                                                                       | 1.14 | 1.26 | 1.39 | 1.52 | 1.64 | 1.76 | 1.85 | 1.93 | 1.99 | 2.03 | 2.05 | 2.07 | 2.08 | 2.08 | 2.08 | 2.08 |
| 80                          | 40      | 20     | 1.22                                                                                                                       | 1.37 | 1.52 | 1.68 | 1.85 | 2.02 | 2.18 | 2.34 | 2.48 | 2.59 | 2.67 | 2.73 | 2.77 | 2.79 | 2.80 | 2.81 | 2.81 |
| 100                         | 50      | 25     | 1.39                                                                                                                       | 1.56 | 1.74 | 1.93 | 2.13 | 2.34 | 2.55 | 2.76 | 2.95 | 3.12 | 3.26 | 3.36 | 3.43 | 3.48 | 3.51 | 3.52 | 3.53 |
| —                           | 60      | 30     | 1.55                                                                                                                       | 1.73 | 1.94 | 2.15 | 2.38 | 2.63 | 2.88 | 3.13 | 3.37 | 3.60 | 3.79 | 3.95 | 4.07 | 4.15 | 4.20 | 4.22 | 4.24 |
| —                           | 80      | 40     | 1.82                                                                                                                       | 2.04 | 2.28 | 2.54 | 2.82 | 3.12 | 3.44 | 3.77 | 4.11 | 4.43 | 4.74 | 5.01 | 5.24 | 5.41 | 5.52 | 5.60 | 5.64 |

| Клас небезпеки              |         |        | Значення співвідношень ширина/висота або висота/ширина                                                                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |
|-----------------------------|---------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Відсоток світлових прорізів |         |        | Довідковий коефіцієнт [помножити на менший розмір, додати 1,5 (5 футів), щоб отримати протипожежну відстань між будниками] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |
| невелика                    | середня | значна | 1.0                                                                                                                        | 1.3  | 1.6  | 2.0  | 2.5  | 3.2  | 4    | 5    | 6    | 8    | 10   | 13   | 16    | 20    | 25    | 32    | 40   |
|                             |         |        |                                                                                                                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |
|                             |         |        |                                                                                                                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |      |
| —                           | 100     | 50     | 2.05                                                                                                                       | 230  | 2.57 | 2.87 | 320  | 3.55 | 3.93 | 433  | 4.74 | 5.16 | 5.56 | 595  | 6 29  | 656   | 6.77  | 692   | 7.01 |
| —                           | —       | 60     | 2 26                                                                                                                       | 2.54 | 284  | 3.17 | 3.54 | 3.93 | 436  | 4.82 | 5.30 | 580  | 6.30 | 678  | 7.23  | 7.63  | 7.94  | 8.18  | 8.34 |
| —                           | —       | 80     | 2.63                                                                                                                       | 2.95 | 3.31 | 3.70 | 4.13 | 4.61 | 5.12 | 5.68 | 628  | 6.91 | 7.57 | 8.24 | 8.89  | 9.51  | 10.05 | 10.50 | 10.8 |
| —                           | —       | 100    | 2.96                                                                                                                       | 3.32 | 3.72 | 4.16 | 4.65 | 5.19 | 5.78 | 6.43 | 7.13 | 7.88 | 8.67 | 950  | 10.33 | 11.15 | 11.91 | 12.59 | 13.1 |

У нормативних документах Російської Федерації [31] нормативне значення протипожежних відстаней визначається залежно від ступеня вогнестійкості будинків і класу конструктивної пожежної небезпеки будинків. У Республіки Білорусь нормативне значення протипожежних відстаней визначається залежно від ступеня вогнестійкості будинків та класу функціональної пожежної небезпеки будинків [32].

Із аналізу нормативних документів встановлено, що одним із критеріїв встановлення протипожежних відстаней є величина пожежної навантаги [33].

Таким чином можна зробити наступні висновки:

- критерії за якими визначаються протипожежні відстані в Україні та зарубіжних країнах відрізняються. Зокрема в Україні основними критеріями є функціональне призначення будинків та їх ступінь вогнестійкості. В зарубіжних країнах під час визначення протипожежних відстаней крім критерію функціональне призначення будинків, використовують критерії величина пожежного навантаження, площа прорізів у зовнішній стіні будинку, розташування будинків один по відношенню до одного тощо [34, 35];

- в зарубіжних країнах під час визначення протипожежних відстаней окрім табличних методів широкого застосування набули розрахункові методи, що дозволяють враховувати такі суттєві характеристики будинків та споруд, як величина пожежної навантаги, вид, кількість і пожежо-технічні характеристики горючих матеріалів і речовин, які в ньому обертаються, конструктивні характеристики будинку (наявність прорізів у зовнішніх будівельних конструкціях, через які можливе поширення вогню на інший будинок, взаємне розташування пожежної навантаги в просторі), оснащеність будинку автоматичними системами пожежогасіння, наявність між будинками перешкод для поширення пожежі, взаємне розташування будинків та споруд один відносно одного тощо [36]. При цьому, в проаналізованих документах відсутня інформація щодо методології та алгоритмів реалізації такого

підходу, відсутні альтернативи щодо використання спрощених та уточнених методів розрахунків [37];

- роботи [38 – 40] засвідчують, що табличні методи визначення протипожежних відстаней є простими у використанні, але мають великі коефіцієнти запасу, що в деяких випадках є економічно не обґрунтовано, тому рекомендують використовувати такі методи під час визначення протипожежних відстаней у виняткових випадках, коли це не має суттєвого впливу на економічну складову;

- із аналізу нормативних документів встановлено, що чинниками, які впливають на процеси теплопередачі від об'єкту, що горить до суміжного об'єкту є: величина та пожежо-технічні характеристики пожежної навантаги, площа проекції полум'я на вертикальну поверхню, наявність прорізів у зовнішніх конструкціях об'єктів та їх загальна площа, висота будинків, наявність систем пожежогасіння, забезпеченість території пожежними підрозділами.

### **1.3. Особливості експериментальних методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі**

Сутність експериментальних методів щодо визначення протипожежних відстаней полягає у моделюванні джерела теплового випромінювання [41] та створення дослідних зразків, які підпадають під дію теплового опромінювання та на яких безпосередньо здійснюється вимірювання значень температур або теплового потоку [42, 43]. Розглянемо приклад методу експериментальних досліджень протипожежних відстаней в лабораторних умовах згідно із [44 – 46].

Джерелом теплового потоку слугує панель, змонтована з пальників інфрачервоного випромінювання [47]. Схема дослідної установки зображена на рисунку 1.7. Середня температура панелі 1000 °С. Зразки, що опромінюються від панелі кріпляться на столі, що пересувається на роликах за допомогою лебідки. Тепловий потік на поверхні зразка, що опромінюється

від панелі змінюється шляхом змінення відстані від панелі до зразка і вимірюється актинометром.

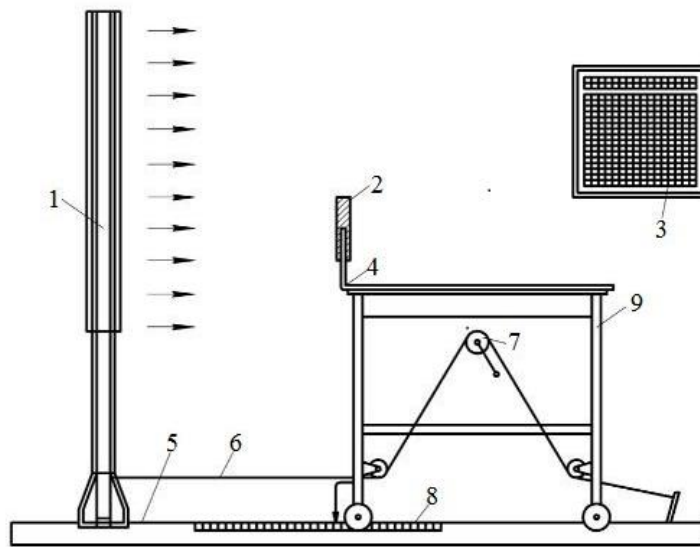


Рисунок 1.7 – Схема дослідної установки із визначення необхідної протипожежної відстані: 1 – випромінювач тепла, 2 – зразок, що випробовується, 3 – прилад для фіксації щільності теплового потоку, 4 – рама для кріплення зразка, 5 – направляючі для пересування стола, 6 – трос, 7 – барабан для намотування троса, 8 – шкала для визначення відстані від панелі до зразка, 9 – стіл, що пересувається

Товщина зразків приймається з умови, щоб температура на стороні, що не обігрівається не змінювалася в ході експерименту [48, 49]. Контроль за температурою на поверхні зразка що опромінюється та не опромінюється здійснюється термопарами, зблокованими з електронним потенціометром [50 – 52].

Суть дослідження полягає у тому, що стіл (9) із дослідним зразком (2) встановлюється на максимальній відстані відносно випромінювача тепла (1). Вмикається випромінювач тепла (1). За допомогою барабана (7) відстань між випромінювачем тепла (1) та дослідним зразком (2) зменшується до тих пір, поки:

- для органічних матеріалів – відстань при якій під час експерименту відбувалося займання дослідного зразка при короткочасному піднесенню до зразка стороннього джерела запалювання (газовий пальник) або до початку тління дослідного зразка. Початок тління дослідного зразка характеризується появою першої іскри на опромінюваній поверхні;

- для неорганічних матеріалів – відстань при якій під час експерименту дослідні зразки нагрівалися до температури самозаймання.

Недоліком запропонованого методу [51] є те, що на сьогодні відсутні настільки потужні випромінювачі тепла, що у змозі забезпечити адекватні значення теплового потоку, що має місце під час реальних пожеж [53, 54]. Такий метод може бути використаний під час визначення в лабораторних умовах критичного значення теплового потоку, при якому відбувається займання конкретного матеріалу.

У роботі [31] проведені натурні дослідження щодо визначення протипожежних відстаней між житловими будинками. Для чого змодельовані два житлових будинки. Будинки в планувальному та конструктивному виконанні типові, мають два поверхи з розмірами в плані  $9,5 \text{ м} \times 8,4 \text{ м} \times 7,8 \text{ м}$  (висота, довжина та ширина) із таким функціональним призначенням приміщень: вітальня, їдальня та кухню на першому поверсі та три спальні на другому поверсі. Конструктивні рішення будинків: бетонні конструкції стін та дерев'яні каркасні конструкції даху [55]. Поверхні внутрішніх стін і стелі будинків покриті гіпсокартоном. Фасади будинків, в тому числі суміжні сторони, мали три вікна розмірами  $1,4 \text{ м} \times 1,4 \text{ м}$  та дерев'яні двері розмірами  $1,6 \text{ м} \times 2,0 \text{ м}$  [56].

Пожежна навантага будинків представляла собою дерев'яні шафи, столи, стільці, кухонна мебелі та синтетичні ліжка та крісла з бавовняними подушками. Підлога та сходи покриті синтетичними килимами. На вікнах будинків влаштовані жалюзі [57].

Згідно з [58], середня швидкість виділення тепла на одиницю площі становить  $780 \text{ кВт/м}^2$  і враховуючи відсутність внутрішніх систем пожежогасіння будинки віднесені до середнього класу небезпеки [59].

За граничні умови прийнято:

- один будинок повністю охоплено вогнем, загальна потужність теплових викидів складала  $12,5 \text{ МВт}$  [60];
- двері та всі вікна будинку, що горить закриті;
- всі вікна прилеглого будинку, що опромінювався від будинку, що горить відкриті;
- в якості критерію визначення протипожежних відстаней прийнято визначення мінімальних умов, необхідних для запалення бавовняних штор на вікнах прилеглого будинку;
- в якості джерела пожежі, прийнято деко діаметром  $0,28 \text{ м}$  з рослинним маслом, яке встановлено на плиті для приготування їжі на кухні;
- середня маса пожежного навантаження в будинку, що горить прийнята як середньостатистична для житлових будинках і складала  $37 \text{ кг/м}^2$ .

На рисунку 1.8 наведено фрагмент натурних вогневих досліджень з визначення протипожежної відстані.

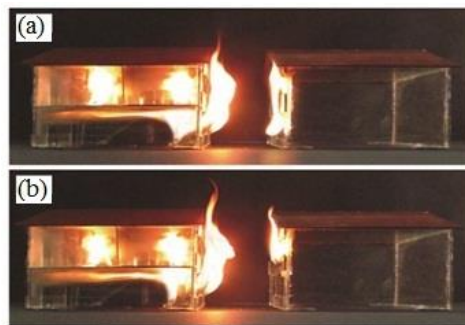


Рисунок 1.8 – Фрагмент натурних вогневих досліджень [25]

В результаті натурних досліджень визначено, що для прийнятих типів будинків мінімальною протипожежною відстанню є значення  $4,5 \text{ м}$ . На рисунку 1.9 наведено діаграму теплових впливів на поверхню сусідньої

будівлі для відстаней 3,5 м, 4,0 м та 4,5 м, що отримані під час натурних вогневих досліджень [61].

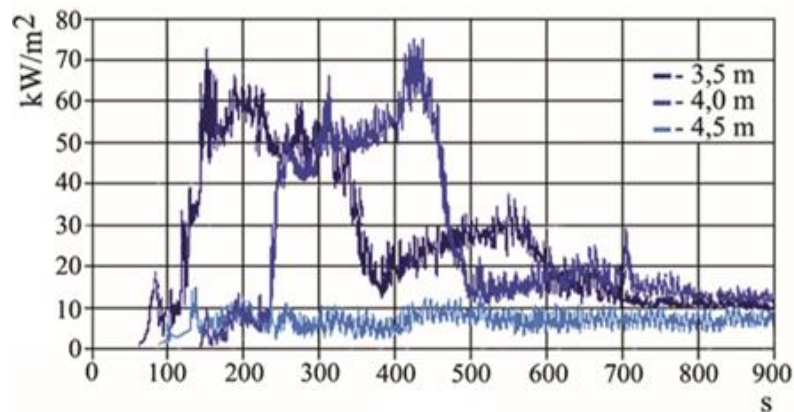


Рисунок 1.9 – Діаграма теплових впливів за результатом проведеного експерименту

Автори дослідження [62 – 64] під час обґрунтування методики та коефіцієнтів визначення протипожежних відстаней за нормами [22] відзначають, що дані дослідження проведено за ідеальних умов (відсутності вітру, нормальної вологості повітря та тиску). Тому автори пропонують додатково під час визначення протипожежних відстаней вводити коефіцієнт сторонніх впливів та коефіцієнт запасу в 1,5 м до будь-якого отриманого значення.

Слід зазначити, що в роботах [63] і [64] не обґрунтовано прийнято не змінне значення коефіцієнту сторонніх впливів та запасу «1,5». Оскільки, він враховує змінні початкові умови, тому залежно від значень таких умов теж повинен бути змінною величиною.

Дані щодо експериментальних досліджень теплового потоку [65, 66] в літературних джерелах з точки зору визначення протипожежних відстаней зустрічаються рідко. Частіше критерій теплового потоку використовують під час дослідження ефективності використання водяних завіс [67] для захисту об'єктів від теплового опромінювання так у роботі [68] експериментальним шляхом визначалося значення коефіцієнта екранування водяними завісами,

що створювалися за допомогою насадок РВ-12 та НРТ-5. Схема експериментальної установки приведена на рисунку 1.10.

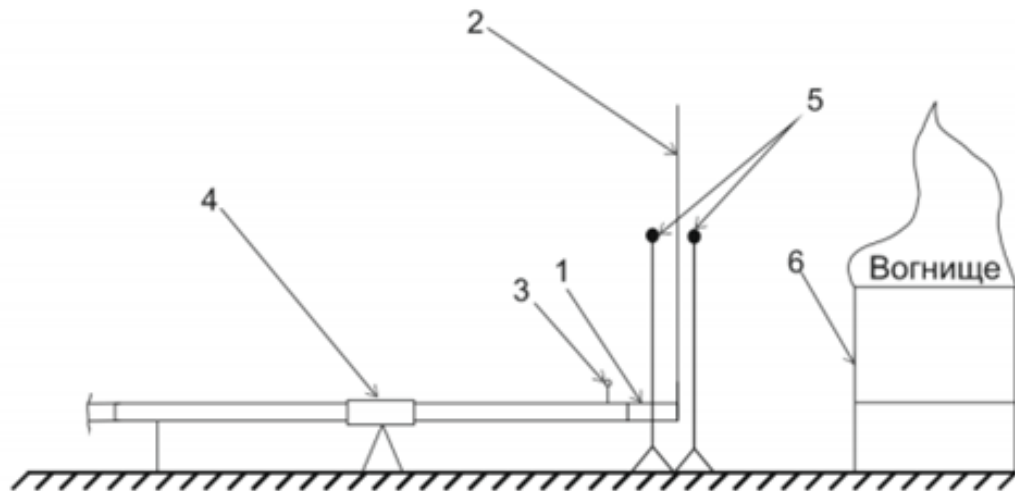


Рисунок 1.10 – Схема експериментальної установки [37], 1 – ствол, 2 – водяна завіса, 3 – манометр, 4 – водомір, 5 – точки вимірювання теплового випромінювання, 6 - дека

Зазначені дослідження дають змогу зробити висновки щодо можливості виконання роботи пожежними в умовах високої інтенсивності теплового випромінювання, рівня зниження щільності теплового випромінювання за допомогою використання інженерних систем водяного пожежогасіння (водяні завіси), визначати необхідний тиск на насосі пожежного ствола та необхідну витрату води, яка забезпечує потрібні характеристики водяної завіси для захисту пожежного від теплового випромінювання, досліджувати залежності коефіцієнту екранування теплового потоку від технічних характеристик систем водяного пожежогасіння [69].

Такі дослідження не можливо використовувати під час визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами. Але вони можуть бути застосовні під час дослідження впливу наявності автоматичних систем пожежогасіння на величини протипожежних відстаней як додаткового коефіцієнту [70, 71].

У роботі [72] представлений комплекс методів дослідження характеристик теплопереносу, зокрема термопарний спосіб, конвективний теплообмін, радіаційний теплообмін, метод термографії.

В даній роботі зазначається, що у процесах теплообміну важливим фактором є розподіл температур в просторі і часі. Вимірювання температур досліджуваних об'єктів є невід'ємною складовою дослідного процесу і часто представляє самостійне непросте завдання [73, 74].

В даний час існує багато способів визначення температури [75]. Їх можна розбити на дві великі групи: контактні і безконтактні методи. Зазначені групи способів визначення температури мають як свої переваги так і недоліки, і свою область застосування [76, 77]. До контактних методів належать різні термометричні методи і, в тому числі термопарний, до неконтактних, в основному методи по визначенню характеристик випромінювання, наприклад, термографія [78].

Найбільш широке поширення в науці і техніці отримав саме термопарний спосіб через відносну простоту реалізації, широкої області вимірюваних температур і невеликих розмірів датчиків (і внаслідок цього мало спотворює процеси теплопередачі) [79 – 81].

Суть термопарного способу полягає в тому, що якщо в замкнутому ланцюзі, складеного з різнорідних металевих провідників, місця з'єднань мають різну температуру, то в ланцюга виникає електрорушійна сила (термо) і з'являється струм, який залежить від величини цієї електрорушійної сили і опору кола [82, 83].

У загальному випадку електрорушійна сила зростає зі збільшенням різниці температур з'єднань (спаїв) [84 – 85]. Цей факт і ліг в основу термопарного методу вимірювання температури. За величиною електрорушійної сили визначається температура одного з спаїв, знаючи температуру другого спаю можна вичислити вимірювану температуру.

Із даної роботи з точки зору дослідження протипожежних відстаней інтерес представляє опис методу щодо експериментального визначення

коефіцієнта випромінювання твердих тіл і їх температури із використанням методів термографії. Суть методу зводиться до експериментального визначення випромінювання дослідного зразка та абсолютно чорного тіла для певної довжини хвилі. Коефіцієнт випромінювання визначається як відношення величини випромінювання тіла, що досліджується до величини випромінювання абсолютно чорного тіла [86, 87]. Схема експериментальної установки зображена на рисунку 1.11.

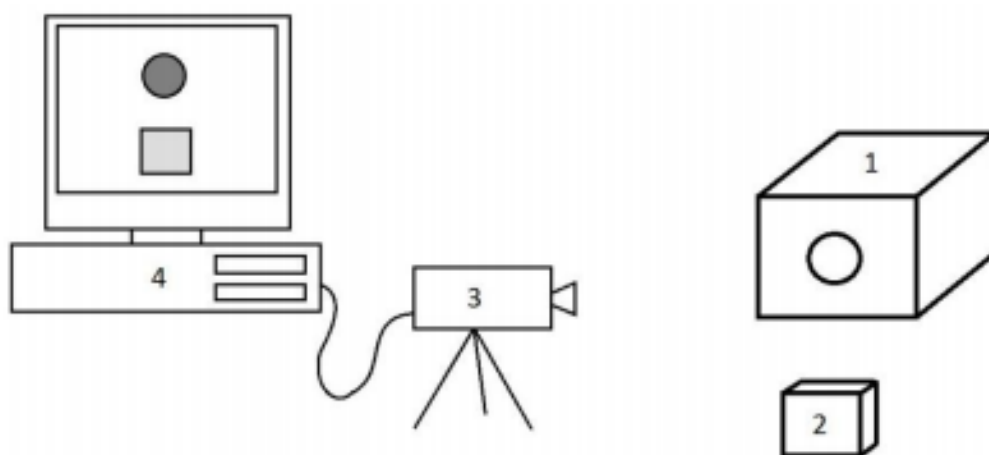


Рисунок 1.11 – Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнта випромінювання твердих тіл: 1 – абсолютно чорне тіло, 2 – дослідний зразок, 3 – інфрачервона камера, 4 – система візуалізації

В процесі експерименту досліджують величина випромінювання дослідного зразка та величина випромінювання абсолютно чорного тіла. Такі дослідження більше підходять та потрібні для визначення відповідних характеристик речовин та матеріалів, в даному випадку ступеня чорноти тіла або коефіцієнта випромінювання для конкретного матеріалу [88]. При цьому відповіді щодо необхідного значення протипожежної відстані між двома суміжними об'єктами зазначений вище метод не надасть.

У роботі [89] з метою визначення адекватності розрахункових методів густини теплового потоку за методами [90, 91] проведені експериментальні

дослідження із визначення густини теплового потоку від штабеля деревини геометричними розмірами 4 м х 3 м х 3 м.

Суть методу полягала у наступному:

- штабель формувався із сухих соснових дощок складених одна на одну до формування штабеля відповідних геометричних розмірів;
- після запалювання штабеля та досягнення щільності теплового потоку, на відстані п'ять метрів від штабеля –  $20 \text{ кВт/м}^2$  здійснювалось визначення густини теплового потоку через кожні 30 секунд;
- визначення щільності теплового потоку проводилося за допомогою приладу ВТП-01 з максимальною похибкою вимірювання 2%.

У роботі [92] наведено опис експериментальних методів визначення температур під час горіння біопалива. Схема експериментальної установки зображена на рисунку 1.12.

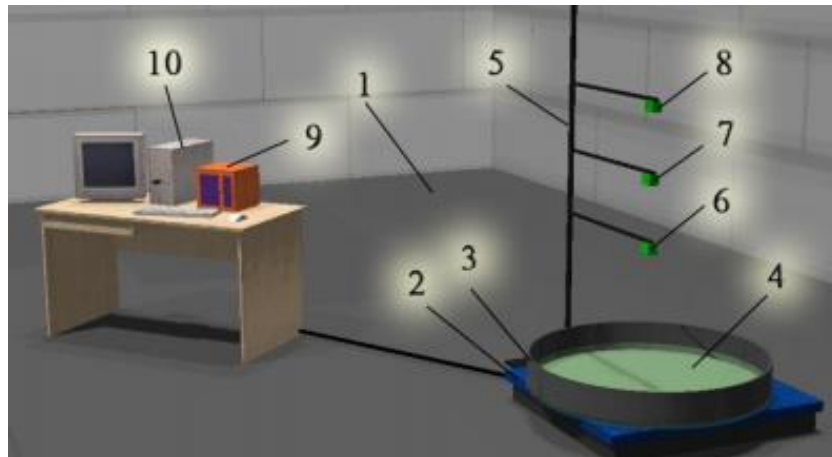


Рисунок 1.12 – Схема експериментальної установки для визначення температур [92]: 1 – випробувальний бокс; 2 – ваги; 3 – металеве деко; 4 – випробувальна рідина; 5 – штатив; 6 – термопара Т1; 7 – термопара Т2; 8 – термопара Т3; 9 – інформаційно-вимірювальна система; 10 – персональний комп'ютер

Згідно із наведеною методикою під час проведення експериментальних досліджень в якості джерела теплового випромінювання використовувалось металеве деко модельного вогнища 34В (площа поверхні горіння  $1,07 \text{ м}^2$ ), яке розміщувалося на вагах, встановлених у випробувальному боксі на рівній твердій поверхні. Для визначення температури полум'я використовувалась вимірювальна система на базі модуля типу ADAM [93, 94] та три термопари типу ТХА (Т1, Т2, Т3), встановлених за допомогою штативів уздовж вертикальної осі дека. Місця встановлення термопар враховували можливу максимальну висоту полум'я. Дискретність опитування термопар, за допомогою яких визначалась температура полум'я, становила 1 вимірювання за секунду. За температуру полум'я приймали найбільше значення температури, виміряної однією з трьох термопар продовж горіння зразка.

Зазначена робота може використовуватися під час дослідження пожежно-технічних характеристик нових речовин і матеріалів для створення довідникових даних [95].

У роботі [96] проведені експериментальні дослідження щодо виявлення особливостей процесу горіння модельних вогнищ класу А, конструкції яких передбачені такими нормативними документами [97] та [98]. Для проведення експериментальних досліджень використано обладнання, подібне до того, що застосовувалось у роботі [99]. Зовнішній вигляд експериментальної установки наведено на рисунку 1.13.

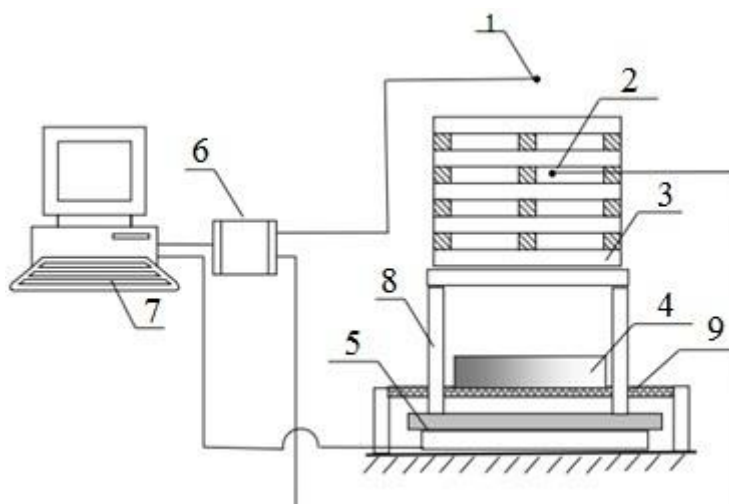


Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд експериментальної установки [96, 99]: 1, 2 – термопари, 3 – модельне вогнище пожежі класу А, 4 – модельне вогнище пожежі класу В для розпалу, 5 – вагова платформа, 6 – аналогово-цифровий перетворювач, 7 – персональний комп’ютер, 8, 9 - підставки

До складу установки входять термопари (1, 2) призначені для вимірювання температури над модельним вогнищем (3) та всередині нього. Модельне вогнища розташовувалось на підставці (8), яка спиралась на вагову платформу (5). Деко модельного вогнища класу В (4), призначеного для розпалу основного модельного вогнища класу А. Основне модельне вогнище розташовується на підставці (9), яке механічно зв’язано з ваговою платформою.

Для вимірювань при проведенні експериментальних досліджень використано вимірювальний комплекс на базі модуля ADAM-4118 (6) виробництва фірми Advantech, який було розроблено в рамках виконання роботи [100, 101]. Для контролю маси модельного вогнища використовувалась ваговимірювальна платформа моделі «Ладога-У» виконання СВП-300-7 (похибка вимірювань не перевищувала  $\pm 0,2$  кг). Дискретність опитування термопар становила 1 вимірювання за секунду, ваговимірювальної платформи – до 10 вимірювань за секунду. На персональний комп’ютер встановлено програмне забезпечення «Измерительный комплекс», яке також розроблено під час виконання роботи

[101]. Після закінчення процесу реєстрації результатів вимірювань зареєстровані дані зберігались у файл формату .CSV [102 – 104] , що являє собою текстовий файл, сумісний із табличним процесором Microsoft Excel 2003. Це дозволяло проводити оброблення масивів експериментальних даних без виконання додаткових перетворень форматів даних.

Таким чином можна констатувати, що застосування експериментальних методів під час визначення протипожежних відстаней передбачає необхідність створення аналогічного макету (моделі) будинків та споруд, взаємного розташування їх в просторі один відносно одного та проведення натурного або лабораторного експерименту. За цим методом існує можливість досягнення необхідного рівня безпеки із урахуванням усіх суттєвих характеристик об'єкта будівництва [105 – 107].

Перевагами цього методу є добра наочність отриманих результатів та їх точність. У якості недоліку слід вказати значний обсяг матеріальних та трудових затрат на його реалізацію та достатньо велику тривалість при підготовці, проведенні експерименту та прикінцевої обробки отриманих дослідних даних [108 – 110]. Зазначений недолік суттєво впливає на популярність у застосуванні експериментального методу під час дослідження протипожежних відстаней оскільки в існуючій літературі таких даних досить обмаль [111].

#### **1.4. Особливості теоретичних методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі**

В основу методу обґрунтування величин протипожежної відстані між будівлями і спорудами покладено класичну теорію теплообміну випромінюванням [112 – 114]. Сутність завдання зводиться до співставлення реальної (падаючої) щільності теплового потоку для опромінення об'єкта  $q_{\text{пад}}$  з максимально допустимою  $q_{\text{доп}}$ . Під максимально допустимим значенням теплового потоку розуміють  $q_{\text{доп}}$  кількість променевої енергії, при перевищенні якої займання горючих матеріалів стає

можливим. Умова безпеки в даному випадку виконується, якщо [112]:

$$q_{\text{пад}} \leq q_{\text{доп}} \quad (1.1)$$

Теоретичне визначення величини  $q_{\text{пад}}$  зводиться до визначення щільності теплового потоку на поверхні діатермічного елемента  $F_2$  при випромінюючій поверхні  $F_1$ . Схема теплообміну показана на рисунку 1.14. Розіб'ємо поверхню, що випромінює  $F_1$  на нескінченну множину елементарних поверхонь  $dF_1$ , так що [112]:

$$F_1 = \sum_0^\infty dF_1 \quad (1.2)$$

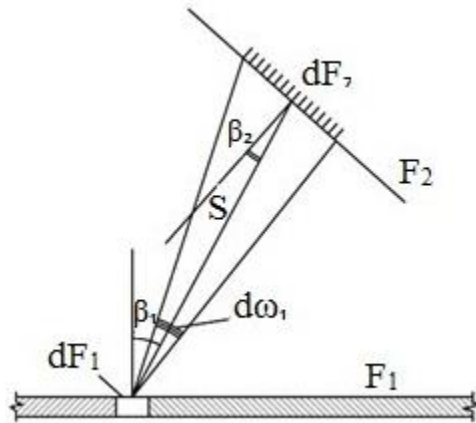


Рисунок 1.14 – Схема теплообміну між поверхнями  $F_2$  та  $F_1$

Енергія  $Q_{1-2}$ , випромінювання за одиницю часу поверхнею  $dF_1$  в межах просторового кута  $d\omega_1$ , визначається по рівнянню [112]:

$$d^2 Q_{1-2} = q_n \cos \beta_1 d\omega_1 dF_1 \quad (1.3)$$

Інтенсивність випромінювання сірого тіла в нормальному до поверхні випромінювання напрямку  $q_n$  (Вт/м<sup>2</sup>) виражається рівнянням [112]:

$$\varepsilon \sigma_0 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 = q_u \quad (1.4)$$

де  $\varepsilon$  - ступінь чорноти поверхні, що випромінює;

$\sigma_0$  - константа випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);

$T_1$  - температура випромінюючої поверхні, К;

$q_{\text{и}}$  - інтегральний (середньоповерхнева) щільність теплового потоку.

З урахуванням схеми на рисунку 1.13 просторовий кут визначається за рівнянням [112]:

$$d\omega_1 = \frac{dF_2 \cos\beta_2}{S^2} \quad (1.5)$$

де  $S$  - відстань між центрами елементарних майданчиків  $dF_1$  і  $dF_2$ .

Підставивши в рівняння (1.3) значення  $q_{\text{и}}$  й  $d\omega_1$ , отримаємо [112]:

$$d^2Q_{1-2} = \frac{\varepsilon\sigma_0}{\pi} \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{S^2} dF_1 dF_2 \quad (1.6)$$

З урахуванням рівнянь (1.4) рівняння (1.6) перетворюється [112]:

$$d^2Q_{1-2} = q_{\text{и}} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{S^2} dF_1 dF_2 \quad (1.7)$$

Розділивши обидві частини рівняння (1.7) на  $dF_2$ , отримаємо [112]:

$$\frac{d^2Q_{1-2}}{dF_2} = q_{\text{и}} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi S^2} dF_1 \quad (1.8)$$

$$\text{або} \quad dq_{\text{над}} = q_{\text{и}} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi S^2} dF_1 \quad (1.9)$$

Проінтегрувавши рівняння (1.9) по площі  $F_1$  отримаємо шукану величину щільності теплового потоку на поверхні  $dF_2$  [112]:

$$q_{\text{над}} = q_{\text{и}} \int_{F_1} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi S^2} dF_1 \quad (1.10)$$

Частина рівняння  $\int_{F_1} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi S^2} dF_1$ , являє собою коефіцієнт опромінення поверхнею  $F_1$  елементарного майданчика на поверхні  $F_2$  [112]:

$$\int_{F_1} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi S^2} dF_1 = \varphi \quad (1.11)$$

Таким чином, щільність падаючого на опромінюваний об'єкт теплового потоку визначається, як добуток інтегральної щільності випромінювання на коефіцієнт опромінення [112]:

$$q_{пад} = q_u \varphi \quad (1.12)$$

З урахуванням умови безпеки (1.1) маємо [112]:

$$q_u \varphi \leq q_{доп} \quad (1.13)$$

Шукана величина протипожежної відстані входить в коефіцієнт опромінення  $\varphi$ . Вона буде задовольняти вимогам пожежної безпеки й економіки при дотриманні рівності [112]:

$$q_{доп} = q_u \varphi \quad (1.14)$$

Коефіцієнт опромінення є геометричним параметром і залежить від форми, розмірів об'єктів та їх взаємного розміщення. Під час розрахунків розміри об'єктів і форму полум'я приймають у вигляді правильних геометричних фігур, що близькі до розмірів об'єкта та форм полум'я. Із рівнянь 1.5 та 1.11 випливає, що коефіцієнт опромінені є функцією просторового кута рівняння 1.15. Отже, будь які дві випромінюючі поверхні, що мають різну форму, але вписуються в один і той же просторовий кут, мають однакові значення коефіцієнта опромінення [115]. Ця властивість дозволяє приводити реальну форму полум'я до плоскої фігури проекції полум'я на вертикальну площину, перпендикулярну напрямку випромінювання, що значно спрощує обчислення коефіцієнта опромінення [115]:

$$\varphi = \frac{1}{\pi} \int_{F_1} d\omega_2 \cos\beta_2 \quad (1.15)$$

Якщо опромінювання здійснюється через віконні прорізи будинків, то коефіцієнт опромінення визначається як добуток коефіцієнта опромінення для форми полум'я та коефіцієнта опромінення для форми віконного прорізу,

Також величини  $q_{nad}$  можна визначити використовуючи закон Стефана Больцмана рівняння 1.16 [115]:

$$q_{nad} = C_{np} \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1-\phi} \quad (1.16)$$

де  $C_{np}$  - наведений коефіцієнт випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup>·К) або ккал/(м<sup>2</sup>·год·°С);

$T_{\phi}$  - температура факела полум'я, К;

$T_1$  - температура, максимально допустима для суміжного об'єкта, К;

$\varphi_{1-\phi}$  - кутовий коефіцієнт, що залежить від розмірів факела полум'я і напрямку випромінювання.

Перетворимо рівняння 1.16 для випадку, коли факел полум'я, що випромінює тепло є прямокутної форми і отримаємо [115]:

$$q_{nad} = C_{np} \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \frac{\varphi_1 - \varphi_2 F_{\phi}}{\pi r^2} \quad (1.17)$$

де  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - коефіцієнти, які враховують відповідно довжину і висоту факела полум'я;

$r$  - мінімальна відстань між об'єктом, що випромінює тепло, і об'єктом, що опромінюється, м;

$F_{\phi}$  - площа полум'я, м<sup>2</sup>.

Розв'язавши рівняння 1.16 та 1.17 відносно  $r$ , отримаємо [115]:

$$r = \sqrt{\frac{C_{np} \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_1 \varphi_2}{\pi q_{\min}}} \quad (1.18)$$

Таким чином, для реалізації зазначеної теорії під час визначення величини протипожежної відстані між будівлями і спорудами необхідно мати дані про допустимі інтенсивності опромінення для об'єктів різного призначення або конкретних матеріалів, що використовуються на таких об'єктах, а також інтенсивності випромінювання полум'я під час горіння матеріалів в певних умовах, а також за розмірами і формою поверхонь випромінювання, що впливає на коефіцієнт опромінення [116 – 118]. Слід відмітити, що такі дані в літературі є обмежені, а їх експериментальне визначення досить працевитратним, що робить обмеженим у використанні зазначений метод [119 – 121]. Таким чином підхід, що ґрунтується на використанні критерію теплового потоку має недолік, оскільки на сьогоднішній день відсутня статистична база критичних значень по тепловому потоку для різних речовин і матеріалів. Крім того, тепловий потік не є прямою величиною, яка може бути асоційована із причинами поширення та охоплення пожежею суміжних будівель. Зазначене обмежує можливості використання зазначеного критерію, тому для оцінювання протипожежних відстаней більш доцільно використовувати критерій, який забезпечує умову прямої фіксації можливості утворення пожежі на суміжному будинку, враховуючи природу матеріалів, що в ньому використовуються, а саме температурний критерій.

Визначення протипожежних відстаней також на сьогодні реалізують за допомогою теорії теплопередачі [122 – 124]. На даний час відомий значний обсяг досліджень присвячених процесам теплопередачі. Так, дослідженнями процесами теплопередачі здійснювалися Шкловером А.М. [125], розроблення математичних моделей теплового балансу будівель відображено в працях Табунщикова Ю.А. [126]. Побудова математичних моделей нестационарного

теплогового режиму споруд викладена в працях Нагорної А.Н. [127]. Явище променистого теплообміну має бути враховане під час обґрунтування протипожежних відстаней між будинками, як показано в працях [128, 129].

Закони теплопередачі набули широкого розповсюдження під час вивчення та наукового обґрунтування вимог щодо класу вогнестійкості будівельних конструкцій [131 – 132], дослідженні їх поведінки в умовах пожежі, але не використовувалися під час дослідження протипожежних відстаней та теплопередачі між суміжними будинками, у випадку коли один із будинків горить.

До основних способів теплопередачі відносяться: конвекція, теплопровідність, теплове випромінювання [133 – 135].

Фізичну суть процесу теплопередачі доцільно показати на прикладі одношарової плоскої стіни, рисунок 1.15.

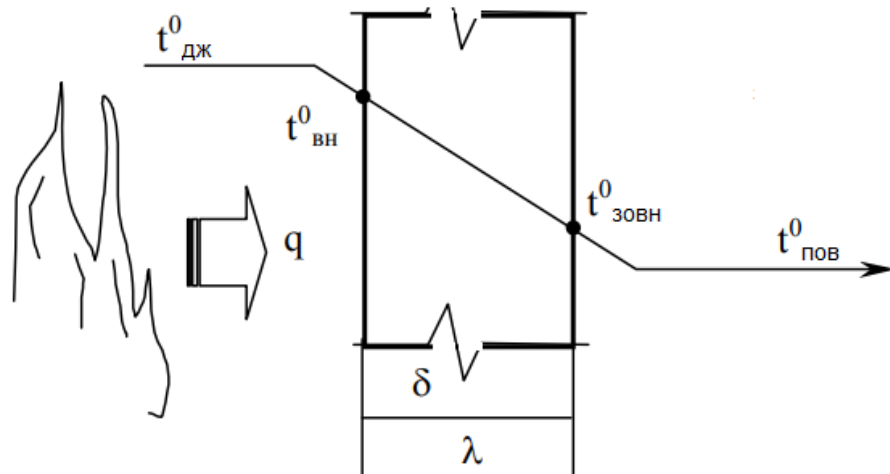


Рисунок 1.15 – Теплопердача через одношарову плоску стіну ( $q$  – тепловий потік,  $\delta$  – відстань між внутрішньою та зовнішньою частинами стіни,  $\lambda$  – теплопровідність стіни,  $t^0_{дж}$  – температура джерела тепла,  $t^0_{вн}$  – температура внутрішньої частини стіни,  $t^0_{зовн}$  – температура зовнішньої частини стіни,  $t^0_{пов}$  – температура повітря, що нагріте від стіни)

З рисунку 1.15 видно, що тепло сприймається поверхнею стіни, яка піддана прямому тепловому впливу від джерела тепла. Кількість цього тепла визначається за законом Ньютона [133]:

$$Q = \alpha_b \tau (t_{дж}^0 - t_{вн}^0) \quad (1.19)$$

де  $\alpha_b$  - кількість тепла, що сприймає тіло з 1 м<sup>2</sup> поверхні за одиницю часу при одиничному температурному впливу;

$\tau$  - час.

Тепло передається через стіну шляхом теплопровідності за законом Фур'є [133]:

$$Q = \frac{\lambda F \tau (t_{вн}^0 - t_{зовн}^0)}{\delta} \quad (1.20)$$

де  $F$  – площа перерізу стіни.

Тепло віддається поверхнею, що протилежна джерелу теплової дії у навколишнє середовище визначається за законом Ньютона [133]:

$$Q = \alpha_{от} F Q (t_{зовн}^0 - t_{нов}^0) \quad (1.21)$$

де  $\alpha_{от}$  - кількість тепла, що віддає тіло з 1 м<sup>2</sup> поверхні за одиницю часу при одиничному температурному впливу.

Зазначена схема передачі тепла на рисунку 1.15 відображає найпростіший спосіб його передачі [136 – 138]. Однак, питання дослідження протипожежних відстаней вимагає більш точнішого та якіснішого представлення процесу передачі тепла з врахуванням всіх можливих особливостей процесу теплопередачі від одного будинку, що горить до суміжного будинку в тому числі способів розміщення таких будинків один відносно одного [139 – 141].

Серед існуючих стандартизованих теоретичних методів проведення розрахунків теплових впливів в тому числі під час можливого поширення

пожежі від одного будинку на інший є метод відображений в [142], тому на ньому слід зупинитися більш детально.

Теплові впливи для зовнішніх конструкцій в наслідок горіння суміжного будинку в основному реалізуються за проведення спрощеного методу розрахунку. Даний метод дозволяє визначити:

- розміри й температуру полум'я із прорізів;
- параметри випромінювання й конвекції.

Метод розглядає умови, що встановилися для різних параметрів і застосовується тільки для пожежного навантаження  $q_{f,d} > 200 \text{ МДж} \cdot \text{м}^2$ .

Якщо в протипожежному відсіку, що розглядається більше одного вікна, то використовуються такі вихідні дані: висота вікон  $h_{eq}$ , сумарна площа вертикальних прорізів  $A_v$  і сумарна ширина вікон на всіх стінах ( $w_t = \sum w_i$ ).

Якщо тільки одна стіна має вікна, то відношення  $D/W$  визначається по формулі [142]:

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \quad (1.22)$$

де  $W_2$  – ширина стіни, що перпендикулярна до стіни із віконними прорізами.

Якщо кілька стін мають вікна, то відношення  $D/W$  визначається по формулі [142]:

$$D/W = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{A_{v1}}{A_v}, \quad (1.23)$$

де  $W_1$  - ширина стіни з максимальною площею вікон;

$A_{v1}$  - сума площ вікон стіни максимальною площею вікон.

Якщо зона горіння розташована безпосередньо в протипожежному відсіку, то відношення  $D/W$  під час дотримання певних меж визначається за формулою [142]:

$$D/W = \frac{(W_2 - L_c)}{(W_1 - W_c)} \cdot \frac{A_{v1}}{A_v}, \quad (1.24)$$

де  $L_c$ ,  $W_c$  - довжина й ширина осередку горіння відповідно;

Площа зовнішніх стін, які не мають необхідного класу вогнестійкості, враховується під час визначення площі віконних прорізів.

Якщо на протилежних боках протипожежного відсіку є вікна або повітря додатково надходить до осередку пожежі від інших прорізів (систем), то розрахунки проводяться із урахуванням примусової вентиляції.

Розрахунки проводяться для двох випадків виходу полум'я із прорізів, рисунок 1.16: перпендикулярно до фасаду та з відхиленням  $45^\circ$  до фасаду внаслідок впливу вітру.

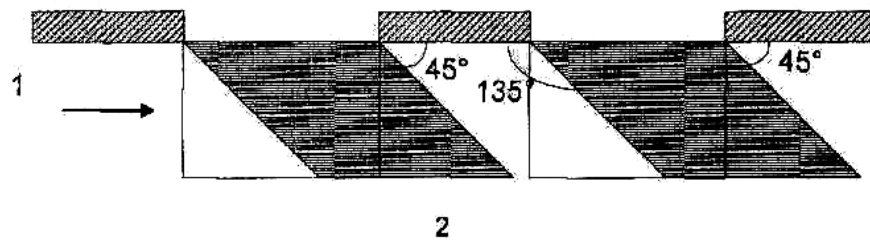


Рисунок 1.16 – Відхилення полум'я вітром: 1 - вітер; 2 - горизонтальна проекція полум'я

Потужність теплового потоку пожежі визначається по формулі [142]:

$$Q = \min \left\{ \frac{A_f \cdot q_{f,d}}{\tau_F}; 3,15 \cdot \left( 1 - e^{\frac{-0,036}{\sigma}} \right) \cdot A_v \cdot \left( \frac{h_{eq}}{D/W} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}, \text{ МВт.} \quad (1.25)$$

Температура в протипожежному відсіку визначається по формулі [142]:

$$T_f = 6000 \sqrt{\sigma} \cdot \left( 1 e^{\frac{0,1}{\sigma}} \right) \cdot (1 e^{0,00286 \Omega}) + T_o \quad (1.26)$$

Висота полум'я визначається по формулі [142]:

$$L_L = \max \left\{ 0; h_{eq} \cdot \left( 2,37 \cdot \left( \frac{Q}{A_v \rho_g \sqrt{h_{eq} g}} \right)^{\frac{2}{3}} \right) - 1 \right\} \quad (1.27)$$

Приймаючи  $\rho_g = 0,45 \text{ кг}\cdot\text{м}^3$  і  $g = 9,81 \text{ м}\cdot\text{с}^2$ , формула (1.27) може бути спрощена [142]:

$$L_L = 1,9 \cdot \left(\frac{Q}{w_t}\right)^{\frac{2}{3}} - h_{eq} \quad (1.28)$$

Ширина полум'я приймається рівній ширині віконного прорізу, рисунок 1.17. Глибина полум'я приймається рівною  $2/3$  висоти вікна, тобто  $2/3 h_{eq}$ . Горизонтальна проекція полум'я приймається [142]:

- якщо є стіна над вікном [142]:

$$L_H = \frac{h_{eq}}{3}, \text{ якщо } h_{eq} \leq 1,25 w_t \quad (1.29)$$

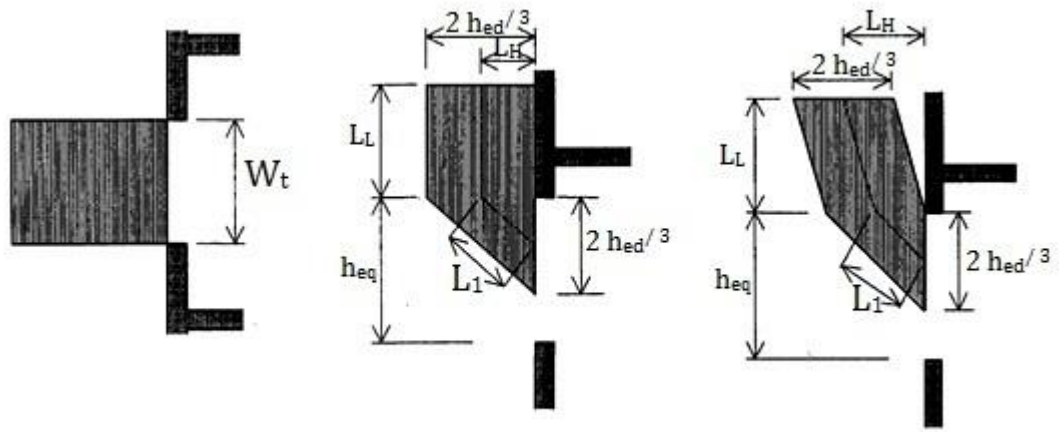
$$L_H = 0,3 h_{eq} \cdot \left(\frac{h_{eq}}{w_t}\right)^{0,54}, \text{ якщо } h_{eq} > 1,25 w_t \text{ і відстань до}$$

інших вікон  $> 4 w$  (1.30)

$$L_H = 0,454 h_{eq} \cdot \left(\frac{h_{eq}}{2w_t}\right)^{0,54} \text{ в інших випадках} \quad (1.31)$$

- якщо немає стіни над вікном [142]:

$$L_H = 0,6 h_{eq} \cdot \left(\frac{L_L}{h_{eq}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.32)$$



Горизонтальний  
поперечний переріз

$$L_L = \frac{h_{eq}}{3}$$

Вертикальний  
поперечний переріз

$$L_1 = \sqrt{L_H^2 + \frac{h_{eq}^2}{9}} \cong \frac{h_{eq}}{2}$$

$$L_f = L_L + L_1$$

Вертикальний  
поперечний переріз

$$L_1 \cong \frac{h_{eq}}{3}$$

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

$$h_{eq} < 1,25w_t$$

Стіна вище

Нема стіни вище  
або  $h_{eq} > 1,25w_t$

Рисунок 1.17 – Розміри полум'я (природна вентиляція)

Горизонтальна проекція полум'я уздовж осі визначається по формулах [142]:

- якщо  $L_L > 0$ :

$$L_f = L_L + \frac{h_{eq}}{2}, \text{ якщо є стіна над вікном або } h_{eq} \leq 1,25w_t \quad (1.33)$$

$$L_f = \sqrt{L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3}\right)^2} + \frac{h_{eq}}{2}, \text{ якщо немає стіни над} \\ \text{вікном або } h_{eq} > 1,25w_t \quad (1.34)$$

- якщо  $L_L = 0$ , то  $L_1 = 0$ .

Температура полум'я у вікні, визначається по формулі [142]:

$$T_W = 520 / (1 - 0,4725 \cdot (Lfw_t / Q)) + T_0, \text{ K.} \quad (1.35)$$

Формула (1.35) застосовна у разі виконання умови  $Lfw_t / Q < 1$ . Ступінь чорноти полум'я у вікні допускається приймати  $\varepsilon_f = 1$ . Температура полум'я уздовж осі визначається по формулі [142]:

$$T_Z = (T_W - T_0) (1 - 0,4725 \cdot (L_x w_t / Q)) + T_0, \text{ K,} \quad (1.36)$$

де  $L_x$  - осьова відстань від вікна до місця, для якого проводиться розрахунок.

Формула (1.36) застосовна у разі виконання умови  $L_x w_t / Q < 1$ .

Чорнота полум'я допускається визначати по формулі [142]:

$$\varepsilon_\varphi = 1 - e^{-0,3d_f}, \quad (1.37)$$

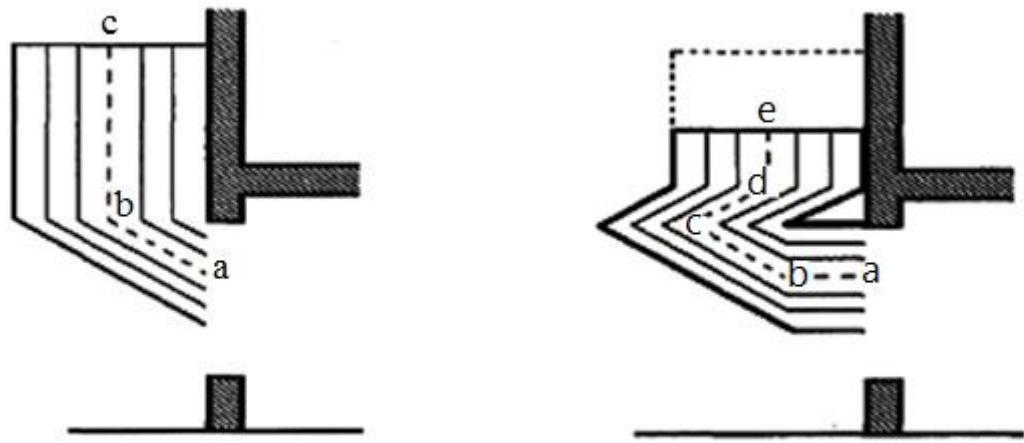
де  $d_f$  - товщина полум'я, м.

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією визначається по формулі [142]:

$$\alpha_c = 4,67 \cdot (1/deq)^{0,4} \cdot (Q/Av)^{0,6} \quad (1.38)$$

Якщо на верхньому краю вікна по всій його ширині (рисунок 1.18) розташований виступ (балкон, козирок і т.д.) з горизонтальною проекцією  $W_a$ , а також, якщо над вікном є стіна і  $h_{eq} \leq 1,25$ , висота й горизонтальна проекція полум'я повинні перераховуватися в такий спосіб:

- висота полум'я  $L_L$ , що визначена відповідно до рисунку 1.17, зменшується на  $W_a \cdot (1 + \sqrt{2})$ ;
- горизонтальна проекція полум'я  $L_H$ , що визначена по формулам (1.29 – 1.32), збільшується на  $W_a$ .



Вертикальний поперечний переріз

$$a \ b \ c = L_f$$

Вертикальний поперечний переріз

$$a \ b \ c \ d \ e = L_f \text{ і } w_a = a \ b$$

Рисунок 1.18 – Відхилення полум'я

Якщо на верхньому краю вікна по всій його ширині, рисунок 1.17 розташований виступ (балкон, козирок і т.д.) з горизонтальною проекцією  $W_a$ , а також якщо над вікном немає стіни або  $h_{eq} > 1,25w_t$ , висота й горизонтальна проекція полум'я повинні перераховуватися в такий спосіб:

- висота полум'я  $L_L$ , визначена відповідно до рисунку 1.17, зменшується на  $W_a$ ;

- горизонтальна проекція полум'я  $L_H$ , визначена за формулами (1.29 – 1.32), збільшується на  $W_a$ .

Загальний кутовий коефіцієнт опромінення для теплопередачі випромінюванням від прорізів визначається по формулі [142]:

$$\Phi_f = \frac{(C_1 \Phi_{f,1} + C_2 \Phi_{f,2}) \cdot d_1 + (C_3 \Phi_{f,3} + C_4 \Phi_{f,4}) \cdot d_2}{(C_1 + C_2) \cdot d_1 + (C_3 + C_4) \cdot d_2} \quad (1.39)$$

де  $\Phi_{f,i}$  - кутовий коефіцієнт опромінення поверхні конструкції  $i$  прорізу;

$d_i$  - розмір поперечного перерізу поверхні конструкції  $i$ ;

$C_i$  - коефіцієнт захисту (екранування) поверхні конструкції  $i$ ;

$C_i = 0$  для захищеної поверхні елемента;

$C_i = 1$  для незахищеної поверхні елемента.

Кутовий коефіцієнт опромінення  $\Phi_{f,i}$  невидимої із прорізу поверхні конструкції дорівнює нулю. Загальний кутовий коефіцієнт опромінення конструкції для теплопередачі випромінюванням від полум'я  $\Phi_z$  визначається по формулі [142]:

$$\Phi_f = \frac{(C_1\Phi_{z,1}+C_2\Phi_{z,2})\cdot d_1+(C_3\Phi_{z,3}+C_4\Phi_{z,4})\cdot d_2}{(C_1+C_2)\cdot d_1+(C_3+C_4)\cdot d_2} \quad (1.40)$$

де  $\Phi_{z,i}$  - кутовий коефіцієнт опромінення конструкції  $i$  для теплопередачі випромінюванням від полум'я.

Кутовий коефіцієнт опромінення  $\Phi_{z,i}$  окремих сторін конструкції для теплопередачі випромінюванням від полум'я може ґрунтуватися на еквівалентних прямокутних розмірах полум'я.

Важливу роль під час проведення розрахунків відіграє кутовий коефіцієнт опромінення, що визначається за формулою [142]:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S_{1-2}^2} \cdot dA_2 \quad (1.41)$$

Кутовий коефіцієнт опромінення вказує частку загального теплового потоку від заданої випромінюючої поверхні, яка досягає заданої поверхні, що приймає. Його значення залежить від розміру випромінюючої поверхні, відстані між випромінюючою та приймаючою поверхнею і їх орієнтації по відношенню один до одного, рисунок 1.19 [142].

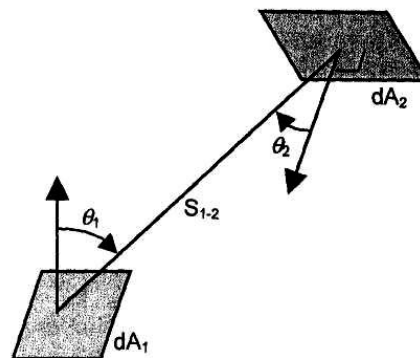


Рисунок 1.19 – Променистий теплообмін між двома поверхнями

Якщо випромінююча поверхня має рівномірні температуру й ступінь чорноти, то визначення  $\Phi$  спрощується. Просторовий кут, у середині якого може бути видна випромінююча поверхня з особливо нескінченно малою площиною, діленою на  $2\pi$ .

Теплове випромінювання до нескінченно малої площини опуклої поверхні елемента визначається тільки положенням і розмірами пожежі.

Теплове випромінювання до нескінченно малої площини увігнутої поверхні елемента визначається положенням і розмірами пожежі (вплив положення), а також випромінюванням від інших частин елемента (ефект затінення).

Верхні межі кутового коефіцієнта опромінення  $\Phi$  наведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6

## Межі кутового коефіцієнта опромінення

| Орієнтація      |           | Локальна пожежа | Повністю розвинена пожежа |
|-----------------|-----------|-----------------|---------------------------|
| Вплив положення |           | $\Phi \leq 1$   | $\Phi = 1$                |
| Ефект затінення | Опуклий   | $\Phi = 1$      | $\Phi = 1$                |
|                 | Увігнутий | $\Phi \leq 1$   | $\Phi \leq 1$             |

Під час розрахунку температури в зовнішніх конструкціях передбачається, що всі поверхні мають прямокутну форму. Це стосується вікон і інших прорізів у стінах протипожежного відсіку, а також еквівалентних прямокутників полум'я.

У розрахунках кутового коефіцієнта опромінення для заданої ситуації, на поперечному перерізі конструкції, що обігривається, спочатку окреслюються проекції прямокутників, рисунок 1.19. Це необхідно для обліку ефекту затінення. Величина коефіцієнта, визначається для середньої точки Р кожної поверхні прямокутників.

Кутовий коефіцієнт опромінення кожної, що обігрівається поверхні визначається як сума часток від кожної із зон випромінюючої поверхні (звичайно чотирьох), які видимі із точки Р на поверхні, що обігрівається, рисунки 1.19 – 1.22. Ці зони визначаються щодо точки Х, що перебуває в місці перетинання горизонтальної лінії, перпендикулярної до поверхні, що обігрівається. Не враховуються частки від зон, які не видимі із точки Р, рисунок 1.20 [142].

Якщо точка Х лежить поза випромінюючою поверхнею, то ефективний кутовий коефіцієнт опромінення визначається підсумовуванням часток двох прямокутників, побудованих від Х до вилученого краю випромінюючої поверхні, із вирахуванням часток двох прямокутників, побудованих від Х до прилеглого краю випромінюючої поверхні.

Частка кожної зони визначається в такий спосіб:

#### Проекції прямокутників

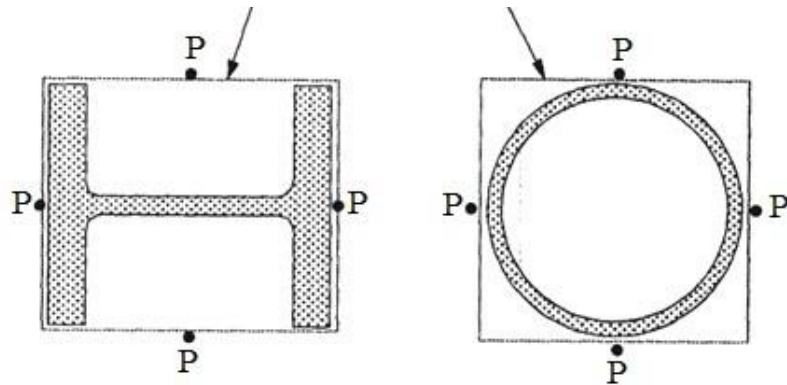


Рисунок 1.20 – Проекції поверхонь, що опромінюються теплом

а), якщо опромінювальна й випромінююча поверхні паралельні [142]:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{b}{\sqrt{1+a^2}} \right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2}} \right) \right] \quad (1.42)$$

де  $a = h/s$ ;

$b = w/s$ ;

$s$  - відстань від крапки Р до крапки Х;

$h$  - висота зони випромінюючої поверхні;

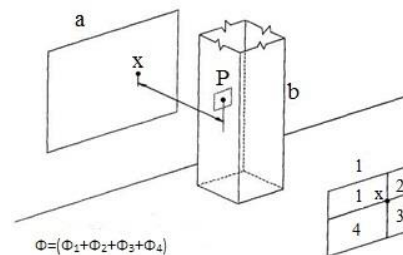
$w$  - ширина зони випромінюючої поверхні;

б) якщо опромінювальна й випромінююча поверхні перпендикулярні [142]:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \tan^{-1}(a) - \frac{1}{\sqrt{1+b^2}} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2}} \right) \right] \quad (1.43)$$

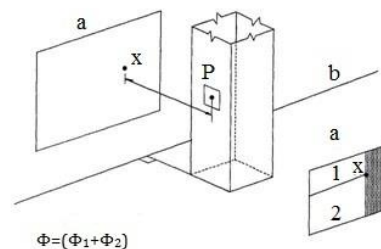
в) якщо опромінювальна й випромінююча поверхні розташовані під кутом  $\theta$  [152]:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \tan^{-1}(a) - \frac{(1-b \cos \theta)}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \right) + \frac{a \cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{(b-\cos \theta)}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{\cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) \right] \right] \quad (1.44)$$



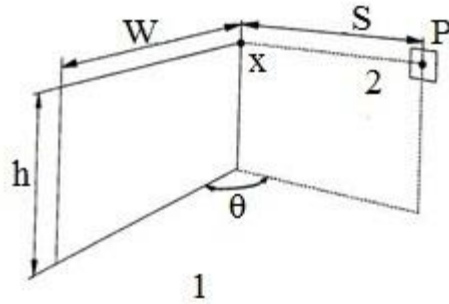
$a$  - випромінююча поверхня;  $b$  - опромінювальна поверхня

Рисунок 1.21 – Паралельне розташування опромінювальної й випромінюючої поверхні



$a$  - випромінююча поверхня;  $b$  - опромінювальна поверхня

Рисунок 1.22 – Перпендикулярне розташування опромінювальної й випромінюючої поверхні



$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

1 - випромінююча поверхня; 2 - опромінювальна поверхня

Рисунок 1.23 – Розташування опромінювальної й випромінюючої поверхні під кутом

Як недолік розглянутого методу слід відмітити, те що його використання обмежене за величиною пожежної навантаги, зокрема до 200 МДж/м<sup>2</sup>. Також він не визначає критерії для порівняння, які доцільно приймати під час визначення протипожежних відстаней. Разом з цим теоретичні основи цього методу можуть бути використані під час створення спрощеного методу розрахункового визначення протипожежних відстаней.

Одним із джерел обґрунтування протипожежних відстаней між будівлями та спорудами розрахунковим методом є довідник [143, 144]. В даному довіднику приведена методика розрахунку протипожежних відстаней між промисловими спорудами і житловими будинками, в основу якої закладена формула [144]:

$$r = k\sqrt{F} \quad (1.45)$$

де  $r$  – величина протипожежної відстані, м;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від температури полум'я та об'єкту, що опромінюється, взаємного розташування об'єктів і ступеня чорноти (приймається в межах 0,85÷0,9);

$F$  – площа полум'я, м<sup>2</sup>.

Під час визначення протипожежних відстаней велике значення має величина критичного часу нагрівання поверхні, що можна визначити за формулою [144]:

$$\tau = - \frac{c\rho\delta(1-\frac{\alpha\Delta t}{aq})}{\alpha} \quad (1.46)$$

де  $\Delta t = t_k - t_b$

$t_k$  - критична температура тіла, що опромінюється (наприклад, температура самозаймання), °C;

$t_b$  - температура оточуючого середовища, °C;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні в оточуюче середовище, Вт/см<sup>2</sup>·°C;

$a$  – коефіцієнт поглинання поверхнею;

$c$  – питома теплоємність поверхні, Дж/кг·°C;

$\rho$  - густина поверхні, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  – товщина тіла, що опромінюється, м;

$q$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

У роботі [144] наведена методика розрахунку теплового опромінювання під час пожеж у резервуарних парках під час горіння нафтопродуктів. В основу розрахункового методу, який визначає кількість тепла, що випромінюється факелом пожежі нафтопродукту у напрямку суміжних споруд, особового складу та техніки покладено рівняння (1.16), що описує закон Стефана-Больцмана [145 – 147].

Із європейських теоретичних методів визначення протипожежних відстаней уваги заслуговують роботи [148 – 150]. Процедура обчислення, автором встановлена лише для вибіркового обчислень, зокрема для пожежі та випромінювання з одного вікна.

Для розрахунку, на першому етапі приймаються геометричні параметри вікна, а також зазначається, що розрахунок проводиться для

безвітряної погоди [151 – 153]. На рисунку 1.24 наведено розрахункову схему із віконним прорізом та коефіцієнти розрахунку.

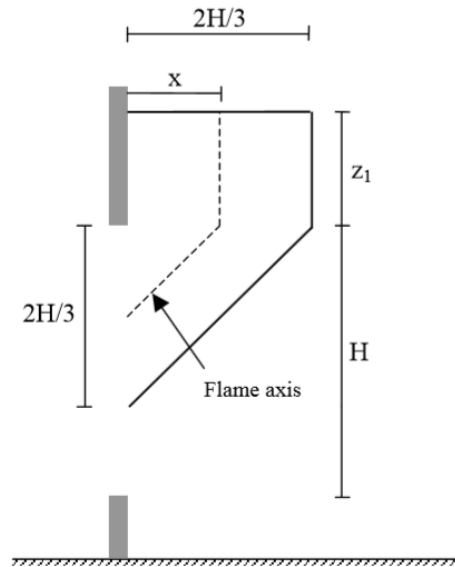


Рисунок 1.24 – Розрахункова схема [28]

Передбачено, що теплове випромінювання дорівнює значенню внутрішній пожежі в приміщенні, а площа вогню не буде займати всю площу світлового прорізу і становитиме в межах  $2h/3$ . При цьому загальна площа полум'я складається із частини площі світлового прорізу та площі полум'я над вікном  $Z_1$  [154].

Для розрахунку приймається теплове випромінювання в точці, розташованій в центрі вікна на відстані,  $x$  від фасаду [155]. Максимальне прийняте випромінювання можна знайти в точці, що розташована вище, але припускається, що вона має незначну різницю в температурному ефекті. Розрахункова формула має вигляд [155]:

$$P_{window} = \varepsilon \sigma \Phi (T_f^4 - T_a^4) \quad (1.47)$$

де  $\varepsilon$  - стабільність джерела пожежі (приймається 1 для найгіршого випадку);

$\sigma$  – константа Стефана-Больцмана –  $56,7 \cdot 10^{-12} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$

$\Phi$  - конфігураційний коефіцієнт вікна;

$T_f$  - температура в пожежному відсіку, K;

$T_a$  - температура приймаючої поверхні, К.

Температура полум'я з вікна, що розраховується не є постійною через зміну розміру полум'я [156, 157]. Можна використовувати середню температуру полум'я, але для того, щоб досягти якомога точнішого результату, температура змінюється вздовж осі полум'я, а полум'я ділиться на смуги з висотою  $\Delta h$ . Загальне прийняте випромінювання  $P_{flame}$  розраховується з рівнянням (1.48), як сума випромінювання  $P_{flame,p}$  від кожної смуги [157]:

$$P_{flame} = \sum P_{flame,p} \quad (1.48)$$

Коефіцієнт конфігурації  $\phi_{tot}$ , кожної смуги полум'я можна визначити за допомогою рівняння 1.49. Для того, щоб коефіцієнти конфігурації були уточненими, вони повинні бути розраховані з тієї ж контрольної точки О, яка показана на рисунку 1.25 [157]:

$$\phi_{tot,p} = 2\phi_p - 2\phi_{p1} \quad (1.49)$$

де  $\phi_p$  - коефіцієнт конфігурації прямокутника з висотою  $= H + p \cdot \Delta h$  і шириною  $W/2$ ;

$\phi_{p-1}$  - коефіцієнт конфігурації прямокутника з висотою  $= H + (p-1) \cdot \Delta h$  і шириною  $W/2$ ;

$p$  - номер відповідної смуги полум'я, що визначається з факелу горіння.

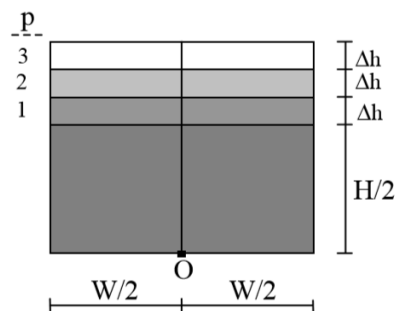


Рисунок 1.25 – Градація під час визначення коефіцієнта конфігурації кожної полум'яної смуги

Відстань між джерелом вогню (світловим прорізом) і приймачем (стінка суміжної будівлі) дорівнює відстані між фасадом і джерелом, мінус товщина полум'я, тобто  $2H/3$ .

Температура полум'я змінюється вздовж осі полум'я. При цьому температура вважається постійною через всю ширину і товщину полум'я, що є консервативним підходом. Температуру початку і кінця кожної смуги полум'я треба визначити, щоб дати середню температуру в смузі. Температура змінюється вздовж полум'я відповідно до рівняння 1.50 [157]:

$$\frac{T_z - T_a}{T_o - T_a} = 1 - 0.027 \frac{lw}{R} \quad (1.50)$$

де  $T_z$  - температура на відстані  $l$ , м вздовж осі, °C;

$T_a$  - температура навколишнього повітря, приймається 20 °C;

$T_o$  - температура у вікні, °C;

$l$  - відстань по осі полум'я, м;

$w$  - ширина вікна, м;

$R$  - швидкість горіння, кг/с.

Дані щодо швидкості горіння наведені у роботі [29]:

$$R = 5.5A_0\sqrt{H} \quad (1.51)$$

де  $A_0$  - площа отвору, м<sup>2</sup>;

$H$  - висота отвору, м.

Також температуру у вікні допускається умовно приймати, оскільки відомо, що температура на кінчику полум'я становить близько 540 °C, а загальна довжина осі полум'я приблизно дорівнює  $H/2 + z_1$ .

Таким чином загальний рівень теплового випромінювання,  $P_{tot}$ , на основі якого робиться висновок про мінімальну протипожежну відстань можна розрахувати шляхом додавання значення теплового випромінювання з вікна та проєктованого полум'я [157]:

$$P_{tot} = P_{window} + P_{flame} \quad (1.52)$$

Як висновок враховуючи роботи [158 – 160] можна зазначити, що представлений метод має певні недоліки оскільки, зокрема він застосовний лише для індивідуальних та простих випадків, а саме будинків виключно із світловими прорізами, при цьому не враховується можлива пожежа на фасаді будинку та поширення полум'я по фасаду будинку, що по факту не відповідає реальній статистиці пожеж щодо поширення вогню від одного будинку на інший, тому потребує додаткового вивчення та удосконалення [161].

Із теоретичних методів дослідження протипожежних відстаней, також слід відмітити роботу [144]. В цій роботі представлена методика, яка включає комплекс заходів та передбачає організацію і проведення методичної та роз'яснювальної роботи з питань технічного нормування у сфері будівництва. Дана методика призначена для спеціалістів та керівників проектно-дослідницьких та будівельних організацій, установ і служб замовника (інвестора) та інших зацікавлених організацій для науково обґрунтованого визначення протипожежних відстаней під час проектування промислових об'єктів.

Методика включає оцінку небезпечних факторів пожежі при струменевих викидах газу. Алгоритм визначення протипожежної відстані розпочинається з визначення об'єму полум'я та його тепловіддачі. Наведена методика включає розрахунок внутрішнього та зовнішнього стехіометричного контуру полум'я, який буде змінюватись через різну концентрацію горючого середовища.

На рисунку 1.26 наведені параметри, що впливають на визначення геометричної характеристики факелу та його впливу на оточуюче середовище.

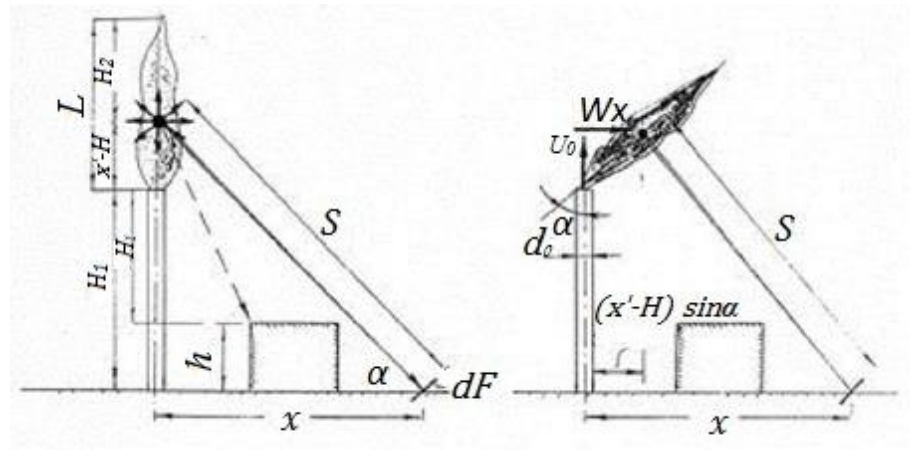


Рисунок 1.26 – Параметри, що впливають на визначення геометричної характеристики факелу та його впливу на оточуюче середовище [144]

Визначивши тип факелу та його об'ємне випромінювання, визначається значення теплового випромінювання на одиницю площі при відстані  $S$ , за формулою [144].

$$q = \frac{Q\eta\cos\beta}{4\pi S^2} \quad (1.53)$$

де  $\beta$  - кут між нормаллю одиничної площадки і лінією, що з'єднує її з джерелом випромінювання;

$\eta$  - коефіцієнт випромінювання, що характеризує частку тепла від загального теплового потенціалу у вигляді випромінювання в навколишній простір від видимої частини полум'я.

Із особливостей які слід відмітити в даній методиці, це врахування детонації, що може виникнути в результаті вибуху та можливість врахування вітру, що впливає на швидкість вигорання пального, що в свою чергу впливає на потужність теплового випромінювання [162 – 164].

В роботі [165] запропонована стохастична модель теплового випромінювання від полум'я нафтопродуктів, що горять в резервуарах. Автор запропонував метод оцінки досягнення в резервуарі температури самозаймання парів нафтопродуктів продовж заданого проміжку часу, тобто використав суттєву параметральну характеристику – значення температури.

Але ця робота не набула подальшого розвитку щодо створення критеріальної та методичної бази для оцінювання поширення вогню на сусідні будинки розрахунковими методами [166 – 168].

Описаний вище математичний апарат безумовно може бути застосований для отримання баз даних щодо параметрів процесу теплообміну між будівлею із пожежею та суміжними будівлями [169, 170]. Основною причиною, що стримує застосування даного математичного апарату, є відсутність критеріальної бази щодо індикації настання критичного стану поширення пожежі на суміжну будівлю [171].

Серед розрахункових методів дослідження теплообміну слід зазначити про метод розрахунку інтенсивності теплового випромінювання від вогнища пожежі, що зарегламентований в [172]. Суть методу полягає у тому, що інтенсивність теплового випромінювання розраховують для двох варіантів пожежі (або для того з них, який може бути реалізований у даній технологічній установці):

а) горіння розливів ЛЗР та ГР або твердих горючих матеріалів (включно з пилом);

б) «вогняна куля» - великомасштабне дифузійне горіння, що відбувається у разі розриву резервуара з горючою рідиною або газом під тиском, із займанням вмісту резервуара.

Якщо можлива реалізація обох варіантів, то під час оцінювання значень критеріїв за пожежною небезпекою, враховується більше з двох значень інтенсивності теплового випромінювання [173 – 175].

Інтенсивність теплового випромінювання  $q$  у кіловатах на квадратний метр, під час горіння розливів горючих рідин або твердих горючих матеріалів обчислюють за формулою [175]:

$$q = E_r F_q \psi, \quad (1.54)$$

де  $E_f$  - середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я,  $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$F_q$ - кутовий коефіцієнт опромінення;

$\psi$  - коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу.

Значення  $E_f$  приймають на основі експериментальних даних. Для деяких видів рідкого вуглеводневого палива значення  $E_f$  наведені у таблиці 1.7. У разі відсутності даних дозволено приймати величину  $E_f$  рівною:  $100 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  - для ЗВГ;  $40 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  - для нафтопродуктів і твердих матеріалів.

Таблиця 1.7

Середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я  $E_f$  залежно від діаметра вогнища пожежі й питома масова швидкість вигорання  $M_v$  для деяких видів рідкого вуглеводневого палива [172].

| Паливо                                                                                                                                                                       | $E_f, \text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ |                  |                  |                  |                  | $M_v, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                              | $d=10 \text{ м}$                      | $d=20 \text{ м}$ | $d=30 \text{ м}$ | $d=40 \text{ м}$ | $d=50 \text{ м}$ |                                                          |
| ЗПГ (Метан)                                                                                                                                                                  | 220                                   | 180              | 150              | 130              | 120              | 0,08                                                     |
| ЗВГ<br>(Пропан-бутан)                                                                                                                                                        | 80                                    | 63               | 50               | 43               | 40               | 0,10                                                     |
| Бензин                                                                                                                                                                       | 60                                    | 47               | 35               | 28               | 25               | 0,06                                                     |
| Дизельне паливо                                                                                                                                                              | 40                                    | 32               | 25               | 21               | 18               | 0,04                                                     |
| Нафта                                                                                                                                                                        | 25                                    | 19               | 15               | 12               | 10               | 0,04                                                     |
| <b>Примітка.</b> Для діаметрів вогнищ пожежі менше 10 м або більше 50 м потрібно приймати величину $E_f$ таку саму, як і для вогнищ пожежі діаметром 10 м і 50 м відповідно. |                                       |                  |                  |                  |                  |                                                          |

За відсутності даних дозволено приймати величину  $E_f$  рівною  $100 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  для ЗВГ,  $40 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  - для нафтопродуктів,  $40 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$  - для твердих матеріалів

Розраховують характерний розмір розливу рідини  $d$  у метрах, за формулою [172]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (1.55)$$

де  $F$  - площа розливу, м<sup>2</sup>.

Обчислюють висоту полум'я  $H$  у метрах, за формулою [172]:

$$H = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{M_v}{\rho_n \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61}, \quad (1.56)$$

де  $M_v$  - питома масова швидкість вигорання палива, кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;

$\rho_n$  - густина навколишнього повітря, кг·м<sup>-3</sup>;

$g = 9,81$  м·с<sup>-2</sup> - прискорення вільного падіння.

Визначають кутовий коефіцієнт опромінення  $F_q$  за формулою [172]:

$$F_q = \sqrt{F_v^2 + F_H^2} \quad (1.57)$$

де  $F_v$ ,  $F_H$  - фактори опромінення для вертикальної і горизонтальної площадок відповідно, які визначаються за формулами [172]:

$$F_v = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{S} \cdot \arctg \left( \frac{h}{\sqrt{S^2-1}} \right) - \frac{h}{S} \cdot \left\{ \arctg \left( \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right) - \frac{A}{\sqrt{A^2-1}} \arctg \left( \sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}} \right) \right\} \right] \quad (1.58)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2-1}} \cdot \arctg \left( \sqrt{\frac{(B+1) \cdot (S-1)}{(B-1) \cdot (S+1)}} \right) - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2-1}} \cdot \arctg \left( \sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}} \right) \right], \quad (1.59)$$

$$A = (h^2 + S^2 + 1) / (2 \cdot S), \quad (1.60)$$

$$B = (1 + S^2) / (2 \cdot S), \quad (1.61)$$

$$S = 2r/d, \quad (1.62)$$

$$h = 2H/d, \quad (1.63)$$

де  $r$  - відстань від геометричного центру розливу (від зовнішньої установки) до об'єкта, що опромінюється, м.

Визначають коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу за формулою [172]:

$$\psi = \exp [-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (r - 0,5d)]. \quad (1.64)$$

Визначають коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу за формулою [172]:

$$\psi = \exp [-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (r - 0,5d)]. \quad (1.65)$$

Інтенсивність теплового випромінювання для “вогняної кулі”  $q$ , кВт·м<sup>-2</sup>, обчислюють за формулою (1.53).

Величину  $E_f$  визначають на основі експериментальних даних. Дозволено приймати величину  $E_f$  рівною 450 кВт·м<sup>-2</sup>.

Значення  $F_q$  обчислюють за формулою [172]:

$$F = \frac{\frac{H}{D_s} + 0,5}{4 \cdot \left[ \left( \frac{H}{D_s} + 0,5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D_s} \right)^2 \right]^{1,5}} \quad (1.66)$$

де  $H$  - висота центру «вогняної кулі», м;

$D_s$  - ефективний діаметр «вогняної кулі», м;

$r$  - відстань від об'єкта, що опромінюється, до точки на поверхні землі безпосередньо під центром «вогняної кулі», м.

Ефективний діаметр «вогняної кулі»  $D_s$ , м, визначають за формулою [172]:

$$D_s = 5,33m^{0,327}, \quad (1.67)$$

де  $m$  - маса горючої речовини, кг.

Значення  $H$  визначають у ході спеціальних досліджень. Дозволено приймати величину  $H$  рівною  $D_s/2$ .

Проміжок часу існування «вогняної кулі»  $t_s$ , с, визначають за формулою [172]:

$$t_s = 0,92m^{0,303}. \quad (1.68)$$

Коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу  $\psi$  розраховують за формулою [172]:

$$\psi = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s/2)] \quad (1.69)$$

Недоліками методів оцінювання протипожежних відстаней, які використовують континуальні моделі, до яких відносяться методи із використанням диференціального рівняння теплопровідності та системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса є слабка адаптація до задач теплообміну між факелом пожежі та суміжним об'єктом. Крім цього, для їхньої реалізації необхідно використовувати складне та дороге програмне забезпечення та комп'ютерну техніку. А також висуваються підвищені вимоги до підготовки та кваліфікації фахівців, які проводять такі розрахунки.

Таким чином аналіз розрахункових методів щодо визначення протипожежних відстаней між будівлями та спорудами показав, що єдиного підходу та критеріїв для визначення протипожежних відстаней немає. Зокрема під час розрахункової оцінки протипожежних відстаней за суттєву параметральну характеристику приймається значення теплового потоку [176, 177]. При цьому, цей критерій оцінюється за законами променистого теплообміну, конвективною складовою нехтують. Недоліком такого підходу є те, що по перше на сьогоднішній день відсутня статистична база критичних значень по тепловому потоку для різних речовин і матеріалів, зокрема тих, що можуть використовуватися у оздобленні будинків та

технологічних установок, по друге тепловий потік від пожежі є суттєво змінним у часі і має бути приведений до відповідних геометричних параметрів суміжної будівлі, її матеріалів та інше, по третє неможливості врахування фактору часу впливу пожежі на суміжну будівлю і пов'язаних із цим фактором часу прибуття оперативно-рятувальних підрозділів, часу роботи автоматичних систем протипожежного захисту, наявного пожежного навантаження у будівлі із пожежею та суміжних будівлях і тому подібне, по четверте тепловий потік не є прямою величиною, яка може бути асоційована із причинами поширення та охоплення пожежею суміжних будівель [178], такими причинами можуть бути нагрівання горючих матеріалів будівель до температур за яких відбувається їх займання, що і є по-суті прямими величинами [179].

Недоліком табличного методу оцінювання протипожежних відстаней, який на сьогоднішній день реалізований в Україні є необґрунтовані економічно-недоцільні коефіцієнти запасу, що закладені. Також він не дає змогу врахувати суттєві характеристики об'єктів (в якому можлива пожежа та який опромінюється під час пожежі), що впливають на процеси теплообміну під час пожежі.

Недоліками методів із використанням диференціального рівняння теплопровідності та системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса є слабка адаптація до задач теплообміну між факелом пожежі та суміжним об'єктом.

### **1.5. Особливості методів дослідження теплообміну між об'єктами під час пожежі за допомогою обчислювальних методів комп'ютерної математики**

З розвитком сучасного комп'ютерного програмного забезпечення виникла можливість розв'язання складних задач пов'язаних з процесами теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі [180, 181]. У зв'язку з цим з'явилася можливість розроблення повноцінного

розрахункового методу визначення протипожежних відстаней між будівельними об'єктами.

За допомогою методів комп'ютерної математики дослідження процесів теплопередачі проводять із використанням польовий методів [182, 183]. Такі методи застосовують повну систему рівнянь Нав'є-Стокса [184 – 186], рисунок 1.27.



Рисунок 1.27 – Теоретична база для розв'язку задач теплообміну

Вихідну систему рівнянь Нав'є-Стокса можна записати у двох формах, що не суперечать одна одній. Згідно з першою формою, система рівнянь записана у фізичних змінних швидкість-тиск, а з другою формою – у змінних вихор-функція струму [187]. Існує і третій варіант розв'язання задач гідромеханіки, за якого використовують змінні швидкість-вихор [188 – 190].

У науковій літературі описано обмежену кількість випадків, що допускають аналітичне [184, 186] інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса. Тому прогрес у цій галузі можливий лише за умови використання численних методів. Нині для чисельного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса використовують кілька десятків різновидів різницевих схем. Велика частина з них розроблена для системи рівнянь у змінних вихор-функція струму. Загальний недолік цього підходу, як відомо, полягає в необхідності застосування в тому, чи в тому вигляді граничних умов для вихору на твердій поверхні. Наприклад, умови [184], яка є умовою першого роду точності щодо

кроку сітки. Водночас використання змінних вихор-функція струму унеможлиблює узагальнення названого методу під час моделювання ламінарних і турбулентних потоків. Це вмотивовує посилення наукового зацікавлення дослідників розв'язанням рівнянь Нав'є-Стокса у фізичних змінних швидкість-тиск. Такий підхід дає змогу виконувати за єдиним алгоритмом як двовимірні, так і тривимірні задачі. Однак цей шлях пов'язаний із труднощами розрахунку поля тиску, погодженого з полем швидкостей [186].

Рівняння Нав'є-Стокса мають низку специфічних особливостей, які суттєво впливають на їх чисельне рішення незалежно від форми запису. Одна з суттєвих особливостей – нелінійність і параболо-еліптичний характер рівнянь. Щоб правильно моделювати еліптичну природу рівнянь Нав'є-Стокса, необхідно використовувати еліптичне рівняння Пуассона для тиску [67]. У реальних умовах, під час розв'язання зовнішніх задач обтікання тіл, схарактеризована область може бути і нескінченною, але за умов чисельної реалізації її моделюють як обмежену, це ускладнює використання граничних умов на нескінченності. Наявність похідної й нелінійність рівнянь Нав'є-Стокса за великих чисел Рейнольдса створюють умови для утворення в рідині дуже складних просторово-часових вихрових структур, що призводять до нестаціонарності потоку рідини, втрати його стійкості й переходу до турбулентного режиму течії [139].

Більшість ефективних чисельних методів інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса, описаних, у роботах [139], ґрунтована на використанні асимптотичного методу розв'язку, коли для сталих течій розв'язують нестаціонарну задачу. Основна складність отримання рішень для нестаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса, поряд із нелінійністю вихідної системи рівнянь, пов'язана з труднощами одночасного розв'язання рівнянь кількості руху та рівняння нерозривності на поточному часовому кроці.

Нині, з огляду на практичну значущість, триває інтенсивний пошук ефективних різницевих схем та алгоритмів розв'язання рівнянь руху в'язкої

нестисливої рідини, оцінювання їхньої якості залежить від зіставлення результатів розрахунків з іншими відомими розрахунковими та експериментальними даними.

На сучасному етапі розвитку обчислювальної гідроаеромеханіки її подальший прогрес прогнозує вдосконалення моделей течії, процесів перемішування та комп'ютерних технологій інтегрування вихідних рівнянь. Останні з них зазвичай пов'язані з ускладненням обчислювальних алгоритмів шляхом використання схем апроксимації більш високого порядку точності та структурованих сіток [140]. Однак цей шлях породжує ускладнення обчислювальних алгоритмів і програм, що призводить до великих труднощів у їх реалізації, а тому доступний лише окремим професіоналам. Це обмежує можливості широкого використання в проектно-конструкторській діяльності.

Рівняння Нав'є-Стокса – це система диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описує рух і теплопередачу в'язкої нестисливої рідини [139]. Рівняння Нав'є-Стокса одні з найважливіших у гідродинаміці, їх застосовують у математичному моделюванні багатьох природних явищ та технічних задач [191, 192].

Фундаментальні рівняння:

- 1) рівняння руху потоку (рівняння Нав'є-Стокса);
- 2) рівняння нерозривності потоку, що виражене законом збереження матерії;
- 3) рівняння розподілу тепла (рівняння Фур'є-Кіргофа);
- 4) рівняння стану газу;
- 5) рівняння дифузії, що виражає зміну концентрації реагуючого кисню або іншої газової компоненти за умов руху газового потоку;
- 6) рівняння, що виражає закономірність променистого теплообміну;
- 7) рівняння швидкості перебігу хімічної реакції;
- 8) стехіометричні рівності реакцій;
- 9) рівняння руху окремих частинок твердого й рідкого палива з урахуванням гальмівного опору несучого середовища;

10) рівність надходження й витрат тепла (енергії).

У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є-Стокса складається з двох рівнянь: рівняння руху та рівняння нерозривності.

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є-Стокса. Ці способи визначення турбулентної динамічної в'язкості називають моделями турбулентності. Найбільше поширення має стандартна  $k-\varepsilon$  модель турбулентності [190].

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого палива описують модель «5 газів», згідно з номенклатурою [193]. При цьому модель випару часток реалізують у режимі кипіння.

Модель горіння визначають за швидкістю світла й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненими хімічними рівняннями визначеними у роботі [194]. Під час моделювання процесу горіння може бути використана модель горіння Магнуссена, як модель горіння для заздалегідь незмішаного палива й окисника [195 – 197].

Для обліку радіаційного теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом використовують дифузійну модель випромінювання газу (P1), що наведена в роботах [193, 196].

Для опису радіаційного теплообміну між поверхнями застосовують модель «ПП випромінювання», згідно з номенклатурою [194]. Ця модель базована на використанні рівняння радіаційного теплообміну між поверхнями.

Для складних конструкцій обсяг обчислень є дуже великим, тому більш зручно перекласти монотонні ітерації в алгоритм для персонального комп'ютера [198]. Існує багато спеціалізованих програм для побудови

геометричних моделей конструкцій, розподілу конструкцій на більш дрібні елементи та розрахунку поведінки елемента й конструкції в цілому.

Розрахунки можливо реалізувати за допомогою спеціального програмного забезпечення, призначеного для симуляції розвитку та поширення температури у просторі [199, 200]. В алгоритми цих програм закладені сучасні чисельні методи, а саме: метод кінцевих або граничних елементів, методи нев'язок, метод Гальоркіна, оптимізаційні методи тощо, для розв'язку систем диференціальних рівнянь неперервних середовищ типу рівнянь Нав'є – Стокса, рівняння теплопровідності Фур'є та ін., де враховано всі можливі чинники, на які не можна зважати в ході застосування аналітичних методів розв'язку. До цих чинників належить будь-яка складність граничних умов, а також різні нелінійності в рівняннях.

Моделювання вогневих процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами проводиться за польовою моделлю за допомогою програми FDS (Fire Dynamics Simulator) розробленої Національним інститутом стандартів і технологій (National Institute of Standards and Technology – NIST, США) [201] з врахуванням положень вітчизняних вимог [8, 12].

Програма FDS моделює сценарій пожежі з використанням обчислювальної гідродинаміки (CFD), оптимізованої для низькошвидкісних температурно-залежних потоків. Такий підхід виявляється дуже гнучким, і може бути застосований до різних пожеж, починаючи від горіння в лабораторних умовах і до масштабних натурних пожеж, як приклад на нафтових резервуарах.

FDS реалізує обчислювальну гідродинамічну модель (CFD) тепломасопереносу при горінні, чисельно вирішує рівняння Нав'є - Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму й теплопередачі при пожежі. Основним алгоритмом є певна схема методу предиктора - коректора другого порядку точності по координатах і часу. Турбулентність виконується за допомогою

моделі Смагоринського "Масштабне моделювання вихрів" (LES). Пряме чисельне моделювання (DNS) можна виконувати, якщо закладена в основі розрахункова сітка досить точна. Масштабне моделювання вихрів - режим роботи за умовчанням.

На всіх твердих поверхнях задаються теплові граничні умови, плюс дані про горючість матеріалу. Тепло- і масового переносу із поверхні й назад розраховується за допомогою емпіричних співвідношень.

Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується спеціальна програма SmokeView (смоук-вью).

Моделювання вогневих процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами за допомогою програми FDS створюється на основі існуючих натурних параметрів, при цьому одним із основних початкових завдань під час моделювання є максимальне наближення параметрів моделювання до реальних (натурних) умов та взаємозв'язків об'єктів, а саме: суміжних відстаней, дотримання масштабів об'єктів, матеріалу об'єктів, в тому числі багат шарового, параметрів навколишнього середовища, пожежного навантаження об'єктів та їх реакції горіння, вибір сценарію виникнення пожеж. Що стосується теплофізичних властивостей матеріалів (густина, агрегатний стан, питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт поглинання та випромінювання, температура самозаймання) то це завдання покладене на математичний інтелект програми FDS, і може лише корегуватися на етапі введення вихідних даних.

Усі комп'ютерні системи об'єднані в спеціальній групі, що має назву «Computational Fluid Dynamics» («CFD»). До таких комп'ютерних систем належать продукти «Star-CD», «Fluent», «Sofie», «FlowVision» та ін.

Результати розрахунків за цими програмами мають дуже високий ступінь збіжності з експериментальними дослідженнями пожеж [202, 203] і можуть бути використані для побудови температурних кривих із максимальним ступенем правдоподібності, з урахуванням усіх можливих факторів, що можуть впливати на передачу тепла від одного будинку до

іншого [204]. Нині відомі розрахункові дослідження температури під час пожежі за допомогою методів комп'ютерного моделювання, підготовлені науковцями із США, Франції, Швеції, Великобританії, Німеччини, Польщі, Росії та інших країн [205 – 207].

Особливості теоретичної бази, яку застосовують у програмних продуктах обчислювальної газо-гідродинаміки ґрунтуються на застосуванні сучасного програмного забезпечення, зокрема моделювання теплових процесів у середовищі комп'ютерних систем «CFD», дає змогу зважати на всі необхідні параметри розрахунків без наведення коефіцієнтів, досліджувати вплив геометричних і конструктивних характеристик та проведенні чисельного експерименту. Основні програмні продукти «CFD» подано у вигляді схеми, рисунок 1.28.

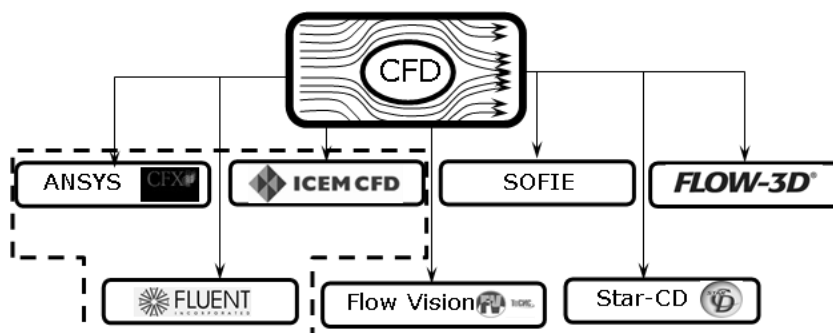


Рисунок 1.28 – Сімейство програмних продуктів «CFD», поширених в Україні

Вибір конкретного програмного комплексу залежить від особливостей модельованих процесів, можливостей обчислювальної техніки та користувача.

Так в роботі [208, 209] наведені результати щодо чисельного моделювання пожежі у вагоні метрополітену із використанням програмного комплексу FDS. В цій роботі детально визначені підходи щодо способів завдання характеристик осередку пожежі. Самий простий спосіб, який полягає у завданні швидкості поширення площі пожежі та питомого

тепловиділення із поверхні горіння. Під час завдання цих параметрів використовують усереднені приведені до одиниці площі експериментальні дані. При цьому, не враховуються процеси, що відбуваються в середині матеріалу, а моделюється лише газофазове горіння при заданих граничних умовах. Перевагами цього способу є простота створення вихідної моделі, більш високої стійкості та збіжності вирішення, більш низькі вимоги до розмірів розрахункової сітки і як наслідок більш високої швидкості розрахунку. Недоліки – це відсутність зв'язків між процесами, що відбуваються у газовій та твердій фазах, усереднення вихідних даних, що не дозволяє адекватно врахувати пожежну динаміку розвитку пожежі, недостатність вихідних даних не дозволяє моделювати вигорання та затухання пожежної навантаги. Із за вищезазначеного результати моделювання можуть не співпадати із реальними даними.

Другий спосіб це спосіб спільного моделювання газового горіння із урахуванням процесів, що відбуваються в середині матеріалів. Суть способу полягає у завданні швидкості вигорання твердих горючих матеріалів, що складають пожежну навантагу. При цьому поширення полум'я по поверхні визначається температурою займання та теплофізичними характеристиками матеріалу. Це дозволяє моделювати без даних про середні значення тепловиділення осередку пожежі. Недоліком цього способу є не можливість врахування різних хімічних реакцій із складником пального та продуктів згорання, більш високі вимоги до розрахункової сітки.

Найбільш деталізованим і комплексним способом, але при цьому найбільш складним є спосіб з одночасним моделюванням газофазного горіння та газифікації твердого матеріалу, що полягає в піролізі або випаровуванні із вивільненням газоподібного пального. При цьому

швидкість розкладання твердої фази і утворення газоподібної визначається хімічною кінетикою процесу (рівняння Арреніуса). Основною перевагою способу – є можливість моделювання процесу горіння, що максимально наближений до реальних умов, наявність зворотного теплового зв'язку між газовою та твердою фазами. До недоліків слід віднести необхідність володіти даними по кожному матеріалу щодо його теплофізичних характеристик, а також підбирати джерело запалювання, що в змозі забезпечити загоряння.

Найбільш точні результати отримують під час застосування методу прямого числового моделювання (DNS).

Також в цій роботі приведені вимоги щодо постановки завдання і граничних умов під час моделювання, зокрема: початкова температура, момент часу активації джерела запалювання, потужність джерела запалювання, тривалість дії джерела запалювання, наявність прорізів, матеріал огорожувальних конструкцій, обмеження щодо межування нижньої, верхньої та бокових поверхонь.

В результаті цієї роботи отримані дані щодо залежності потужності пожежі від часу.

В роботі [210] проведено визначення величини протипожежних відстаней за допомогою програмного забезпечення «Теплообмін випромінюванням під час пожежі». Суть визначення протипожежної відстані зводилася до моделювання щільності променистого теплового потоку від осередку пожежі з подальшим порівнянням отриманого значення із критичними величинами теплового потоку. Під час розрахунку теплового потоку використана програма «Теплообмін випромінюванням під час пожежі», що дозволяє алгоритм роботи якої приведений на рисунку 1.29.

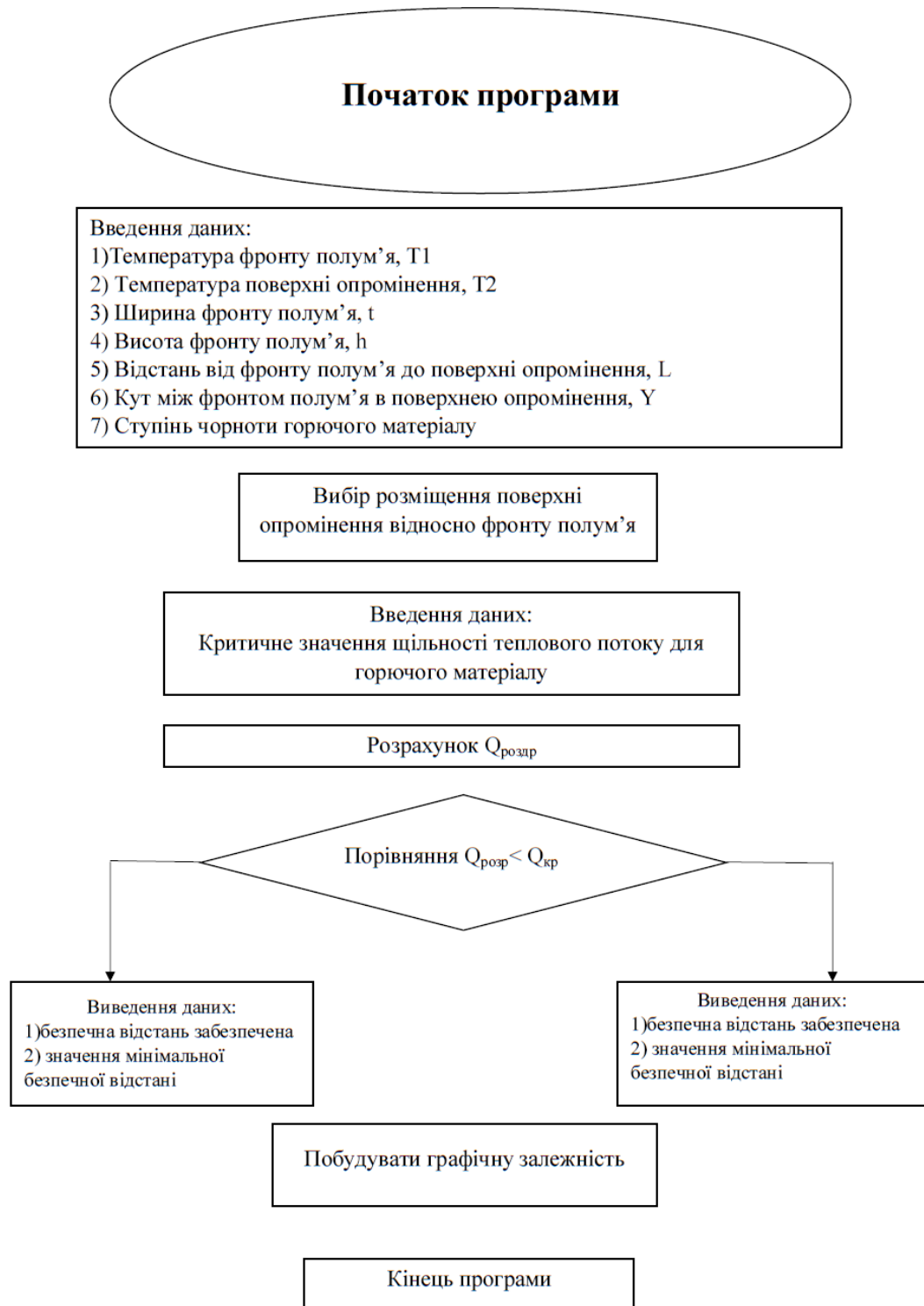


Рисунок 1.29 – Алгоритм роботи програми «Теплообмін випромінюванням під час пожежі» [210]

У роботі [210] наведені результати щодо розробки математичної моделі теплового вузла печі підігріву форми, що враховує температурні режими технологічного процесу, геометрію промислової установки і теплофізичні

властивості застосовуваних матеріалів та проведення математичного моделювання температурних полів в печі підігріву форми при різних температурах, геометричні параметри і ступенях розрідження.

Для побудови математичної моделі автором зроблені наступні допущення: щодо геометрії теплового вузла, що розподіл температури в тепловому вузлі стаціонарний, у першому наближенні нехтується поглинанням випромінювання зважаючи на малу щільності парів в камері [211, 212], щодо розрахункової області, розподіл температури всередині муфеля вважається відомим, температура стінки камери постійна і відома, температура шторки різна зовні і всередині, але не змінюється по радіусу.

Вихідними даними математичної моделі є температури внутрішньої бокової поверхні муфеля і вакуумної камери, геометрія теплового вузла і теплофізичні властивості матеріалів.

Математична модель реалізована у вигляді програми на мові Fortran. Розрахункові рівняння представлені звичайно-різницевиими аналогами і вирішується методом ітерацій по явній схемі.

В результаті цієї роботи розроблено математичну модель, яка містить постановку крайової задачі теплопровідності для ливарної форми в умовах теплообміну випромінюванням в зазорі між ливарної формою муфелем і з зовнішнього боку форми з вакуумною камерою, а також перенесення тепла розрідженням газом. За допомогою розробленої програми виконано моделювання температурних полів в тепловому вузлі печі підігріву форми вакуумної плавильно-заливальної установки при моделюванні змодельовані різні варіанти розміщення екранів в тепловому вузлі.

Аналіз комп'ютерних програмних комплексів під час вирішення завдань теплопередачі та теплообміну показав, що найбільшого використання на сьогоднішній день набули програми, які чисельно вирішують рівняння Нав'є-Стокса.

Разом з цим їх використання не апробовані під час розв'язання завдань щодо визначення протипожежних відстаней між об'єктами, що потребує відповідних досліджень та їх апробації.

### **1.6. Узагальнення результатів огляду та обґрунтування задач досліджень**

Питання визначення протипожежних відстаней на сьогоднішній день реалізуються за допомогою розпорядчого методу нормування, який передбачає використання чітких табличних значень без можливих альтернатив. При цьому такі табличні 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 від одного об'єкту на інший.

Критерії за якими обґрунтовуються протипожежні відстані як вітчизняного, так і зарубіжного досвіду відрізняються. В переважній своїй більшості проведені на сьогодні дослідження ґрунтуються на критерії густина теплового потоку. Разом з цим, недоліком такого підходу є те, що на сьогоднішній день відсутня статистична база критичних значень по тепловому потоку для різних речовин і матеріалів. Крім того, тепловий потік не є прямою величиною, яка може бути асоційована із причинами поширення та охоплення пожежею суміжних будівель.

Останнім часом спостерігається інтенсивний розвиток розрахункові методи, зокрема методи комп'ютерного моделювання під час дослідження процесів теплопередачі та теплообміну у різних сферах виробничої промисловості. Але використання таких методів потребує свого розвитку та апробування щодо дослідження та оцінювання протипожежних відстаней. Також без належного наукового обґрунтування залишаються такі питання: щодо оцінювання протипожежних відстаней за температурним критерієм, розробка алгоритмів, систематизування та апробація розрахункових методів

визначення протипожежних відстаней, узагальнення та розроблення процедур використання методів комп'ютерного моделювання, як такі, що залишаються не до кінця розкритими і потребують подальшого наукового розвитку.

Вирішення зазначених задач дасть змогу більш точно та обґрунтовано підходити до питання визначення протипожежних відстаней між суміжними об'єктами за рахунок уникнення не обґрунтованих коефіцієнтів запасу та похибок, що мали місце під час складання табличних даних. При цьому, планується досягнення економічного ефекту, оскільки відомо, що 1 м<sup>2</sup> не забудованої території становить близько 20 % вартості такої ж площі забудованої території [3].

Аналіз літературних джерел показав, що для розв'язання визначених проблем існує перспектива у методів комп'ютерного моделювання процесів теплообміну між суміжними об'єктами під час пожежі в одному із них з метою обґрунтування протипожежних відстаней. Існуючі підходи не адаптовані та не апробовані для вирішення зазначених вище завдань та повинні отримати подальшого розвитку під час використання, як складних уточнених математичних моделей, що реалізуються за допомогою сучасного комп'ютерного забезпечення, так і спрощених розрахункових методів та табличних методів. Для цього потрібно провести додаткові дослідження параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами. Під час створення наукових основ щодо розвитку розрахункових методів визначення протипожежних відстаней між об'єктами існує необхідність у створенні науково обґрунтованих методик експериментальних досліджень.

Таким чином, розвиток нових альтернативних методів визначення мінімально необхідних значень протипожежних відстаней між об'єктами на основі розрахункових методів, зокрема методів комп'ютерного моделювання є актуальним напрямком наукових досліджень, реалізація якого дозволить ефективно вирішувати задачі щодо обмеження поширення пожежі між

будинками, при цьому, максимально враховувати питання раціональності використання земель, що виділені під будівництво.

Виходячи із вище викладеного сформульовані мета дослідження та задачі дисертаційної роботи.

**Мета дослідження:** виявлення закономірностей зміни параметрів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами для розвитку наукових основ щодо розрахункових методів оцінювання небезпеки поширення пожежі з одного об'єкта на інший як наукового підґрунтя для встановлення протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатації.

**Задачі дослідження:**

- проаналізувати теоретичні дослідження та нормативну базу щодо оцінки безпечних відстаней між об'єктами промисловості та будівництва з точки зору пожежної безпеки та виявити шляхи їх удосконалення;

- обґрунтувати критеріальну базу, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні об'єкти та яка враховує їх конструктивні особливості, властивості матеріалів та сценарій пожежі;

- провести обґрунтування математичних моделей для описання теплообміну між об'єктом, на якому виникла пожежа та суміжним об'єктом з метою створення розрахункової бази із застосуванням комп'ютерних технологій;

- розробити методики експериментальних досліджень процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами;

- провести експериментальні дослідження за розробленими методиками та на основі отриманих експериментальних даних побудувати регресійні моделі температури нагріву поверхні суміжного об'єкту;

- порівнюючи результати експериментальних досліджень з відповідними їм газо-гідродинамічною моделлю, моделлю на основі рівняння теплообміну та регресійною моделлю довести їх адекватність і оцінити точність;

- використовуючи розроблені математичні моделі провести чисельний експеримент щодо визначення протипожежних відстаней в залежності від найбільш значущих факторів;
- на основі отриманих закономірностей розробити методичне забезпечення для розрахункової оцінки протипожежних відстаней між суміжними об'єктами;
- дослідити економічну ефективність розробленого методичного забезпечення щодо розрахункової оцінки протипожежних відстаней.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ МІЖ ФАКЕЛОМ ПОЖЕЖІ ТА СУМІЖНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

### **2.1 Критерії для обґрунтування мінімально допустимих протипожежних відстаней між об'єктами**

У розділі 1 встановлено, що під час встановлення протипожежних відстаней дослідниками та в нормативних документах використовуються різні комбінації показників, що впливають на процеси теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами, серед них зокрема такі показники: функціональне призначення будинків, ступінь вогнестійкості будинків, величина пожежної навантаги, площа прорізів у зовнішній стіні будинку, розташування будинків один по відношенню до одного, площа проекції полум'я на вертикальну поверхню, висота будинків, наявність автоматичних систем пожежогасіння, забезпеченість території пожежними підрозділами.

Проведемо аналіз кожного із перелічених показників.

Функціональне призначення будинку – показник, який характеризується призначенням будинку залежно від роду діяльності, яка в ньому здійснюється та зокрема наявності або відсутності виробничого процесу, а також тривалості перебування в будинку людей. З точки зору визначення протипожежних відстаней цей показник може бути виражений лише через величину пожежної навантаги [213].

Ступінь вогнестійкості будинку – показник, який встановлюється залежно від функціонального призначення будинку, категорії за вибухопожежної та пожежної небезпеки, умовної висоти (поверховості), площі поверху в межах протипожежного відсіку [214]. Категорії за вибухопожежною та пожежною небезпекою характеризуються видом та кількістю речовин та матеріалів, які обертаються у приміщеннях, площа протипожежного відсіку також може характеризуватися кількістю та способом розміщення речовин та матеріалів [215, 216]. Умовна висота

будинку з точки зору визначення протипожежних відстаней може бути виражена через площу проекції полум'я на вертикальну поверхню [217]. Таким чином, показник ступінь вогнестійкості будинку під час визначення протипожежних відстаней доцільно виражати через величину пожежної навантаги та через площу проекції полум'я на вертикальну поверхню [218].

Пожежна навантага – показник, який враховує кількісні та якісні характеристики горючих матеріалів, що обертаються в будинках та спорудах [219]. Цей показник має безпосередній вплив під час дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та елементами суміжних об'єктів, оскільки його значення впливає на потужність теплового випромінювання осередку горіння, а також можливість займання конструктивних елементів суміжного об'єкту, тому показник пожежна навантага повинен бути врахований під час обґрунтування протипожежних відстаней [220].

Слід відмітити, що в різних джерелах літератури зазначений критерій визначається різними одиницями вимірювання,  $\text{кг}/\text{м}^2$  [22], або  $\text{МДж}/\text{м}^2$  [20]. Проведемо порівняння цього критерію для таких горючих матеріалів як деревина, дизель, гідроген (таблиця 2.1) для рядів відповідно  $10 \text{ кг}/\text{м}^2$ ,  $25 \text{ кг}/\text{м}^2$ ,  $35 \text{ кг}/\text{м}^2$ ,  $75 \text{ кг}/\text{м}^2$  та  $200 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ,  $500 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ,  $1000 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ,  $2000 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ,  $4000 \text{ МДж}/\text{м}^2$ . При цьому, приймаємо, що під час згорання  $1 \text{ кг}$  деревини виділяється енергія близько  $15 \text{ МДж}$ ,  $1 \text{ л}$  дизельного палива – близько  $43 \text{ МДж}$ ,  $1 \text{ м}^3$  гідрогену – близько  $120 \text{ МДж}$  [30].

Таблиця 2.1

Порівняння пожежної навантаги за різними одиницями вимірювання залежно від виду горючого матеріалу

| Величина пожежної навантаги, $\text{кг}/\text{м}^2$ | Величина пожежної навантаги, $\text{МДж}/\text{м}^2$ залежно від виду горючого матеріалу |                 |          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|
|                                                     | Деревина                                                                                 | Дизельне паливо | Гідроген |
| 10                                                  | 150                                                                                      | 430             | 17226    |
| 25                                                  | 375                                                                                      | 1075            | 43165    |
| 35                                                  | 525                                                                                      | 1505            | 60431    |
| 75                                                  | 1125                                                                                     | 3225            | 129496   |

Із таблиці видно, що пожежна навантага в одиницях виміру  $\text{кг/м}^2$  для різних видів горючих речовин і матеріалів, здатна виділяти різну кількість тепла. Наприклад, ця різниця для деревини та дизеля складає майже в 4 рази, а для деревини та гідрогену майже на два порядки. З цього випливає висновок, що під час визначення протипожежних відстаней пожежну навантагу доцільно виражати в одиницях  $\text{Дж/м}^2$ , як кількість тепла, що виділяється під час згорання речовин і матеріалів, що обертаються на об'єкті.

Проаналізуємо ряд величини пожежної навантаги  $200 \text{ МДж/м}^2$ ,  $500 \text{ МДж/м}^2$ ,  $1000 \text{ МДж/м}^2$ ,  $2000 \text{ МДж/м}^2$ ,  $4000 \text{ МДж/м}^2$  для деревини (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2

Порівняння пожежної навантаги за різними одиницями вимірювання  
для деревини

| Величина пожежної навантаги, $\text{МДж/м}^2$ | Величина пожежної навантаги, $\text{кг/м}^2$ для деревини |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 200                                           | 13,3                                                      |
| 500                                           | 33,3                                                      |
| 1000                                          | 66,6                                                      |
| 2000                                          | 133,3                                                     |
| 4000                                          | 266,6                                                     |

Слід відмітити, що питома пожежна навантага  $25 \text{ кг/м}^2$  у перерахунку на деревину створює у вогневій камері розмірами  $4,6 \text{ м} \times 4,6 \text{ м}$  та висотою  $3 \text{ м}$ , продовж  $30 \text{ хв}$  температурний режим, що максимально наближений до стандартного температурного режиму [142]. Отже, ряд величини пожежної навантаги  $200 \text{ МДж/м}^2$ ,  $500 \text{ МДж/м}^2$ ,  $1000 \text{ МДж/м}^2$ ,  $2000 \text{ МДж/м}^2$ ,  $4000 \text{ МДж/м}^2$  починаючи із значення  $500 \text{ МДж/м}^2$  і більше здатний створювати у приміщеннях температурний режим, що відповідає стандартному температурному режиму (температури досягають значень близько  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ), що може створити умови для поширення пожежі на суміжні будинки та споруди. Виходячи із зазначеного запропоновано використати під час визначення протипожежних відстаней наступний ряд

пожежної навантаги за деревиною 5 кг/м<sup>2</sup>, 25 кг/м<sup>2</sup>, 100 кг/м<sup>2</sup>, що у перерахунку для деревини відповідає ряду 100 МДж/м<sup>2</sup>, 400 МДж/м<sup>2</sup>, 1500 МДж/м<sup>2</sup>. Слід відмітити, що згідно із [35], простір в якому пожежна навантага не перевищує значень 25 МДж/м<sup>2</sup> не підлягає оснащенню автоматичними системами пожежної сигналізації, тобто такі приміщення вважаються пожежобезпечними. Таким чином, класифікація будинків за величиною пожежної навантаги може бути представлена у вигляді, що наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

## Класифікація будинків за величиною пожежної навантаги

| Рівень небезпеки будинку | Пожежна навантага, МДж/м <sup>2</sup> |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Безпечні                 | ≤100                                  |
| Мало безпечні            | від 100 до 400 включно                |
| Небезпечні               | від 400 до 1500 включно               |
| Високо небезпечні        | >1500                                 |

Коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях – показник, що виражається у %, як відношення площі прорізів у відповідній зовнішній огорожувальній конструкції (в тому числі площі скління) до загальної площі такої конструкції (у Великобританії використовується ряд зазначеного показника 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 %, у США 5÷100 % - відповідно чим більший відсоток прорізу, тим більша протипожежна відстань). Показник площа прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях повинен бути врахований під час обґрунтування протипожежних відстаней [221].

Висота (поверховість) будинку – показник, що з точки зору визначення протипожежних відстаней може бути виражений через площу прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях [222].

Площа проекції полум'я на вертикальну поверхню – зазначений показник має безпосередній вплив під час дослідження процесів теплообміну між факелом пожежі та елементами суміжних об'єктів, оскільки його

значення виражається розміром проекції полум'я, що в свою чергу впливає на потужність теплового випромінювання осередку горіння [223]. Але цей показник залежить від площі прорізів у зовнішній огорожувальній конструкції, тому з точки зору визначення протипожежних відстаней зазначений показник може бути виражений через площу прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях [224].

Взаємне розташування будинків – показник, що враховує кут, під яким відбувається опромінювання будинку відносно осередку горіння [225]. Зазначений показник з точки зору визначення протипожежних відстаней може бути виражений через кутовий коефіцієнт опромінювання. Реалізація цього показника можлива лише під час використання уточнених методів визначення протипожежних відстаней, а для табличних даних достатньо врахувати найбільш несприятливе розташування будинків один відносно одного з огляду процесів теплообміну [226].

Автоматичні системи пожежогасіння – показник, який впливає та може бути виражений через тривалість опромінювання будинку від осередку пожежі.

Пожежні підрозділи – показник, що аналогічний показнику автоматичні системи пожежогасіння, який впливає та може бути виражений через тривалість опромінювання будинку від осередку пожежі.

Тривалість опромінювання будинку – показник, що впливає на можливість досягнення критичного значення одного із параметрів елемента суміжного об'єкту, а саме: критичне значення щільності теплового потоку  $q_{кр}$ , або температури займання  $T_{зм}$ .

Таким чином враховуючи вищесказане та результати роботи [49], найбільш значущими показниками, що впливають на визначення протипожежних відстаней є пожежна навантага, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання. При цьому, ці показники під час визначення протипожежної відстані повинні виражатися через критерій температурний  $T$ , а в якості порівняльного

критерію слід приймати температуру займання речовин і матеріалів  $T_{зм}$ . [227]. В таблиці 2.4 наведено перелік критеріїв та їх кількісні значення, які доцільно врахувати під час розроблення табличного методу щодо визначення протипожежних відстаней.

Таблиця 2.4

Критеріїв та їх кількісні значення, які доцільно врахувати під час розроблення табличного методу щодо визначення протипожежних відстаней

| Величина пожежної навантаги, $M_{дж}/м^2$ | Коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, % із урахуванням тривалості опромінювання, хв |       |     |                  |       |     |                  |       |     |          |       |     |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|------------------|-------|-----|------------------|-------|-----|----------|-------|-----|
|                                           | до 25 %                                                                                                    |       |     | від 25 % до 50 % |       |     | від 50 % до 90 % |       |     | від 90 % |       |     |
|                                           | <10                                                                                                        | 10÷60 | >60 | <10              | 10÷60 | >60 | <10              | 10÷60 | >60 | <10      | 10÷60 | >60 |
| до 100                                    |                                                                                                            |       |     |                  |       |     |                  |       |     |          |       |     |
| від 100 до 400                            |                                                                                                            |       |     |                  |       |     |                  |       |     |          |       |     |
| від 400 до 1500                           |                                                                                                            |       |     |                  |       |     |                  |       |     |          |       |     |
| від 1500                                  |                                                                                                            |       |     |                  |       |     |                  |       |     |          |       |     |

За результатами аналізування статистичних даних про пожежі та наслідків від пожеж [1, 2, 4] під час, яких вогонь поширювався на сусідні споруди встановлено, що мали місце такі найбільш характерні сценарії розвитку пожеж, коли опромінювання сусідніх будинків відбувалося: через прорізи в огорожувальних конструкціях; від фасадної частини будинку, що горить; від покрівлі, що горить, від відкритої технологічної споруди.

З урахуванням зазначеного розроблено опис сценаріїв розвитку пожеж під час, яких вогонь поширювався на сусідні споруди таблиця 2.5, які повинні першочергово обиратися під час постановки розрахункової задачі щодо визначення протипожежних відстаней між об'єктами [228].

Таблиця 2.5

Опис сценарії розвитку пожеж під час, яких вогонь поширювався на  
сусідні споруди

| №<br>п/п | Сценарій пожежі                                                   | Сценарій поширення пожежі                                                                              |
|----------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                 | 3                                                                                                      |
| 1.       | Пожежа відбувається в середині будинку                            | Опромінювання сусідніх споруд відбувається факелом полум'я через прорізи в огорожувальних конструкціях |
| 2.       | Пожежа відбувається у фасадній частині будинку                    | Опромінювання сусідніх споруд відбувається факелом полум'я від фасадної частини                        |
| 3.       | Пожежа відбувається у покрівлі будинку                            | Опромінювання сусідніх споруд відбувається факелом полум'я від покрівлі                                |
| 4.       | Пожежа відбувається у технологічній споруді, що розташована зовні | Опромінювання сусідніх споруд відбувається факелом полум'я від технологічної споруди                   |

Для дослідження взаємного впливу визначених у таблиці 2.4 критерії на значення протипожежних відстаней під час реалізації одного із сценаріїв можливої пожежі, що визначені у таблиці 2.5 необхідно дослідити процеси теплообміну між будинками за відповідними комбінаціями зазначених вище параметрів. Для цього пропонується використати математичну модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами газодинаміки та математичну модель процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами у сукупності із рівнянням променистого теплообміну [229]. Надалі розглянемо зазначені математичні моделі з точки зору можливості їх використання під час обґрунтування значень протипожежних відстаней. Порівняльні характеристики методів та математичних моделей щодо визначення протипожежних відстаней наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Порівняльні характеристики методів та математичних моделей щодо визначення протипожежних відстаней

| Характеристика розрахункового методу або математичної моделі | Назва розрахункового методу або математичної моделі |                                                                             |                                                   |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                                              | Табличний метод                                     | Модель у сукупності із рівнянням променистого теплообміну (спрощений метод) | Модель за методами газодинаміки (уточнений метод) |
| Визначення значення протипожежної відстані                   | +                                                   | +                                                                           | +                                                 |
| Альтернатива розпорядчому методу                             | -                                                   | +                                                                           | +                                                 |
| Можливість враховувати:                                      |                                                     |                                                                             |                                                   |
| - ступінь вогнестійкості будинку                             | +                                                   | -                                                                           | -                                                 |
| - пожежну навантагу                                          | -                                                   | +                                                                           | +                                                 |
| - конструктивні характеристики будинку                       | -                                                   | -                                                                           | +                                                 |
| - наявність автоматичних систем пожежогасіння                | -                                                   | -                                                                           | +                                                 |
| - наявність протипожежних перешкод                           | -                                                   | -                                                                           | +                                                 |
| Візуалізація                                                 | -                                                   | -                                                                           | +                                                 |

## 2.2 Математична модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за польовим методом

### 2.2.1 Загальна математична модель

Для розрахунку передачі тепла від факелу пожежі до конструктивних елементів та або матеріалів сусідніх споруд запропоновано використати обчислювальну гідродинамічну модель тепломасопереносу під час горіння, яка чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, в якій особлива увага приділяється теплопередачі під час пожежі.

Зазначена модель являє собою систему диференціальних рівнянь щодо збереження маси, імпульсу та енергії з частинними похідними [230] та вирішується на трьохвимірній регулярній сітці. Теплове випромінювання вирішується методом кінцевих об'ємів на цій самій сітці [231].

Математична модель описує просторово-часовий розподіл температури та швидкостей газового середовища (кисню, продуктів горіння тощо), тисків та густин.

Рівняння збереження маси може бути виражене через густину [230]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = \dot{m}_b^m, \quad (2.1)$$

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 2.1 можна записати для індивідуальних газових компонентів (закон збереження окремих компонентів), в такому випадку воно набуває вигляду [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_a) + \nabla \rho Y_a u = \nabla \cdot \rho D_a \nabla Y_a + \dot{m}_a^m + \dot{m}_{b,a}^m, \quad (2.2)$$

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 [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \nabla \cdot \rho u u + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (2.3)$$

де  $p$  – тиск,  $f_b$  – зовнішня сила, наприклад, такі як опір руху через каплі рідини,  $\tau_{ij}$  – тензор напруги визначається за формулою [230]:

$$\tau_{ij} = \mu(2S_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}(\nabla \cdot u)); \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (2.4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); i, j = 1, 2, 3 \quad (2.5)$$

де  $S_{ij}$  – симетричний тензор швидкості деформації,  $\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість

Рівняння збереження енергії може бути виражене через ентальпію ( $h_s$ ) [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s u = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}^m - \dot{q}_b^m - \nabla \dot{q}^n - \varepsilon, \quad (2.6)$$

де  $h_s$  – ентальпія є функцією температури,  $h_s = \sum_a Y_a h_{s,a}$ ,  $h_{s,a}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,a}(T') dT'$

$$\frac{Dp}{Dt} = \frac{dp}{dt} + u \nabla p \quad (2.7)$$

$\dot{q}^m$  – швидкість виділення тепла на одиницю об'єм із хімічної реакції;

$\dot{q}_e^m$  – витрачена енергія на випаровування крапель;

$\dot{q}^n$  – конвективні та радіаційні теплові потоки;

$\varepsilon$  – 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 ( $\dot{q}^n$ ) можна визначити за рівнянням [230]:

$$\dot{q}^n = -k \nabla T - \sum_a h_{s,a} \rho D_a \nabla Y_a + \dot{q}_r^n, \quad (2.8)$$

де  $k$  – теплопровідність.

Рівняння стану газу можна записати у вигляді [230]:

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (2.9)$$

де  $R$  – універсальна газова стала.

Рішення описаної вище математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами газодинаміки може реалізуватися в програмному комплексі Fire Dynamics Simulator (FDS) [232]. Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується програма Smokeview (SMV) [233, 234].

Основним алгоритмом є певна схема методу предиктора - коректора другого порядку точності по координатах температури і часу [235].

### 2.2.2 Модель горіння

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого палива. Горіння представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула  $C_xH_yO_z$  ( $C_6H_6O$ ). Теплоту згорання рідкого палива визначають за такою формулою [230]:

$$LHV_{liq,fuel} = h_{liq,fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x+y+16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x+y+16z}, \quad (2.10)$$

де  $h_{liq,fuel}^0$ ,  $h_{CO_2}^0$ ,  $h_{H_2O}^0$  – теплоти утворення, вуглекислого газу й води;

$x$ ,  $y$ ,  $z$  – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Газова фаза являє собою суміш із п'яти газів, тому основна система рівнянь 2.1, 2.3, 2.5 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 [230]:

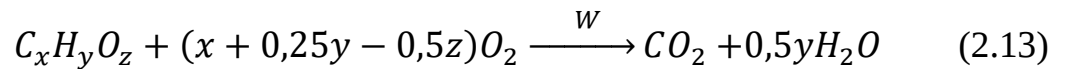
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho u Y_k) = \nabla \left( \left( \rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{chem}, \quad (2.11)$$

де  $Q_i^{chem}$  - дорівнює швидкості бруто-реакції газофазного горіння для першого рівняння летких, для інших – рівний нулю.

$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,in} - m_{i,out})_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}} \quad (2.12)$$

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

Модель горіння визначають й витратами палива, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням [230]:



Швидкість реакції  $W$  визначають за стехіометричним коефіцієнтом [230]:

$$i_{chem} = \frac{32(x+0,25y-0,5z)}{12x+y+16z} \quad (2.14)$$

### 2.2.3 Граничні умови

Оскільки диференціальні рівняння газодинамічної моделі описують процеси передачі тепла в загальному вигляді, то з метою відокремлення конкретного процесу, що розглядається та дати його повний математичний опис до диференціальних рівнянь додають математичний опис всіх особливостей процесу, що розглядається. Такі особливості, що спільно із диференціальними рівняннями дають повний математичний опис процесу

передачі тепла називаються граничними умовами і вони можуть включати в себе:

- геометричні умови, що характеризують форми і розміри об'єктів дослідження;
- фізичні умови, що характеризують фізичні властивості об'єктів дослідження [236];
- початкові умови, що характеризують розподіл температур в об'єкті дослідження в початковий момент часу;
- умови, що характеризують взаємодію об'єкта дослідження із навколишнім середовищем [237].

Основним завданням під час розроблення математичної моделі є максимальне наближення параметрів моделі до умов процесу, що досліджується та взаємозв'язків об'єктів, які беруть участь у зазначеному процесі а саме: відстані між об'єктами, масштаби об'єктів, матеріали об'єктів, параметри навколишнього середовища, пожежне навантаження об'єктів та їх реакції горіння, сценарій виникнення та продовження горіння тощо.

Під час математичного описання геометричних граничних умов задаються форма і лінійні розміри об'єкта дослідження у масштабі до відповідних місцевих умов та дотримуються відстані між об'єктами дослідження.

Під час математичного описання фізичних граничних умов задаються фізичні параметри об'єкта дослідження, характеристики пожежної навантаги.

Під час математичного описання початкових граничних умов задається опорна точка, до якої прив'язується системи координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  – ширина, довжина, висота) по якій задається розподіл температури тіла в початковий момент часу. В загальному вигляді початкові умови в аналітичному вигляді можна записати [230]:

$$t = f(x, y, z) \quad (2.15)$$

Під час рівномірного розподілу температури початкові умови (при  $\tau=0$ ) мають такий математичний вигляд [230]:

$$t = t_0 = \text{const} \quad (2.16)$$

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

Граничні умови першого роду. Задається розподіл температури на поверхні тіла для кожного моменту часу [230]:

$$\Theta_c = f(x, y, z, \tau), \quad (2.17)$$

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

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

Аналітично це можна представити таким чином [230]:

$$q_n = f(x, y, z, \tau), \quad (2.18)$$

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

У найпростішому випадку щільність теплового потоку по поверхні і в часі залишається незмінною [230]:

$$q_n = q_0 = \text{const} \quad (2.19)$$

Граничні умови третього роду. При цьому задаються температура навколишнього середовища  $t_{\text{ж}}$  і закон теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Гранична умова третього роду характеризує закон теплообміну між поверхнею і навколишнім середовищем в процесі охолодження і нагрівання тіла. Для опису процесу теплообміну між поверхнею тіла і середовищем використовується закон Ньютона-Рихмана.

Відповідно до закону Ньютона - Рихмана кількість теплоти, що віддається одиницею поверхні тіла в одиницю часу, пропорційно різниці температур поверхні тіла  $t_c$  і навколишнього середовища  $t_{ж}$  ( $t_c > t_{ж}$ ) [230]:

$$q = \alpha (t_c - t_{ж}), \quad (2.20)$$

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

Коефіцієнт пропорційності  $\alpha$  характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Чисельно він дорівнює кількості теплоти, що виділяє або сприймає одиниця поверхні в одиницю часу за 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 [230]:

$$\alpha(t_c - t_{ж}) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c, \quad (2.21)$$

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 [230]:

$$\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_c - t_{ж}) \quad (2.22)$$

Рівняння (2.22) по суті є вираженням закону збереження енергії для поверхні тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від великої кількості факторів. Однак у багатьох випадках коефіцієнт тепловіддачі можна вважати незмінним.

Зустрічаються випадки, коли всі з перерахованих граничних умов задати неможливо, і тоді для визначення теплової взаємодії між тілами 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 [230]:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left( \frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma + q_v (x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau); \\ t_1 (x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2 (x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases}; \quad (2.23)$$

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 [230]:

$$\begin{cases} \lambda_1 \left( \frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_\Gamma = \lambda_2 \left( \frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_\Gamma; \\ t_1 (x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) = t_2 (x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma, \tau) \end{cases}; \quad (2.24)$$

#### 2.2.4 Числова апроксимація

Розв'язок 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 мають вигляд [230]:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST, \quad (2.25)$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)} (CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h (DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST, \quad (2.26)$$

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 ребра й вершини осередку);

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

Унаслідок проведення низки послідовних ітерацій, отримаємо значення аналізованих функцій у певний момент 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 теплопередачі від об'єкту, що горить на матеріали суміжного об'єкту за рахунок чого можна обґрунтовано визначити параметричним шляхом мінімально необхідні протипожежні відстані між такими об'єктами.

Процедура вирішення польової математичної моделі тепломасопереносу під час горіння може бути представлена в такому вигляді. FDS використовує кінцево-різницеві наближення другого порядку точності для головних рівнянь (2.1, 2.3, 2.5) 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 клітинки сітки в початковий момент часу розраховуються параметри щільність, масова доля речовин, швидкостей компонентів та тиску з подальшим розрахунком цих параметрів в наступний момент часу, наприклад із кроком Ейлера. Потім відбувається обмін величинами на границях сітки із використанням граничних умов та вичислюється їх дивергенція порівнюючи із граничними умовами.

### 2.2.5 Модель турбулентності

Для визначення динамічної в'язкості ( $\mu$ ) застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і

флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Ці способи визначення динамічної в'язкості називають моделями турбулентності. Найбільше поширення має стандартна  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. Згідно з цією моделлю, динамічну в'язкість визначають за виразом [184]:

$$\mu = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.27)$$

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 [184]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.29)$$

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

Турбулентність моделюється за допомогою моделі Смагоринського "Масштабне моделювання вихрів" (LES). Пряме чисельне моделювання (DNS) можна виконувати, якщо закладена в основі розрахункова сітка досить точна. Масштабне моделювання вихрів - режим роботи за умовчанням.

## 2.2.6 Променистий теплообмін

Для обліку променистого теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання

газу. Ця модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням [184]:

$$\nabla \left( \frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0 \quad , \quad (2.30)$$

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 [184]:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (2.31)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (2.32)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.33)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j), \quad (2.34)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана – Больцмана;

$T_{pj}$  – температура  $j$  – тої частки;

$N_j$  – кількість часток у комірці;

$\varepsilon_p$  – ступінь чорноти часток.

### 2.2.7 Моделювання потоків та частинок

Для врахування тепломасопереносу під час пожежі застосовується метод частинок Лагранжа [207]. Згідно із цим методом положення частинки можна описати таким рівнянням [207]:

$$\frac{dx_p}{dt} = u \quad (2.35)$$

Положення частинок визначається за допомоги процедури чисельного інтегрування за схемою метода «предиктор-коректор». Вектор положення частинок визначається [207]:

$$x_p^{(n+1)e} = x_p^n + \delta t \bar{u}^n, \quad (2.36)$$

$$x_p^{n+1} = 0,5(x_p^n + x_p^{(n+1)e} + \delta t \bar{u}^{(n+1)e}) \quad (2.37)$$

Передача теплової енергії шляхом випромінювання визначаються за формулою [207]:

$$x_f = \frac{1}{\delta \Omega^l} \int_0^{\mu^l} \int_0^{\mu^l} \int_{\mu_{d,0}}^{\mu_{d,\pi}} \frac{P_0(\theta_d)}{(1-\mu^2)(1-\mu'^2) - (\mu_d - \mu\mu')^2} d\mu_d d\mu d\mu', \quad (2.38)$$

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

$P_0(\theta_d)$  – фазова функція розсіювання одної краплини [207]:

$$\mu' = \cos(\theta^l) = 1 - \frac{2}{N_\Omega} \quad (2.39)$$

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

Границя інтегрування  $\mu^l$  визначається за формулою [207]:

$$\mu' = \cos(\theta^l) = 1 - \frac{2}{N_\Omega} \quad (2.40)$$

Границі внутрішнього інтеграла визначаються за формулами [207]:

$$\mu_{d,0} = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu'^2}; \mu_{d,0} = \mu\mu' - \sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu'^2} \quad (2.41)$$

Спочатку розраховується температура частинок, а потім 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 [207]:

$$\frac{dm_l}{dt} = -Ah_m\rho(Y_l - Y_g); \quad (2.42)$$

$$m_l c_l \frac{dT_l}{dt} = Ah(T_g - T_l) + Ah(T_s - T_l) + q_r + \frac{dm_l}{dt} h_v \quad (2.43)$$

Останнє рівняння в апроксимованому вигляді за методом кінцевих різниць записується у вигляді [207]:

$$\frac{T_l^{n+1} - T_l^n}{\delta t} = \frac{1}{m_l c_l} \left[ Ah \left( T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) - Ah_m \rho \left( \frac{Y_l^{n+1} + Y_l^n}{2} - Y_g \right) h_v \right] \quad (2.44)$$

Рівноважна масова фракція  $Y_l$  є функція температури і визначається за виразом [207]:

$$Y_l = \frac{X_l}{X_l \left( 1 - \frac{W_a}{W_l} \right) + W_a / W_l}, X_l = \exp \left( \frac{h_v W_l}{R} \left[ \frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l} \right] \right) \quad (2.45)$$

Для апроксимації останніх рівнянь використовується вираз [207]:

$$Y_l^{n+1} \approx Y_l^n + \left( \frac{dY_l}{dT_l} \right)^n (T_l^{n+1} - T_l^n) \quad (2.46)$$

Тут похідна  $\frac{dY_l}{dT_l}$  визначається такими послідовними обчисленнями [207]:

$$\frac{dY_l}{dT_l} = \frac{dY_l}{dX_l} \frac{dX_l}{dT_l} = \frac{W_a/W_l}{\left(X_l\left(1-\frac{W_a}{W}\right)+W_a/W\right)^2} \frac{h_v W_l}{R T_l^2} \exp\left(\frac{h_v W_l}{R} \left[\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_l}\right]\right) \quad (2.47)$$

Кількість тепла складає [207]:

$$\delta q = \delta t A h \left( T_g - \frac{T_l^{n+1} + T_l^n}{2} \right) \quad (2.48)$$

### **2.3. Математична модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами теплопередачі у сукупності із рівнянням променистого теплообміну**

#### **2.3.1 Загальна математична модель**

Для розрахунку передачі тепла від факелу пожежі до конструктивних елементів та або матеріалів сусідніх споруд також можна використати математичну модель теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами теплопередачі у сукупності із рівнянням променистого теплообміну.

При розв'язку інтегрального рівняння променистого теплообміну визначається температура на поверхнях розрахункових областей об'єктів і тому для кожної області на кожному кроці вирішення задачі теплопровідності прикладаються граничні умови I роду [238, 239].

Математичну модель теплопередачі, яка заснована на використанні нестационарного рівняння теплопровідності можна записати у вигляді рівняння [239]:

$$c_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (2.49)$$

де  $\theta$  - температура, °C;

$t$  – час, с

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C);

$C_p$  – питома теплоємність, Дж/(кг·°C);

$\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>.

### 2.3.2 Променистий теплообмін

Променистий теплообмін між відповідними поверхнями можна врахувати шляхом вирішення інтегрального рівняння, що має такий вигляд [239]:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (2.50)$$

де  $\delta_{ij}$  – параметр, який дорівнює 0, якщо  $i \neq j$ , і дорівнює 1, якщо  $i = j$ ;

$q_j$  – поверхневий тепловий потік через  $i$ -ту поверхню, яка обмінюється випромінюванням з  $j$ -тою поверхнею;

$\varphi_{ij}$  – променеві форм-фактори, залежні від взаємного розташування  $i$ -тої і  $j$ -тої площ поверхонь, які обмінюються випромінюванням, і визначаються, як [239]:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (2.51)$$

$\beta$  – кут між нормаллю до елемента і лінією, яка з'єднує елементи  $i$  та  $j$ ;

$r$  – відстань між центрами елементів  $i$  та  $j$ .

Схема визначення форм-факторів представлена на рисунку 2.1.

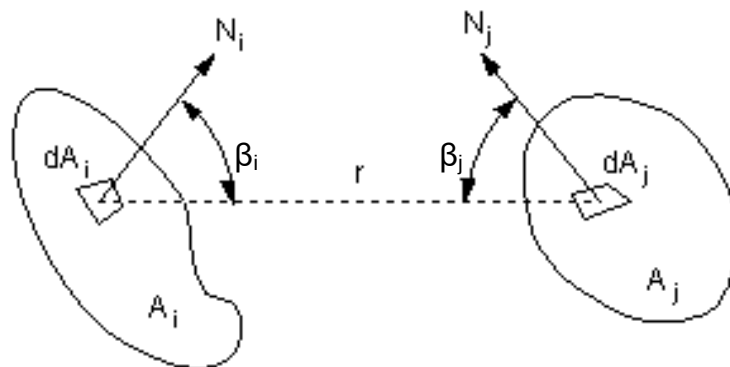


Рисунок 2.1 – Схема визначення форм-факторів

### 2.3.3 Граничні умови

Граничні умови, які встановлюються записуються у такому вигляді [240, 229]:

Граничні умови другого роду [229]:

$$\lambda \left. \frac{\partial T_{pj}}{\partial r_j} \right|_{r_j} = Q_j \quad (2.52)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$\theta_{x,z}, \theta_s$  – відповідно температури оточуючого середовища і поверхонь, що беруть участь у теплообміні, °C;

$r$  – поточна просторова координата, м.

### 2.3.4 Розв'язок рівняння теплопровідності

Для розв'язку рівняння теплопровідності його апроксимують при цьому використовується обчислювальний алгоритм за методом кінцевих елементів застосовується вираз, що має такий вигляд [240, 207]:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (2.53)$$

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;

$$[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix} - \text{матриця теплопровідності матеріалу у різних}$$

напрямках;

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

$\{Q_e\} = qW \int_s \{N\} dS$  – 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 (2.52) [240, 217]:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \quad (2.54)$$

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

В узагальненому вигляді вираз (2.53) можна записати [240, 207]:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_e\}, \quad (2.55)$$

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

Дана система має нелінійні рівняння та вирішується за допомогою ітераційного методу Ньютона - Рафсона [240]. Під час використання цього методу мінімізується неузгодженість [240, 217]:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \rightarrow \min. \quad (2.56)$$

Метод Ньютона - Рафсона використовує у своїй основі скорочених рядів Тейлора для визначення остаточного вектора неузгодженості. За умов застосування такого підходу система рівнянь (2.52) стає лінійною та записується у вигляді [240, 207]:

$$\left[ K_T^{(i-1)} \right] \{ \Delta \theta_e^{(i)} \} = \{ Q^{(i)} \} - \{ P^{(i)} \}. \quad (2.57)$$

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 [240, 207]:

$$\{ \theta^{(i)} \} = \{ \theta^{(i-1)} \} + \{ \Delta \theta^{(i)} \}. \quad (2.58)$$

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

Коефіцієнти дотичної матриці  $[K_T]$  у рівнянні (2.56) визначаються, як [240, 207]:

$$\left[ K_T^{(i-1)} \right] \equiv \left( \frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}} \right)_{i-1}. \quad (2.59)$$

Після розкладання вектору  $\{\Phi\}$  у скорочений ряд Тейлора вираз для його визначення має вигляд [240, 207]:

$$\{ \Phi^{(i)} \} \cong \{ \Phi^{(i-1)} \} + \left[ K_T^{(i-1)} \right] \{ \Delta \theta^{(i)} \}, \quad (2.60)$$

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

Рівняння (2.56) має складові, що визначаються як:

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

$\{ \bar{P} \}$  – еквівалентний вектор вузових 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 [240, 207]:

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n(1 - \zeta)\{\dot{\theta}_n\} + \Delta t_n\zeta\{\dot{\theta}_{n+1}\}, \quad (2.61)$$

де  $\Delta t_n$  – крок інтегрування за часом;

$\zeta$  - параметр Ейлера, який дорівнює 0,5. У данному випадку застосовується неявна обчислювальна схема Кранка - Ніколсона.

Еквівалентна матриця теплопровідності  $[K]$  визначається з рівняння [240, 207]:

$$[K] = \frac{1}{\zeta\Delta t_n} [C_e] + [K_e], \quad (2.62)$$

Для визначення матриці  $\{Q(\theta)\}$  на поточному кроці інтегрування за часом використовується вираз [240, 207]:

$$\{Q_n(\theta)\} = \{Q_e\} + \frac{1-\zeta}{\zeta} [C_e] \{[\dot{\theta}]_n\} - [K_e]\{Q_n\}. \quad (2.63)$$

Під час аналізу задачі теплопереносу [241, 242] за рахунок випромінювання для інтегрування рівняння (2.47) був застосований метод ефективного теплового потоку випромінювання [243]. Для цього застосований узагальнений закон Стефана-Больцмана [240, 244]:

$$\sum_{j=1}^N \left[ \delta_{ij} - (1-\varepsilon_i)\varphi_{ij} \right] \cdot q_j^0 = \varepsilon_i \sigma \theta_i^4, \quad (2.64)$$

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

На основі обчислення ефективного теплового потоку випромінювання, визначається тепловий потік поверхні матеріалів кінцевих елементів, на який потрапило задане випромінювання за формулою [240, 207]:

$$q_i = q_j^0 - \sum_{j=1}^N \varphi_{ij} q_i^0 \quad (2.65)$$

З врахуванням усієї сукупності поверхонь матеріалів кінцевих елементів, які обмінюються випромінюванням, складається система нелінійних рівнянь у матричній формі, що має наступний вигляд [240, 207]:

$$[G]\{q^0\} = \{S\} \quad (2.66)$$

Компоненти матриці  $[G]$  визначаються за формулою [240, 207]:

$$G_{ij} = \delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i) \phi_{ij}, \quad (2.67)$$

А компоненти матриці  $\{S\}$  обчислюються за формулою [240, 207]:

$$S_{ij} = \varepsilon_i \sigma \theta^4. \quad (2.68)$$

Система рівнянь (2.52) вирішується для кожної площі поверхні, що бере участь у теплообміні випромінюванням за методом ітерацій відповідно до схеми, яка описується рівнянням [240, 207]:

$$q_i^n = \psi q_i^{k+1} + (1 - \psi) q_i^k, \quad (2.69)$$

де  $\psi$  - релаксаційний коефіцієнт ефективного променистого теплового потоку;

$k$  – номер ітерації.

### **2.3.5 Узагальнення процедур щодо створення математичної моделі за методами променистого теплообміну**

Процедура вирішення математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами теплопередачі у сукупності із рівнянням променистого теплообміну може бути представлена в такому вигляді:

1. Будуються геометричні моделі з прикладанням граничних умов.
2. Організовується цикл в ході якого змінюється час впливу пожежі.
3. Визначається час теплового впливу пожежі.

4. Під час розгляду різних сценаріїв пожежі змінюється тип впливу пожежі у залежності від положення факелу пожежі.

## **2.4 Висновки за розділом**

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Обґрунтовано перелік параметрів, які мають найбільші значення під час визначення протипожежних відстаней, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, тривалість опромінювання.

2. Запропоновано класифікацію будинків за величиною пожежної навантаги, яка визначається такими рівнями: безпечні, малобезпечні, небезпечні, високобезпечні із відповідними значеннями пожежної навантаги (МДж/м<sup>2</sup>): до 100, 100÷400, 400÷1500, більше 1500.

3. Обґрунтовані сценарії виникнення та розвитку пожеж, під час яких може мати місце поширення вогню на сусідні будинку та споруди, а саме: пожежа відбувається в середині будинку, пожежа відбувається у фасадній частині будинку, пожежа відбувається у покрівлі будинку, пожежа відбувається у технологічній споруді, що розташована зовні.

4. Показано, що в якості основного критерію безпеки поширення пожежі на суміжний об'єкт є температура займання матеріалу даного суміжного об'єкту, що дозволяє комплексно врахувати параметри та сценарій її перебігу.

5. Запропоновано в подальших дослідженнях під час визначення протипожежних відстаней застосовувати ієрархічну структуру розрахункових методів, що включає в себе, як спрощені, так і уточнені методи, що забезпечує гнучкість розрахункових процедур.

6. Показано, що найбільш універсальним та таким, що може враховувати найбільшу кількість особливостей пожежі на об'єкті для обґрунтування протипожежних відстаней є уточнений метод, який

заснований на використанні польових моделей та засобів обчислювальної газодинаміки.

### **РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ФАКЕЛА ПОЖЕЖІ НА ЕЛЕМЕНТИ СУМІЖНИХ ОБ'ЄКТІВ**

#### **3.1 Моделювання процесів теплового впливу під час пожежі на АЗС та суміжних житлових будинках**

З метою перевірки відповідності запропонованих математичних моделей реальним процесам, проведено їх валідацію, шляхом оцінювання протипожежної відстані між висотним житловим будинком та автозаправним комплексом. Нормоване значення протипожежної відстані, що встановлено чинними державними будівельними нормами між такими об'єктами повинна становити 40 м.

Валідація є одним із основних принципів, які забезпечують надійність розрахункових методів [245]. Така, процедура дозволяє потенційному користувачеві розрахункових методів впевнитися, що методи розрахунку забезпечують досить точні прогнози.

Валідація дозволяє перевірити розрахункові методи на здатність відтворювати реальні процеси. Тобто дозволяє переконатися, що результати відповідають даним, очікуваним в реальності [246].

Основні положення до валідації методів розрахунку наведено у міжнародному стандарті [244]. Відповідно до цього стандарту процедура валідації необхідна, щоб встановити діапазон застосування методу розрахунку і визначити точність методу розрахунку (ступінь, в якій метод розрахунку відповідає реальності) в прийнятному діапазоні. У стандарті ISO 16730-1 передбачено дві процедури, кожна з яких може супроводжуватися валідацією.

##### **3.1.1 Загальний опис об'єкту**

Висотний житловий будинок з об'єктами громадського призначення та дитячим дошкільним закладом та автозаправний комплекс. На рисунку 3.1 наведено ситуаційний план розташування вищезазначених об'єктів.

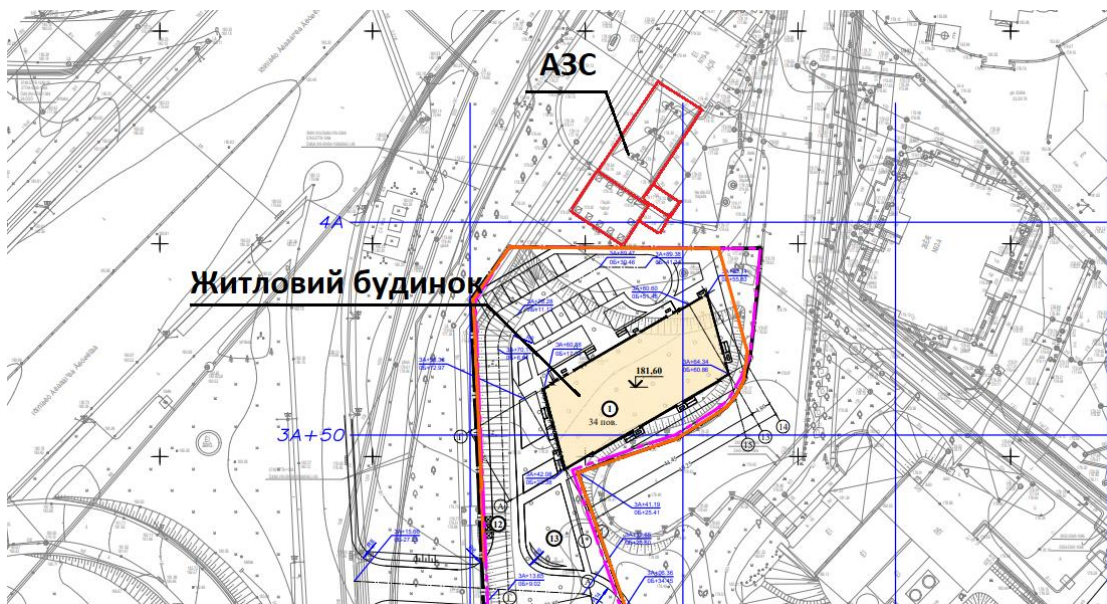


Рисунок 3.1 – Ситуаційний план розміщення об'єктів

Висотний будинок, з умовною висотою 73,5 м має I ступінь вогнестійкості, стіни виконані із кремнегранітних блоків та облицьовані зовнішнім негорючим утеплювальним матеріалом (мінвата, за пожежною класифікацією відповідає класу негорючий матеріал), товщиною 160 мм. На першому поверсі будівлі знаходяться 5 приміщень громадського призначення із площами 102,10 м<sup>2</sup>, 101,67 м<sup>2</sup>, 90,16 м<sup>2</sup>, 69,98 м<sup>2</sup> та 112,05 м<sup>2</sup>.

Автозаправний комплекс складається із пункту заправки автотранспорту, магазину роздрібної торгівлі та пункту приймання палива. Ділянки пунктів заправки автотранспорту та пункту приймання палива обладнано пристроєм збору поверхневих вод та збору аварійного проливу палива із автоцистерни. На ділянці території пункту приймання також розміщені клапани скиду парів бензину під час зливу палива в резервуари.

Наявна відстань між об'єктами, що розглядаються, а саме житлового будинку та поля оглядових люків та дихальної арматури підземних сховищ АЗС становить 20 м.

### 3.1.2 Сценарій аварійної ситуації

У числі аварійних ситуацій, настання яких імовірно на даному об'єкті, має бути розглянуті найбільш небезпечні сценарії виникнення та розвитку

пожежі, як на автозаправному комплексі так і у внутрішньому просторі висотного житлового будинку.

*Перший сценарій аварійної ситуації.* Розглядається пожежа на автозаправному комплексі в результаті порушення технологічного процесу. За прийнятим сценарієм аварії, під час переливу палива (бензин А-95) із авто-бензовоза до підземних резервуарів автозаправного комплексу сталася розгерметизація рукавної лінії та, як наслідок, розлив палива загальним об'ємом 5000 л на всю площу ділянки зливу палива ( $S = 47,25 \text{ м}^2$ ). На рисунку 3.2 приведена ситуаційна схема пожежі (заштриховано червоним кольором) [247].

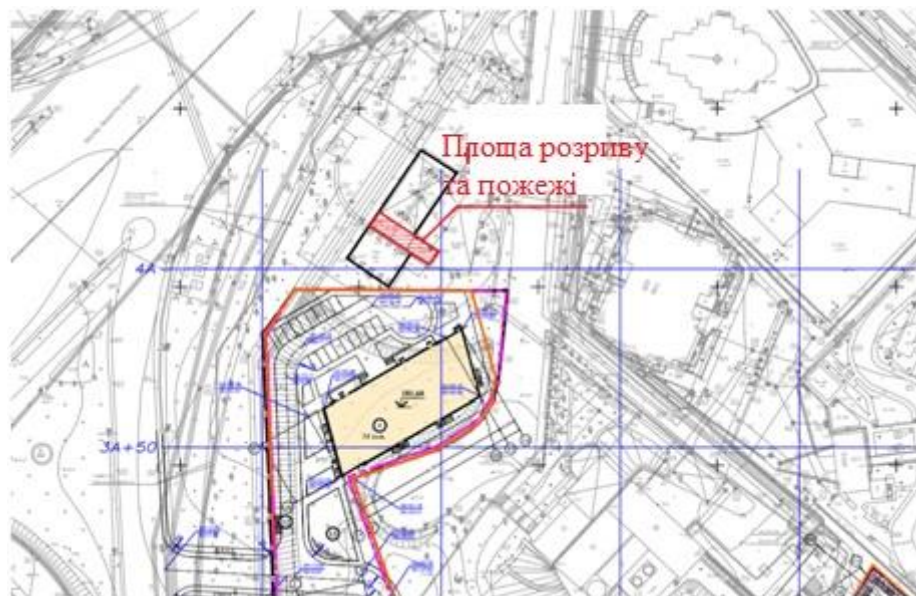


Рисунок 3.2 – Ситуаційна схема пожежі на автозаправному комплексі за першим сценарієм аварії

Розрахункова тривалість вільного горіння пожежі до моменту початку її локалізації та гасіння на автозаправному комплексі складає 10 хв. Дана тривалість вільного розвитку пожежі обґрунтована часом нормативного прибуття пожежно-рятувальних підрозділів для міста згідно [248].

*Другий сценарій аварійної ситуації.* Розглядається пожежа на першому поверсі в середині житлового будинку в приміщенні найбільш близько розташованого відносно території заправного комплексу. За результатом

аналізу проектної документації та об'ємно-планувальних рішень, обрано приміщення громадського призначення №1 із загальною площею 102,1 м<sup>2</sup>. Фасадна сторона приміщення виходить на заправний комплекс, при цьому між будинком та автозаправним комплексом на відстані 20 м знаходяться клапани скиду парів бензину під час зливу палива в резервуари, термічний вплив на які є небезпечним. Розрахункова тривалість вільного горіння пожежі до моменту початку її локалізації та гасіння в приміщенні громадського призначення №1 житлового будинку також складає 10 хв.

За результат моделювання пожежі приймається той сценарій, за яким показники небезпечних чинників пожежі (тепловий потік та температура) мають найбільше значення впливу на той чи інший об'єкт дослідження.

### **3.1.3 Розрахункові схеми**

Під час побудови розрахункової схеми прийняті такі основні положення та припущення:

- температурний вплив імовірної пожежі оцінюється шляхом моделювання теплопереносу тільки за рахунок теплового випромінювання, оскільки при наявних умовах перенос тепла за рахунок конвекції має незначний вклад [249, 250];
- математична модель теплопередачі має у своїй основі рівняння теплопровідності з одночасним застосуванням інтегрального рівняння променистого теплообміну;
- джерелом тепла при тепловому впливі пожежі є її факел, що має сталу геометричну форму і має сталу температуру;
- форма факела горіння бензину має конічну форму, при цьому контур основи конуса повторює контур майданчика розвантаження бензовоза на АЗС, висота факелу є вдвічі більшою за еквівалентний радіус кругової площі горіння [244, 246];
- форма факелу пожежі у житловому будинку має форму прямокутної призми, висота факелу обмежується трьома поверхами будинку [251];

- основними критеріями, що визначають виникнення пожежі у будинку як наслідок теплового впливу пожежі на АЗС є досягнення температурного значення спалахування тканини штор поблизу віконних отворів та критичного значення густини теплового потоку на даній тканині [252];

- основним критерієм, що визначає виникнення пожежі на АЗС, як наслідок теплового впливу пожежі у будинку є температурного значення спалахування парів бензину на полі дихальної арматури та оглядових люків АЗС [253 – 255].

- вважається що прозоре огороження отворів будівлі не впливає на послаблення теплового потоку що прямує з осередку пожежі [256, 257].

З огляду на прийняті положення побудовані розрахункові схеми для обох сценаріїв пожежі рисунок 3.3.

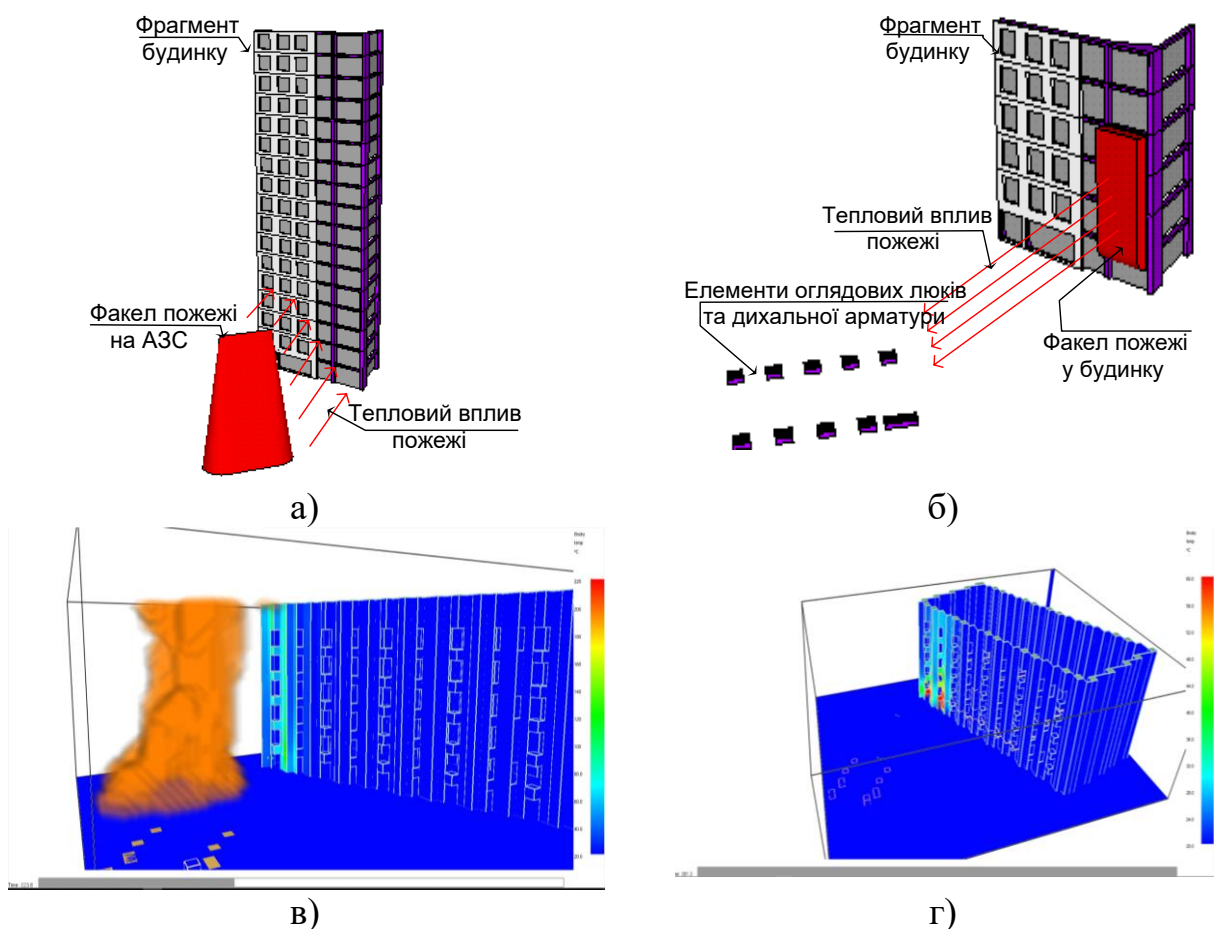


Рисунок 3.3 – Розрахункові схеми впливу пожежі: а – на АЗС б – у будинку для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності; в – на АЗС г – у будинку для польової моделі

Розміри фрагменту будівлі вибиралися з огляду на ефект затемнення деяких областей будинку для випромінювання факелу, а також можливості суттєвого теплового впливу. Таким чином для першого сценарію розглядається фрагмент із 17 поверхами, а для другого – фрагмент із 6 поверхами.

Висота факелу для сценарію пожежі на АЗС визначалася за формулою [257]:

$$H = 4 \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = 15,52 \text{ м}, \quad (3.1)$$

де  $a = 10,5$  м,  $b = 4,5$  м – довжина та ширина майданчику розвантаження бензовозу на АЗС

Параметри призми факелу пожежі у будинку приймалися конструктивно та з врахуванням рекомендацій [30, 249, 256] за висотою трьох поверхів та шириною найбільшого отвору найближчого краю фрагменту будівлі - відповідно 6,9 м та 4,8 м. Товщина факелу взята з огляду на численні спостереження та результати досліджень, наведених у роботі [30].

Для побудування розрахункової схеми прийняті початкові параметри, які наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Початкові параметри для побудування розрахункових схем

| Температура факела пожежі на АЗС [254], К (°С) | Температура факела пожежі у будинку [30], К (°С) | Початкова температура, К (°С) |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1150 (877)                                     | 923 (650)                                        | 293 (20)                      |

### 3.1.4 Теплофізичні властивості матеріалів

При побудуванні моделі будівлі розглядається три типи матеріалів – цегляна кладка для стін, залізобетон для каркасу будівлі, бавовняна тканина (як найбільш небезпечна) [258]. При побудуванні моделі поля оглядових люків та дихальної арматури використовується залізобетон та сталь [259]. Теплофізичні властивості матеріалів наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

#### Теплофізичні характеристики матеріалів

| Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)                                                                 | Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)                                                                                                                                                         | Густина, кг/м <sup>3</sup> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Важкий бетон на гранітному заповнювачі EN 1992-1-2:2012 [204]                                                              |                                                                                                                                                                                                                                         |                            |
| $2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left( \frac{\theta}{100} \right)^2$                                               | 900ρ при 20 °С ≤ θ ≤ 100 °С,<br>(900+(θ- 100))ρ при 100°С < θ ≤ 200°С,<br>(1000+0,5(θ-100))ρ при 200°С < θ ≤ 400°С,<br>1100ρ при 400°С < θ ≤ 1200°С                                                                                     | 2300                       |
| Кладка з керамічної цегли EN 1996-1-2:2012 [258]                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                         |                            |
| 0,42· при 0 °С ≤ θ ≤ 20 °С,<br>$0,42+4,7 \cdot 10^{-3}(\theta - 50)$ при 20°С < θ ≤ 200°С,<br>1,26 при 200°С < θ ≤ 1200 °С | 564ρ при 20 °С ≤ θ ≤ 100 °С,<br>(1,1·10 <sup>4</sup> +13,5(θ- 100))ρ при 100 °С ≤ θ ≤ 200 °С,<br>(2,8·10 <sup>3</sup> +3,9(θ- 100))ρ при 200 °С ≤ θ ≤ 1200 °С.                                                                          | 825                        |
| Бавовняна тканина [243]                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                         |                            |
| 0,053                                                                                                                      | ρ·1000                                                                                                                                                                                                                                  | 240                        |
| Сталь EN 1993-1-2:2012 Eurocode 3 [260]                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                         |                            |
| 54 – 3,33·10 <sup>-2</sup> θ при 20 °С ≤ θ ≤ 800 °С,<br>27,3 при θ > 800 °С.                                               | 425+0,773θ - 1,69 10 <sup>-2</sup> θ <sup>2</sup> +2,22 10 <sup>-6</sup> θ <sup>3</sup> при 20 °С ≤ θ ≤ 600 °С,<br>666–13002/(θ -738) при 600°С < θ ≤ 735°С,<br>545+17820/(θ -731) при 735°С < θ ≤ 900°С,<br>650 при 900°С < θ ≤ 1200°С | 7850                       |

### 3.1.5 Граничні умови

При розв'язку інтегрального рівняння променистого теплообміну [261] визначається температура на поверхнях розрахункових областей об'єктів і тому для кожної області на кожному кроці вирішення задачі теплопровідності прикладаються граничні умови II роду [262].

Для розв'язку інтегрального рівняння [263] променистого теплообміну мають бути задані ступені чорноти поверхонь матеріалів [142]. Значення ступенів чорноти матеріалів наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Ступені чорноти матеріалів

| Ступень чорноти<br>поверхні матеріалів<br>будівлі | Ступень чорноти поверхні<br>елементів АЗС | Ступень чорноти<br>факелу пожежі |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| 0.8                                               | 0.8                                       | 1                                |

Обчислення проводяться за умов виконання таких процедур:

- будується геометрична модель з прикладанням граничних умов відповідно до рисунку 3.3;
- організовується цикл в ході якого змінюється час впливу пожежі;
- час теплового впливу пожежі складає 10 хв, оскільки попередній розрахунок показав, що тепловий процес за даний час встановлюється;
- розрахунок повторюється для випадку з іншим сценарієм теплового впливу від пожежі;
- при розгляді різних сценаріїв пожежі змінюється тип впливу пожежі у залежності від положення факелу пожежі.

Для реалізації такого алгоритму створені кінцево-елементні схеми, які наведені на рисунку 3.4.

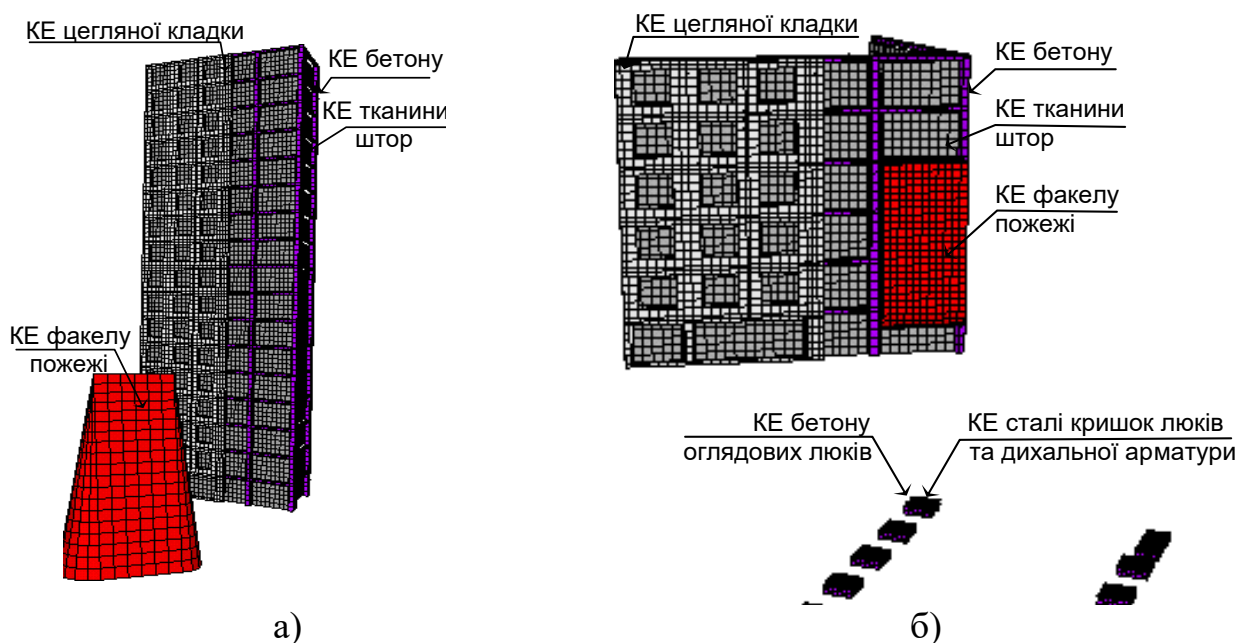


Рисунок 3.4 – Кінцево-елементні схеми теплової взаємодії: а) між факелом пожежі на майданчику АЗС для розвантаження бензовозу та житлового будинку; б) між факелом пожежі у житловому будинку та елементами поля оглядових люків та дихальної арматури підземних резервуарів для палива АЗС

Під час реалізації обчислювального процесу прийняті параметри алгоритму чисельного інтегрування, що подані у таблиці 3.4 [264].

Таблиця 3.4

Параметри обчислювального процесу

| Параметр обчислювального процесу      | Одиниці виміру | Значення       |
|---------------------------------------|----------------|----------------|
| 1                                     | 2              | 3              |
| Тип аналізу                           |                | Нестационарний |
| Автоматичний вибір кроку інтегрування |                | Включений      |
| Часовий крок інтегрування             | с (хв)         | 60 (1)         |
| Найменший часовий крок                | с              | 10             |
| Найбільший часовий крок               | с              | 60             |
| Максимальна кількість ітерацій        |                | 1000           |

Продовження таблиці 3.4

| 1                               | 2   | 3            |
|---------------------------------|-----|--------------|
| Спосіб прикладання навантаження |     | Ступінчастий |
| Тип обчислювальної схеми        |     | Неявна       |
| Просторовий крок (середній)     | м   | 0,8          |
| Точність збіжності обчислень    | (%) | 0.005 (0,5)  |

### 3.1.6 Методика оцінки можливості поширення пожежі

Можливість поширення пожежі на житловий будинок (за першим сценарієм) визначається як імовірність займання тканини штор у наслідок теплової дії факелу пожежі на АЗС. При цьому така імовірність з'являється при досягненні критичних значень температури та теплового потоку на кінцевих елементах, відповідних тканині штор. Можливість поширення пожежі на дихальну арматуру підземних резервуарів АЗС (за другим сценарієм) визначається як імовірність займання парів бензину над люками та дихальною арматурою внаслідок теплової дії факелу пожежі у житловому будинку. При цьому така імовірність з'являється при досягненні критичних значень температури на кінцевих елементах люків та дихальної арматури.

У таблиці 3.5 наведені критичні значення вибраних критеріїв, що визначають можливість поширення пожежі.

Таблиця 3.5

Критичні значення критеріїв можливості виникнення пожежі на  
об'єктах

|                                                                  |                                                                                                                    |                                                   |                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Температура<br>займання хлоп-<br>бумажної тканини<br>[36],<br>°C | Критична густина<br>теплового потоку<br>для будівель І-ІІ<br>ступеня<br>вогнестійкості<br>[30], кВт/м <sup>2</sup> | Температура<br>займання парів<br>бензину [36], °C | Критична густина<br>теплового потоку<br>для складів з<br>нафтопродуктами<br>[30], кВт/м <sup>2</sup> |
| 210                                                              | 15.5                                                                                                               | 255                                               | 30                                                                                                   |

### 3.1.7 Результати розрахунку для моделі із використанням рівняння нестационарної теплопровідності

Після проведення розрахунку для першого сценарію отримані результати, у вигляді температурних розподілів по фасаду будівлі, наведені на рисунку 3.5 та 3.6.

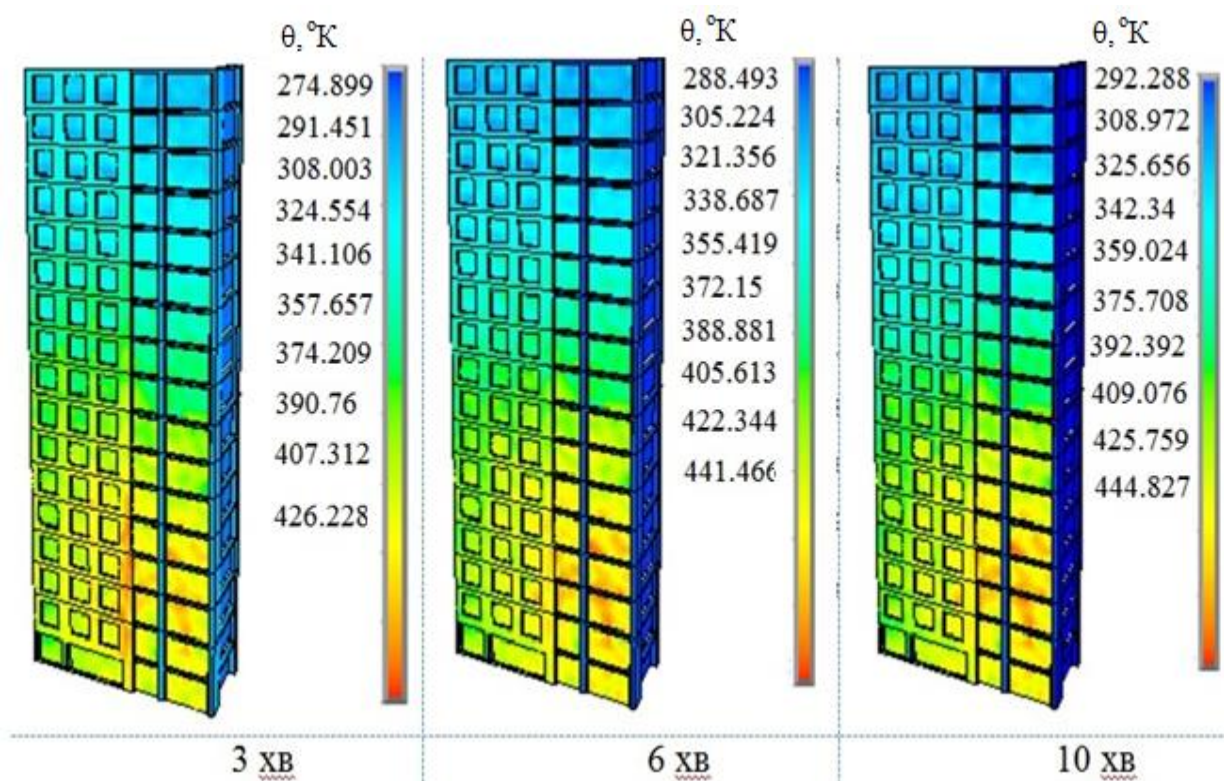


Рисунок 3.5 – Температурні розподіли (K) по фасаду будинку у різні моменти часу впливу пожежі

Для більшої деталізації температурних розподілів по тканині штор, побудовані відповідні температурні розподіли, рисунок 3.6.

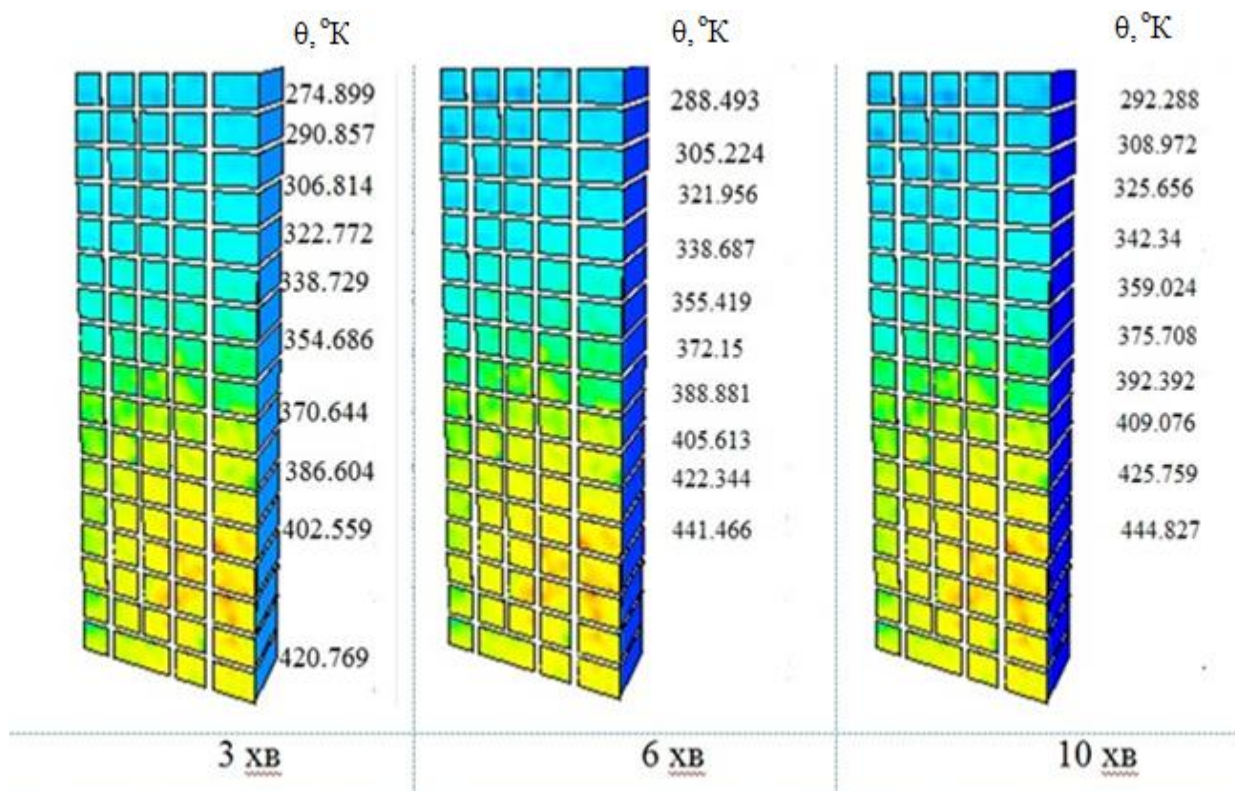


Рисунок 3.6 – Температурні розподіли (K) по елементам штор будинку у різні моменти часу впливу пожежі

Попередній аналіз температурних розподілів показує, температура штор не підвищується більше за 445 K (172 °C), тобто не перевищує критичної температури спалахування бавовняної тканини.

Для більш детального аналізу побудований графік наростання максимальної температури у залежності від часу впливу пожежі. Побудований графік наведений на рисунку 3.7.

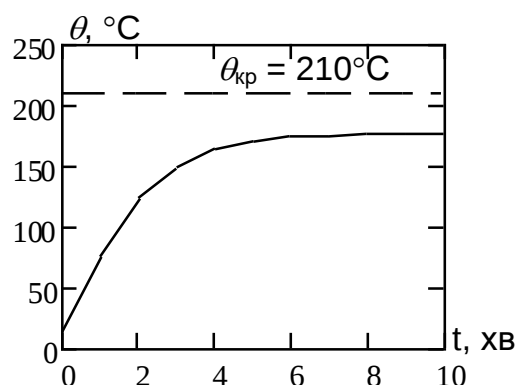


Рисунок 3.7 – Графік наростання максимальної температури у залежності від часу впливу пожежі

За критерієм температури спалахування бавовняної тканини утворення пожежі на шторах житлової будівлі під впливом пожежі на АЗС малоімовірно.

Для аналізу можливості виникнення пожежі за критерієм густини теплового потоку побудовані відповідні розподіли, які наведені на рисунку 3.8.

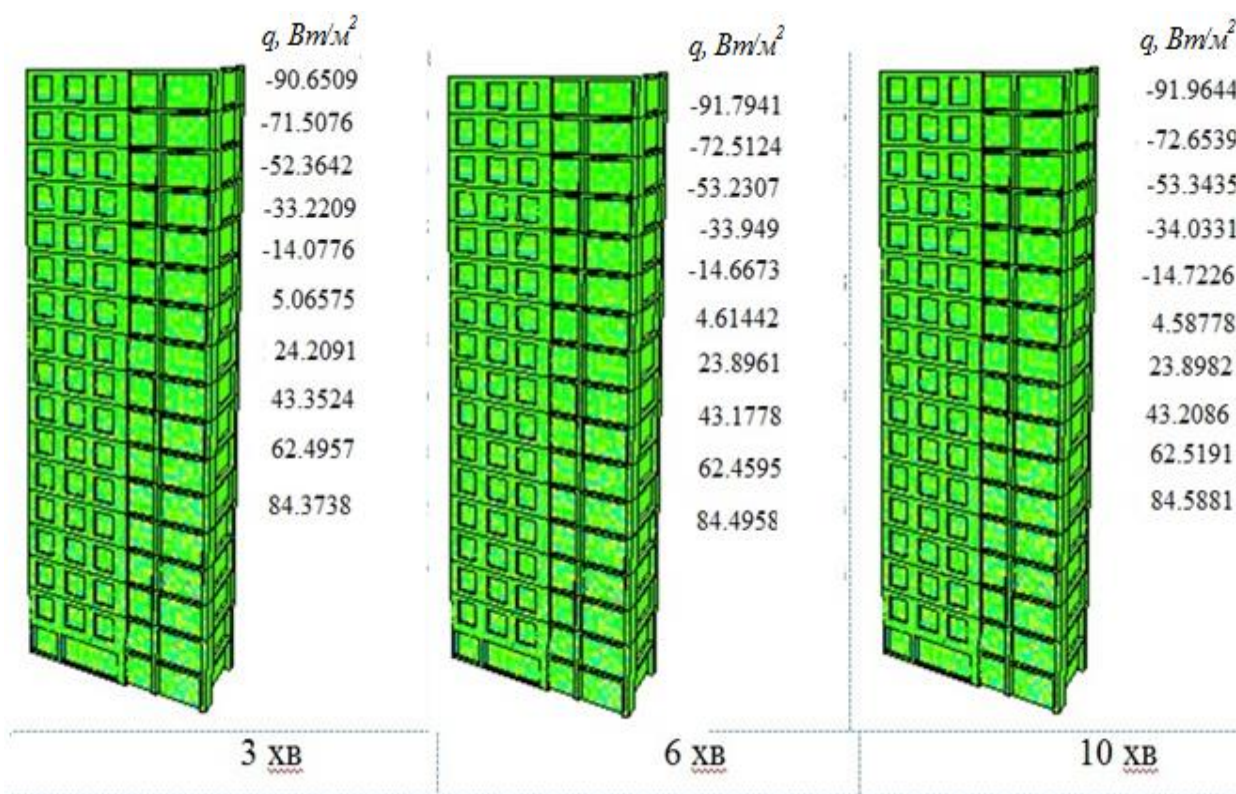


Рисунок 3.8 – Розподіли густини теплового потоку ( $\text{Вт/м}^2$ ) по фасаду будинку у різні моменти часу впливу пожежі

Аналіз розподілів на рисунку 3.8 показує що найбільша густина теплового потоку є меншою за критичне значення, яке наведено у таблиці 3.5.

Для більшої деталізації розподілів густини теплового потоку по тканині штор побудований відповідний розподіл у момент часу 10 хв впливу пожежі. Побудований розподіл наведений на рисунку 3.9.

Аналіз розподілу, який наведений на рисунку 3.9 показує, що густина теплового потоку на поверхні штор, не перевищує критичного значення, яке

наведене у таблиці 3.5, тож поширення пожежі на житловий будинок за даним критерієм також є малоймовірним.

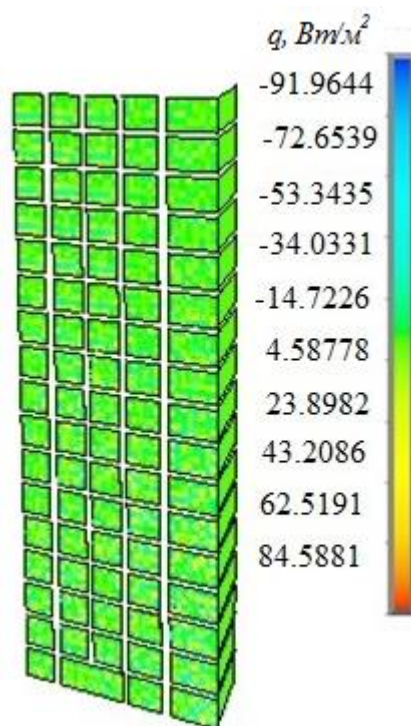


Рисунок 3.9 – Розподіл густини теплового потоку ( $W/m^2$ ) по шторам у момент часу 10 хв впливу пожежі

Як результат проведеного аналізу можна зазначити, що пожежа на майданчику розвантаження бензовозу на АЗС є малоймовірною причиною утворення пожежі у будівлі.

Після проведення розрахунку для другого сценарію впливу пожежі у житловому будинку на можливість виникнення пожежі на АЗС отримані результати, що наведені у вигляді температурних розподілів по фасаді будівлі та елементах ділянки АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури. Отримані розподілення наведені на рисунку 3.10.

На побудованих розподілах можна побачити, що температура елементів оглядових люків та дихальної арматури підземних резервуарів підвищується не більше як на 10-20°C, тож попередні дані показують, що утворення пожежі на даній ділянці АЗС малоймовірно.

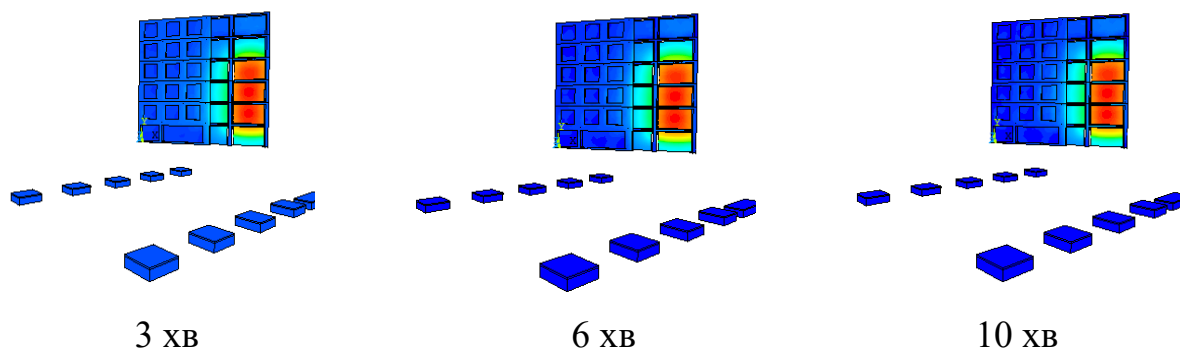


Рисунок 3.10 – Температурні розподіли (К) по фасаду будівлі та елементах ділянки АЗС у різні моменти часу впливу пожежі у будівлі.

Для більшої деталізації температурних розподілів по елементах ділянки АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури побудовані відповідні температурні розподіли. Побудовані розподіли наведені на рисунку 3.11.

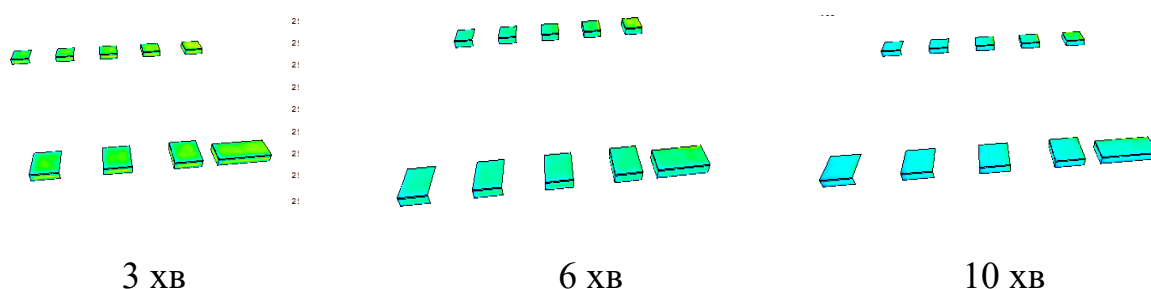


Рисунок 3.11 – Температурні розподіли (К) по елементах ділянки АЗС у різні моменти часу впливу пожежі у будівлі.

Аналіз температурних розподілів показує, що температура елементах ділянки АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури, не підвищується більше за 295 К (22 °С), тобто не перевищує критичної температури спалахування парів бензину, наведеної у таблиці 3.5, тож за критерієм температури спалахування парів бензину утворення пожежі на ділянці АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури, під впливом пожежі у житловому будинку малоймовірно.

Для аналізу можливості виникнення пожежі за критерієм густини теплового потоку побудовані відповідні розподіли, які наведені на рисунку 3.12.

Аналіз розподілів на рисунку 3.12 показує, що найбільша густина теплового потоку є меншою за критичне значення, яке наведено у таблиці 3.5, тож утворення пожежі на ділянці АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури, під впливом пожежі у житловому будинку малоімовірно.

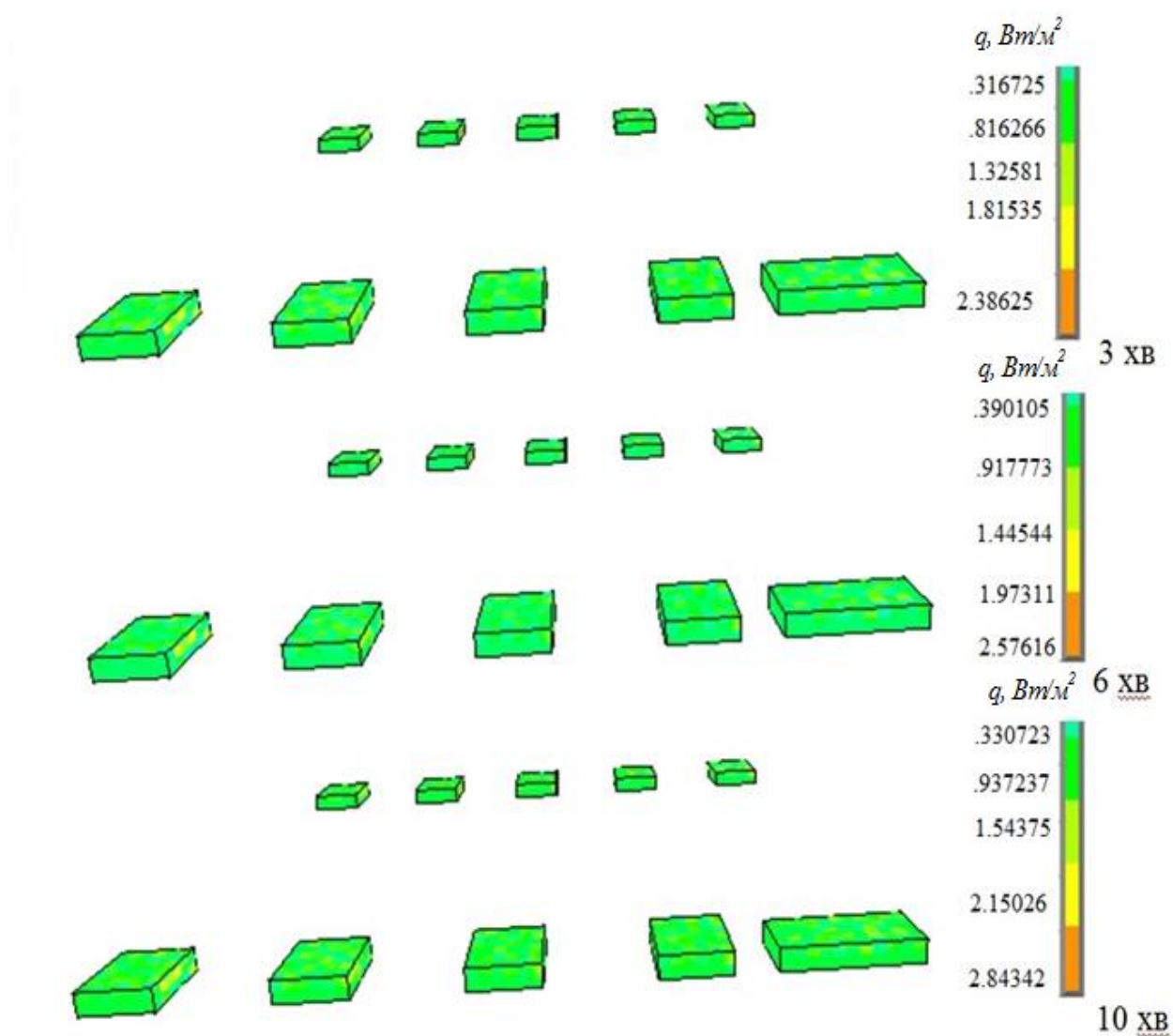


Рисунок 3.12 – Розподіли густини теплового потоку ( $W/m^2$ ) по елементам ділянки, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та частини дихальної арматури, у різні моменти часу впливу пожежі

Як результат проведеного аналізу можна зазначити, що пожежа у будівлі є малоймовірною причиною утворення пожежі на ділянці АЗС, де розташовані оглядові люки підземних резервуарів та елементи дихальної арматури.

За критерієм температури спалахування бавовняної тканини утворення пожежі на шторах житлової будівлі під впливом пожежі на АЗС малоймовірно.

Для оцінки протипожежної відстані подібні розрахунки були проведені для варіювання відстані від 1м до 22 м. У таблиці 3.6 наведені відстані і відповідні ним температури нагріву тканини штор у віконних прорізах.

Таблиця 3.6

Результати розрахунку температури для різних відстаней між досліджуваними об'єктами

| №, п/п | Відстань, м | Максимальна температура штор, $T_p$ °C | Допустима температура спалахування $T_c \cdot 0.8$ |
|--------|-------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1      | 1           | 492                                    | 168                                                |
| 2      | 2           | 467                                    |                                                    |
| 3      | 3           | 434                                    |                                                    |
| 4      | 4           | 406                                    |                                                    |
| 5      | 5           | 377                                    |                                                    |
| 6      | 6           | 354                                    |                                                    |
| 7      | 7           | 334                                    |                                                    |
| 8      | 8           | 313                                    |                                                    |
| 9      | 10          | 274                                    |                                                    |
| 10     | 12          | 240                                    |                                                    |
| 11     | 14          | 223                                    |                                                    |
| 12     | 16          | 202                                    |                                                    |
| 13     | 18          | 189                                    |                                                    |
| 14     | 20          | 171                                    |                                                    |
| 15     | 22          | 162                                    |                                                    |

Шляхом лінійної інтерполяції визначена протипожежна відстань:

$$20 + \frac{22-20}{171-162} (171 - 168) = 20.66 \text{ м}$$

Графічна інтерпретація даного результату наведена на рисунку 3.13

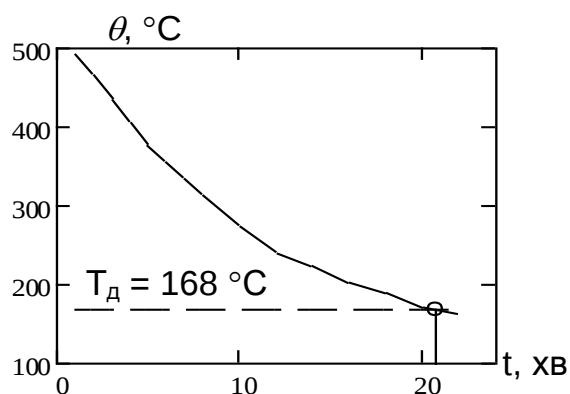


Рисунок 3.13 – Графік зниження максимальної температури у залежності від відстані між досліджуваними об'єктами

Тож мінімальна протипожежна відстань складає 24,7 м

### 3.1.8 Результати розрахунку для польової моделі

Розрахунки проводилися шляхом підбору такої протипожежної відстані, при якій значення температури на поверхні житлового будинку та автозаправного комплексу не перевищувати значень температури займання для відповідних речовин та матеріалів.

Результати розрахунків із використанням польової моделі для відстані 19 м представлені на рисунку 3.14.

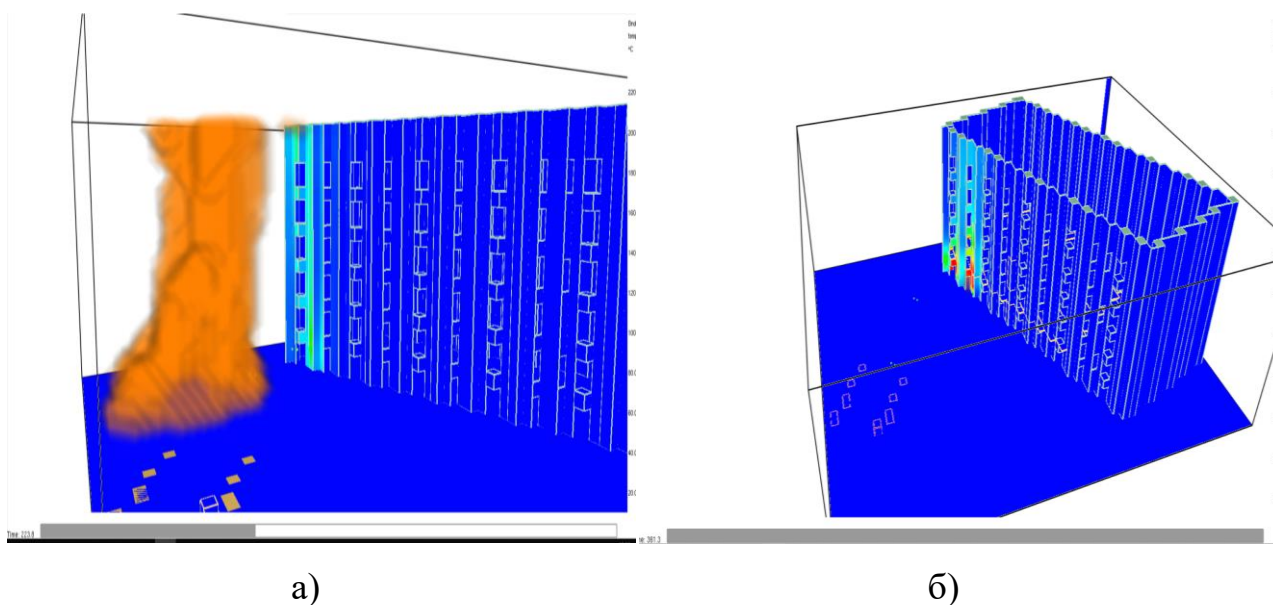


Рисунок 3.14 – Результати розрахунку із використанням польової моделі: *а* – пожежа на АЗС *б* – пожежа у будинку

Залежність зміни температури продовж тривалості часу наведено на рисунку 3.15.

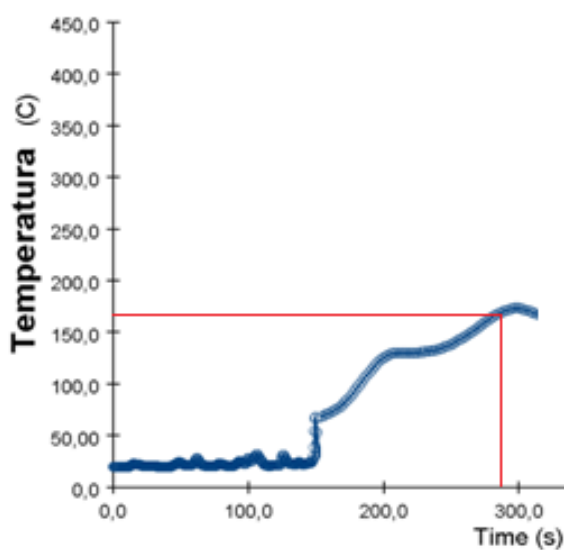


Рисунок 3.15 – Залежність зміни температури продовж тривалості часу

Тож мінімальна протипожежна відстань складає 22,8 м.

Результати валідації запропонованих математичних моделей представлені в таблиці 3.7

Таблиця 3.7

## Результати валідації запропонованих математичних моделей

| Математична модель                                               | Результат розрахунку протипожежної відстані, м |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Вимога державних будівельних норм                                | 40                                             |
| Спрощена модель                                                  | 32                                             |
| Модель із використанням рівняння нестационарної теплопровідності | 24,7                                           |
| Польова мотель                                                   | 22,8                                           |

### 3.2 Моделювання процесів теплового впливу під час пожежі у технологічних установках видобування біогазу

#### 3.2.1 Опис об'єкта

Технологічним процесом передбачена ферментація (зброджування) сирової біологічної сировини (силосу, відходів від цукрових буряків, кукурудзи і т.д.) в метантенках з поступовим виділенням біологічного газу, який тимчасово накопичується в газгольдерах, а потім подається на господарські потреби або для спалювання в генераторної для виробництва тепла та електроенергії [265]. Основною спорудою технологічного процесу виробництва біогазу є ферментатор з максимальним об'ємом газу  $217 \text{ м}^3$ , що складається з двох основних огорожувальних частин, а саме пружної оболонки з поліефірної тканини балістичного плетіння з двостороннім поліуретановим покриттям, затягнутою кільцем (покрівля ферментатора) і залізобетонного резервуару (корпус ферментатора) рисунок 3.16.

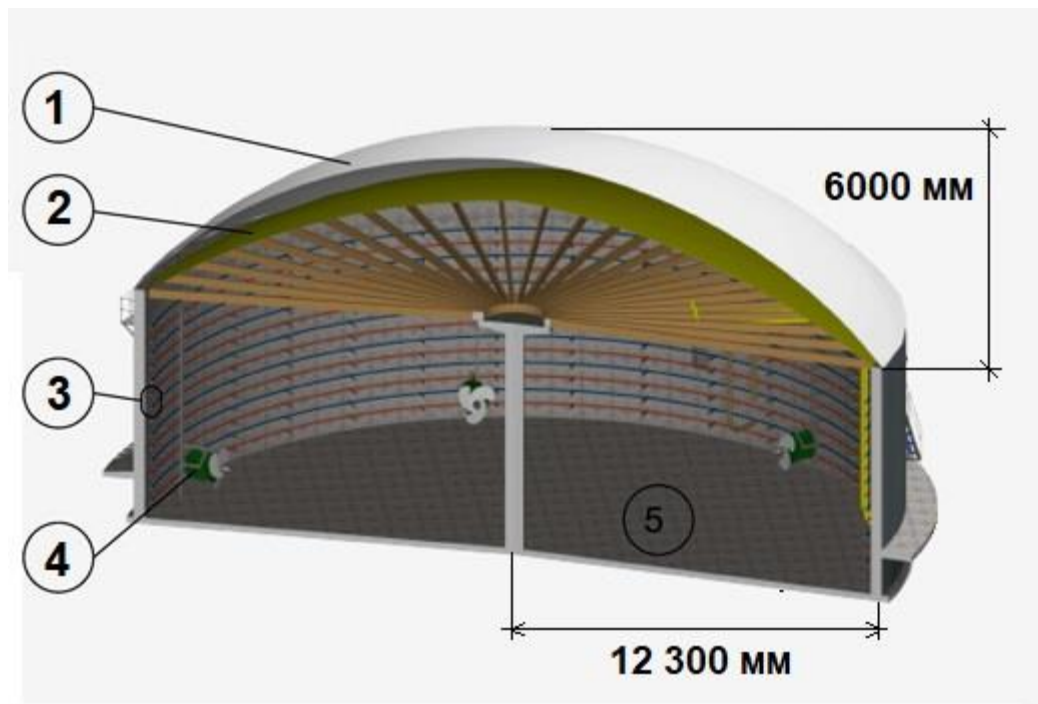


Рисунок 3.16 – Зовнішній вигляд із розрізом ферментатора 1- купол, 2 – мембрана, 3 – система підігріву, 4 – механічні мішалки, 5 – ферментатор

Висота оболонки ферментатора ( $H_1$ ) становить 6000 мм; товщина оболонки ( $h$ ) - 0,9 мм; радіус опорного кільця ( $r_1$ ) - 12300 мм. Резервуар ферментатора виконаний із збірного залізобетону, загальна висота становить 8500 мм, а діаметр - 24600 мм.

Стінка циліндра жорстко пов'язана з плитою днища, середня товщина стінки складає 300 мм з урахуванням захисного шару. Середня щільність армованого залізобетону -  $2500 \text{ кг/м}^3$ , використовується арматура класу А500С, що має норматив опору розтягуванню до 500 МПа. Резервуар заповнений рідиною (мокрий мул) з питомою вагою  $16,5 \text{ кН/м}^3$ , на висоту 8000 мм. Коефіцієнт надійності за навантаженням - 1,2.

### 3.2.2 Сценарій аварійної ситуації

Під час експлуатації ферментатора в результаті порушення технологічного процесу або механічного пошкодження можливі такі аварійні ситуації:

- розгерметизація мембрани газгольдера і утворення в його об'ємі газоповітряної суміші, яка при наявності джерела запалювання (коротке замикання в змішувачі осаду) викликає вибух;

- механічне пошкодження верхньої захисної оболонки ферментатора і мембрани, внаслідок чого відбувається витік газу з резервуара, який при наявності джерела запалювання може спалахнути і підтримувати горіння.

Під час виникнення горіння в одному з ферментаторів на сусідній діє тепловий потік, при досягненні критичних значень якого можлива розгерметизація зовнішньої оболонки ферментатора з подальшим поширенням пожежі. Під час моделювання враховувалося середнє значення бокового вітру величиною 5 м/с. Для визначення щільності теплового потоку, що випромінюється ферментатором, який горить, досліджувався вплив діаметра отвору, через який витікає і горить газ, на температуру полум'я і площа факела полум'я.

### 3.2.3 Результати розрахунку

Умовою визначення безпечної відстані між ферментаторами приймаємо нерівність:

$$q_{opr} \leq q_{доп}, \quad (3.2)$$

де  $q_{opr}$  - щільність теплового потоку, від факелу пожежі;

$q_{доп}$  - допустимий тепловий потік

Розрахункова модель ферментатора приведена на рисунку 3.17.

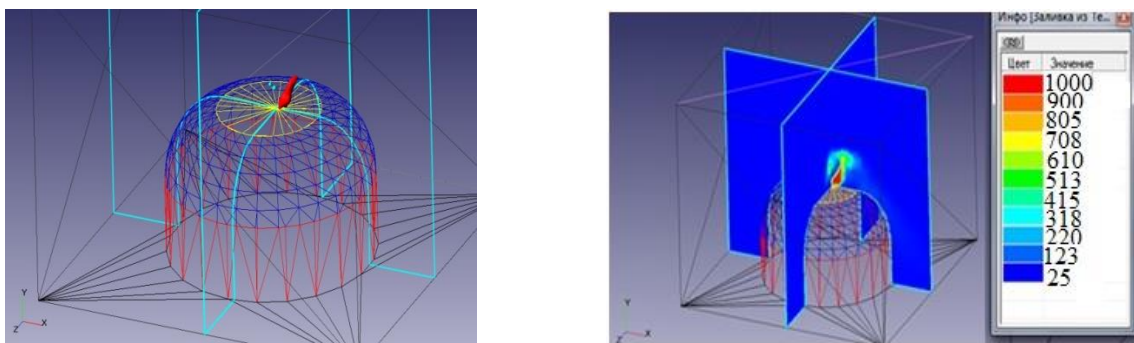


Рисунок 3.17 – Розрахункова модель ферментатора

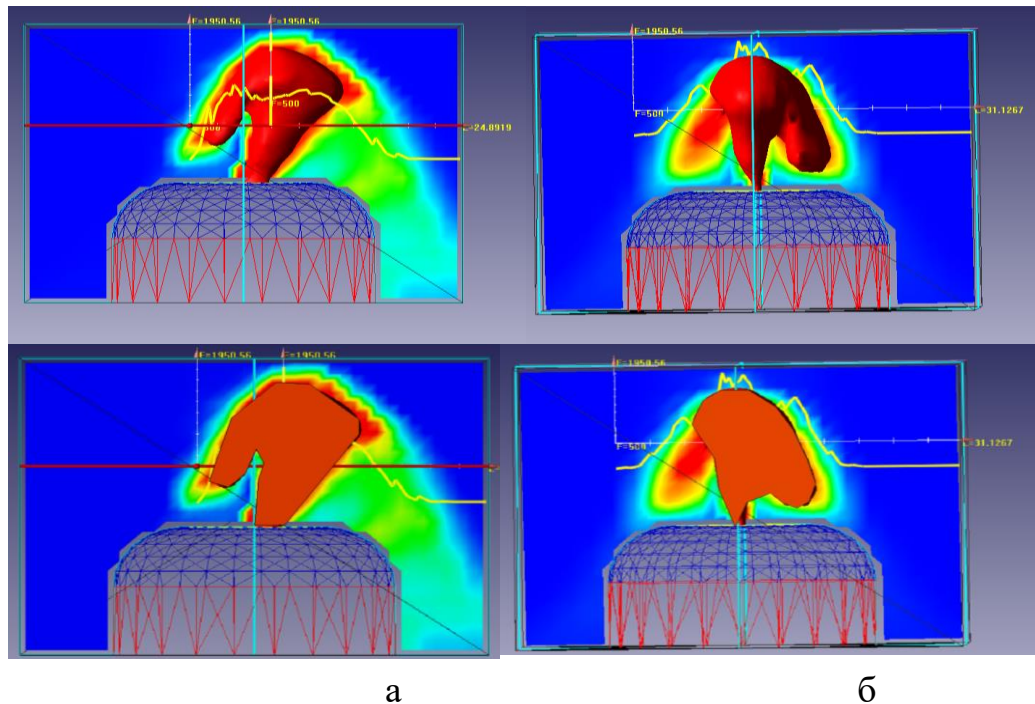


Рисунок 3.18 – Графічна модель розвитку горіння: а – початковий етап розвитку пожежі, б – кульмінаційний момент горіння

За результатами розрахунків визначено, що найбільше значення висоти і радіусу факела полум'я становить 15,4 м і 14,7 м відповідно, максимальні значення площі факела полум'я і температури полум'я досягаються при діаметрі 1000 мм для отвору через який витікає газ. У той же час найбільша температура полум'я досягає близько 1130 °С, а площа факела полум'я - 188,4 м<sup>2</sup>. Візуалізація результатів розрахунку приведена на рисунку 3.18.

Розрахунок щільності теплового потоку, випромінюваного палаючим ферментатором, здійснюється за законом Стефана-Больцмана [126]:

$$q_{\text{опр}} = \varepsilon_{\phi, \omega} C_0 \left( \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\omega}}{100} \right)^4 \right) \psi_{\phi, \omega}, \quad (3.3)$$

де  $\varepsilon_{\phi, \omega}$  – ступінь чорноти;

$C_0$  – константа випромінювання абсолютно чорного тіла;

$T_{\phi}$  – температура факелу;

$T_{\omega}$  – температура поверхні, що опромінюється;

$\psi_{\phi, \omega}$  – коефіцієнт опромінювання поверхні тіла.

За результатами розрахунків визначено, що найбільше значення щільності теплового потоку, випромінюваного палаючим ферментатором становить 93916,71 кВт/м<sup>2</sup>.

Значення допустимого теплового потоку  $q_{\text{доп}}$  для ферментатора, що опромінюється отримаємо з рівняння часу досягнення критичної температури матеріалу на діючі високі температури і визначаємо за формулою [126]:

$$q_{\text{доп}} = c \cdot \rho \cdot L \cdot (T_2 - T_1) / (t \cdot \eta), \quad (3.4)$$

де  $c$  – питома теплоємність матеріала Дж/(м<sup>3</sup>·К);

$\rho$  – щільність матеріалу кг/м<sup>3</sup>;

$L$  – товщина слою матеріалу, м;

$T_1$  – початкова температура, С<sup>0</sup>;

$T_2$  – критична температура, С<sup>0</sup>;

$t_2$  – час в продовж якого досягається критична температура, с ;

$\eta$  – коефіцієнт поглинання

За результатами розрахунків визначено, що значення допустимого теплового потоку  $q_{\text{доп}}$  становить 34,875 кВт/м<sup>2</sup>.

Алгоритм розрахунку безпечної відстані між ферментаторами за сценарієм виникнення пожежі [224], наведено на рисунку 3.19.

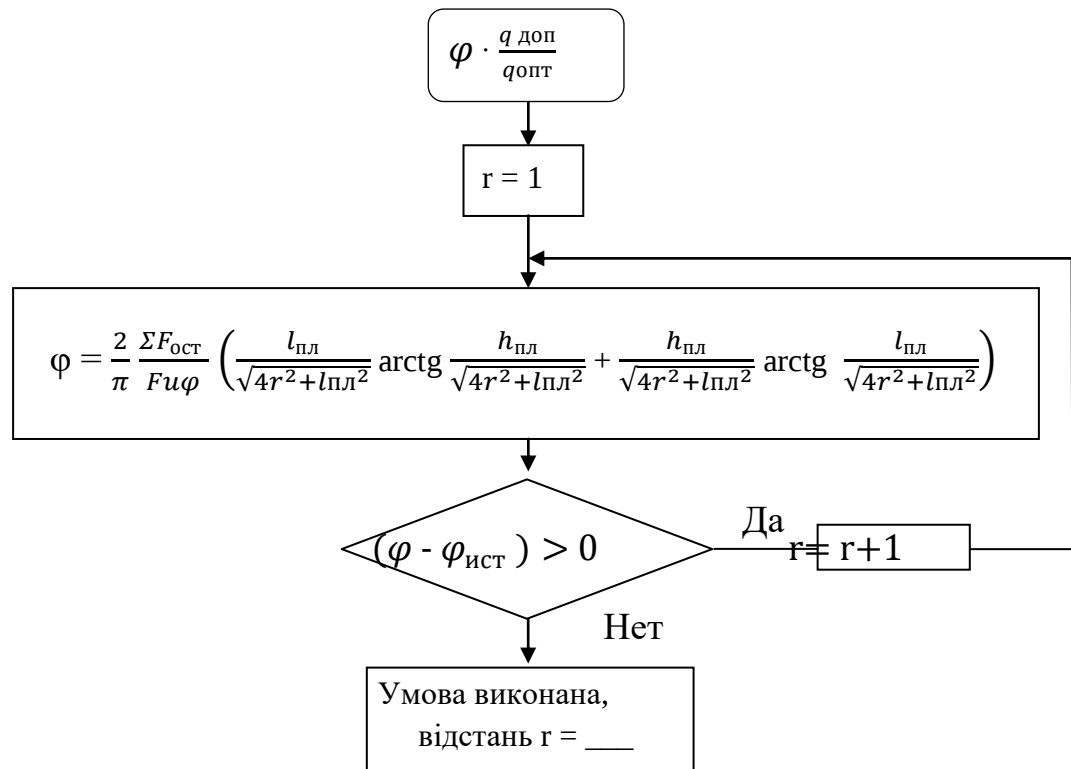


Рисунок 3.19 – Алгоритм проведення розрахунків

За результатами розрахунків встановлено, що протипожежна відстань, за сценарієм виникнення пожежі між ферментаторами, має бути не менше ніж 20 м.

### 3.3 Математичне моделювання відстані від перекриття до низу завіси, що обмежує поширення пожежі

#### 3.3.1 Вибір та формування сценарію пожежі

Вибір розрахункового сценарію пожежі зроблено шляхом експертної оцінки, на основі аналізу пожежної небезпеки будівлі, об'ємно-планувальних рішень об'єкту захисту, параметрів евакуаційних шляхів та виходів, а також кількості ті місць розміщення людей в приміщеннях. При цьому враховано вимоги п. 1.2 додатку 2 [266].

В результаті обрано сценарій виникнення пожежі, за яким пожежа виникає в об'ємі підвального поверху на відмітці (-3,750 м) в торговельному залі, поз. 208 в осях (1/3-1/4 – Е1-Д1).

В реакції горіння прийнято найбільш небезпечні горючі матеріали, а саме дерево, папір та нафтовмісні речовини (лак, фарба). Максимальна температура горіння 1330 °С, виділення:

- CO 0,043 кг/кг;
- сажі 0,006 г/с;
- двооксид вуглецю CO<sub>2</sub> 0,742 кг/кг,
- димоутворювальна здатність 64 Нп×м<sup>2</sup>/кг
- хлористий водень (HCl) 1E-6 кг/кг.

Зменшення інтенсивності горіння (затухання) відсутнє. Питома теплоємність тепловиділення 350 кВт/м<sup>2</sup>. Лінійна швидкість поширення полум'я 0,006 м/с. Спрацювання системи спринклерного пожежогасіння не враховується.

Згідно розрахунку [267], із приміщень підвального поверху (позиція -3,750) необхідний час евакуації складає 386,38 с, при цьому максимальне значення фактичного часу евакуації, згідно розрахунків [267] не перевищує 295 с. Таким чином час моделювання пожежі для обґрунтування геометричного значення висоти димової завіси підвального поверху приймаємо 390 с. Геометричне значення висоти димової завіси для підвального поверху під час моделювання складає 0,5 м. У випадку проникнення критичної концентрації диму більше 1,2% (0,048 дБ/м), що відповідає втраті видимості до 20 м у захищуваній завісою зоні ескалатора, крок збільшення висоти завіси для наступного етапу перерахунку складатиме 0,25 м.

На рисунку 3.20 – 3.23 наведено модель приміщення з джерелом пожежі та пожежним навантаженням підвального поверху в торговельному залі та димовими завісами (позначені червоним кольором).

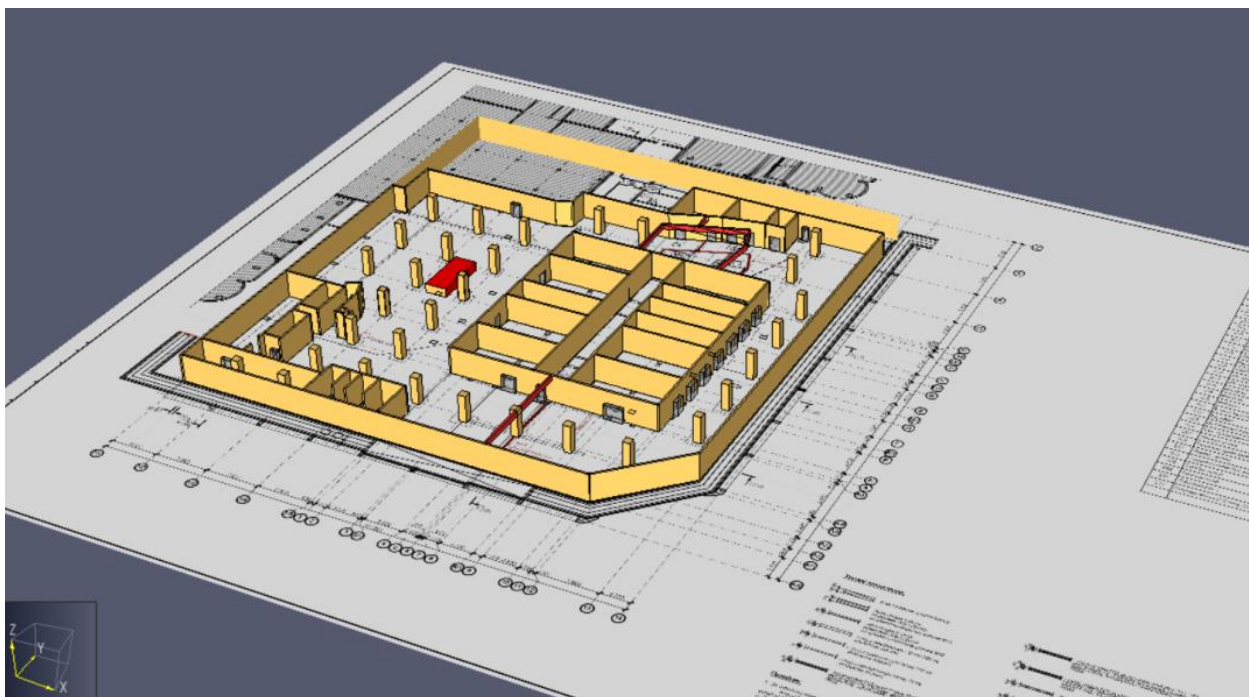


Рисунок 3.20 – Загальний вигляд моделі підвального поверху

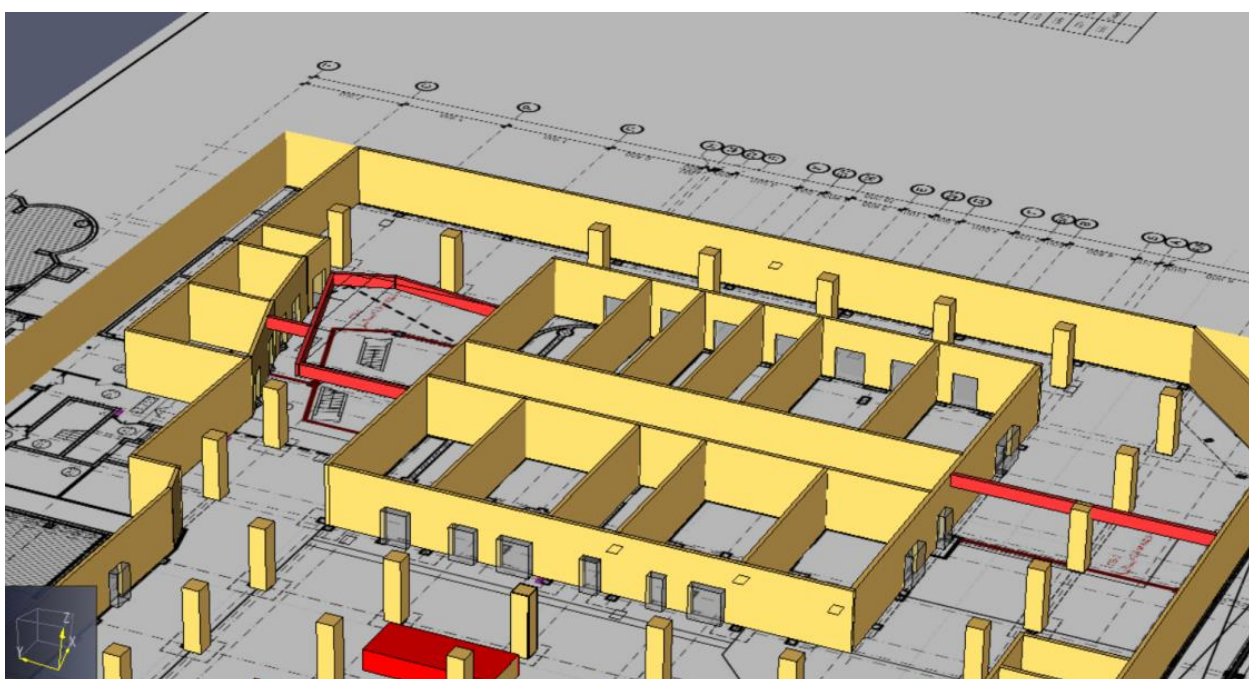


Рисунок 3.21 – Загальний вигляд моделі підвального поверху

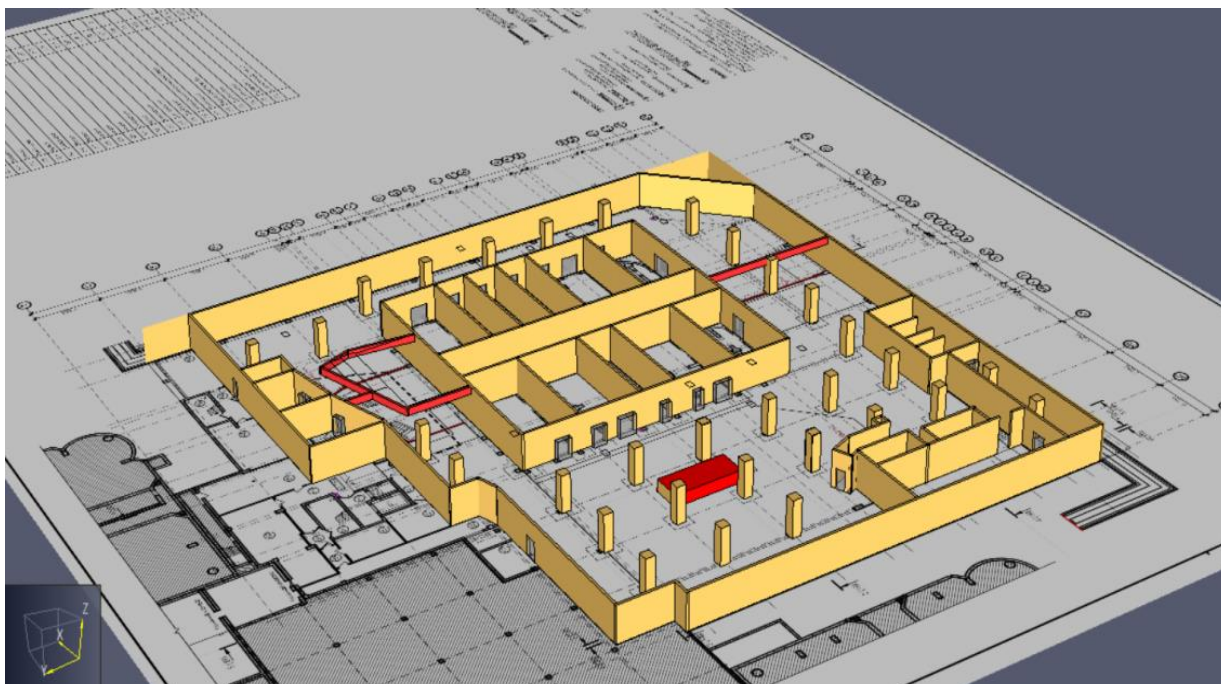


Рисунок 3.22 – Загальний вигляд моделі підвального поверху

Для визначення горизонтального розподілу диму по висоті, та його проникнення в приміщення через димові завіси, задано горизонтальні площини візуалізації димоутворення в приміщеннях підвального поверху на всю висоту приміщення. Розміщення горизонтальних площин в приміщеннях підвального поверху наведено на рисунку 3.23.

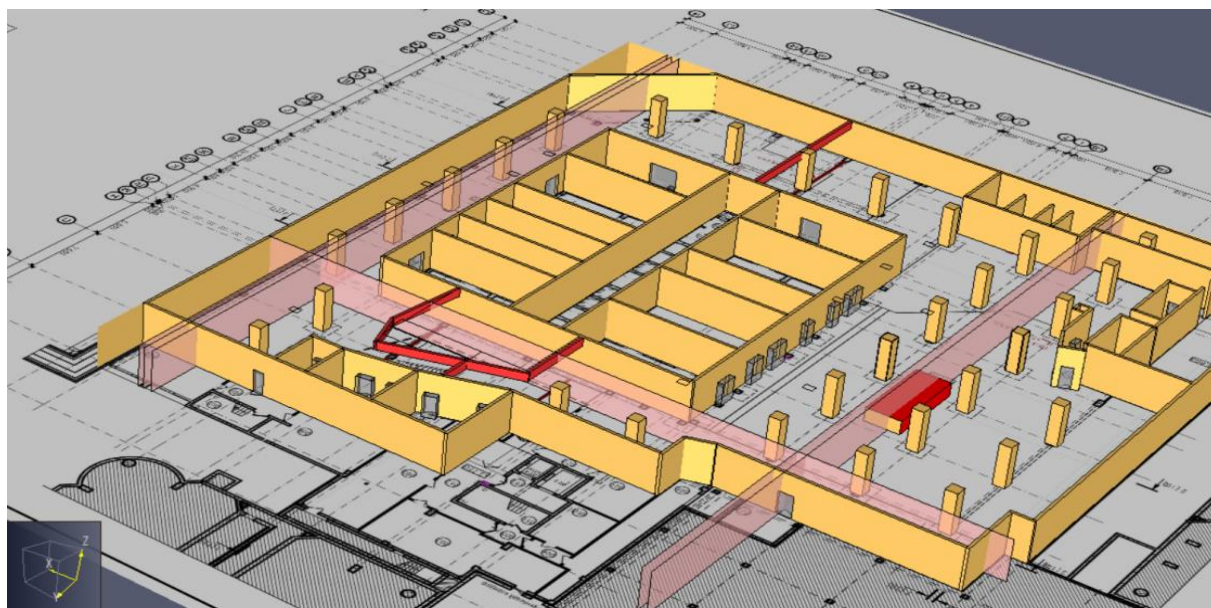


Рисунок 3.23 – Розміщення горизонтальних площин візуалізації димоутворення

Під час моделювання враховувалась наявність та робота системи димовидалення. Згідно проекту, продуктивність системи димовидалення з 1 підвального поверху торгово-розважального комплексу, для 1 та 2 зон поверху складає  $78\,650\text{ м}^3/\text{год}$  кожна. Під час моделювання, прийнято 15% зменшення номінальної потужності системи димовидалення та прийнято час інерційності спрацювання системи 90 с. На рисунку 3.24 схематично наведено ситуаційний план поділу зон.

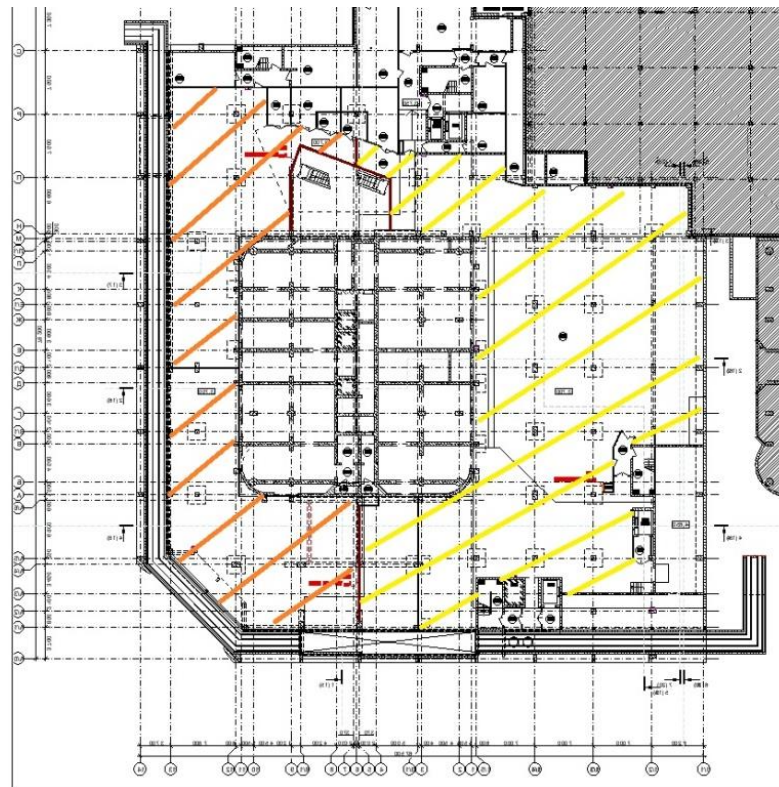


Рисунок 3.24 – Ситуаційний план двох зон розділених димовими завісами

### 3.3.2 Результати розрахунку

Пожежа розповсюджується всередині приміщення до максимальної площі протягом всього часу моделювання (390 с). Небезпечні чинники пожежі, а саме дим, розповсюджуються в приміщенні виникнення осередку пожежі та в суміжні приміщення з врахуванням геометричних параметрів будівлі та димових завіс. За результатом моделювання пожежі, площа

поширення вогню склала  $22,5 \text{ м}^2$ . Залежність тепловиділення від джерела пожежі з часом наведено на рисунку 3.25.

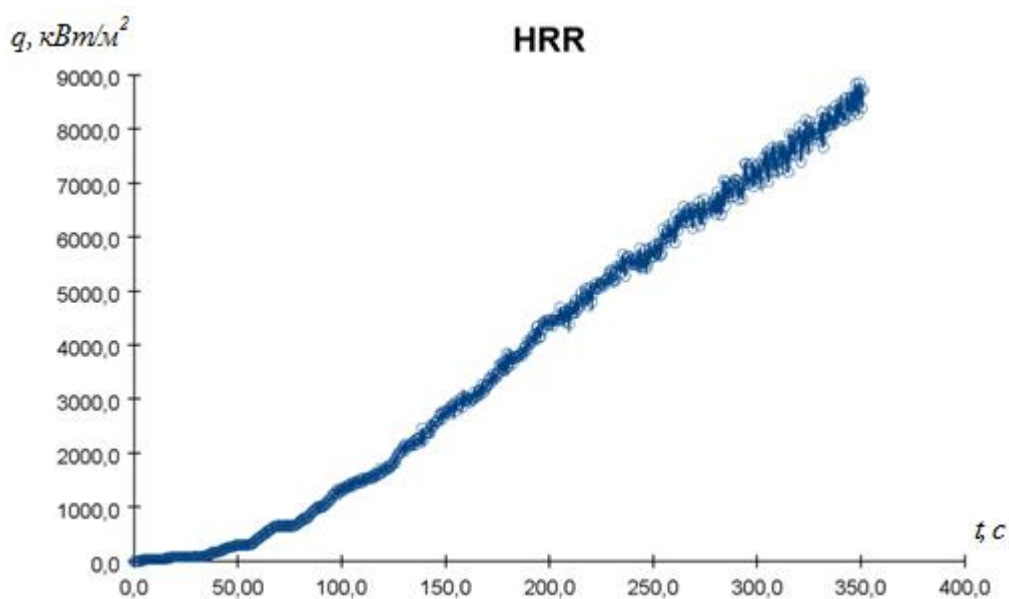


Рисунок 3.25 – Залежність тепловиділення від джерела пожежі з часом

Результати відображення динаміки розповсюдження диму, в підвальному поверсі представлено на рисунках 3.26 – 3.30.

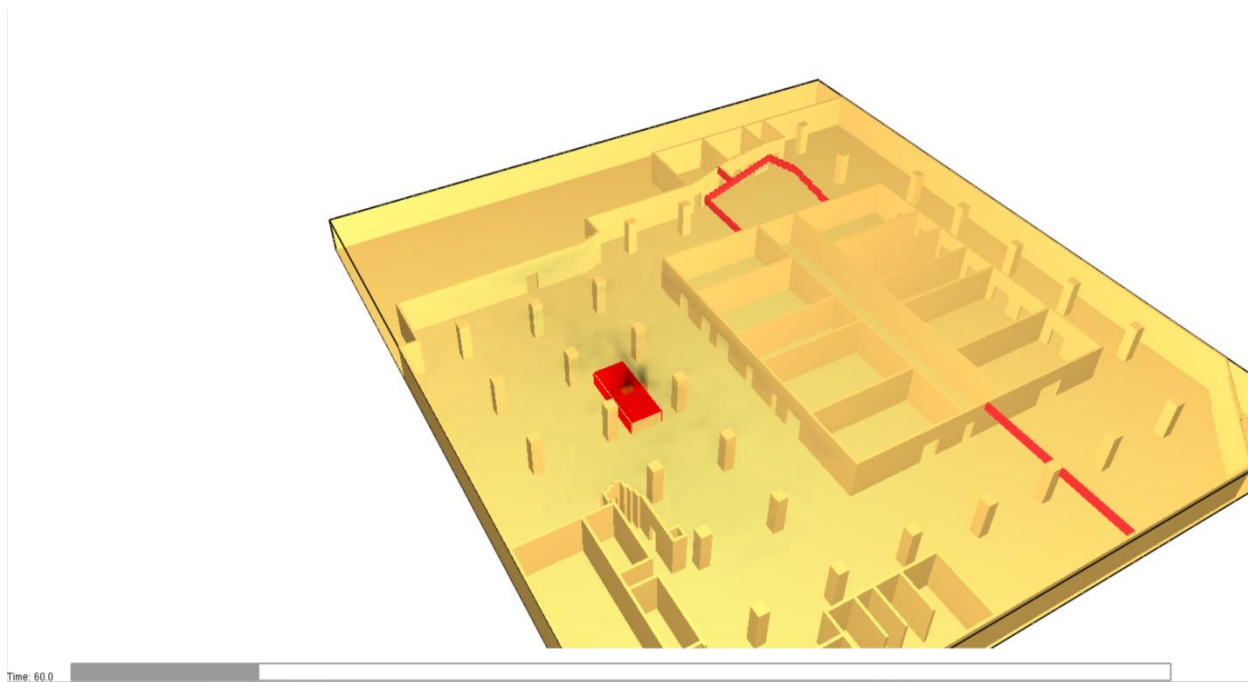


Рисунок 3.26 – Динаміка поширення диму в підвальному поверсі на 60 с

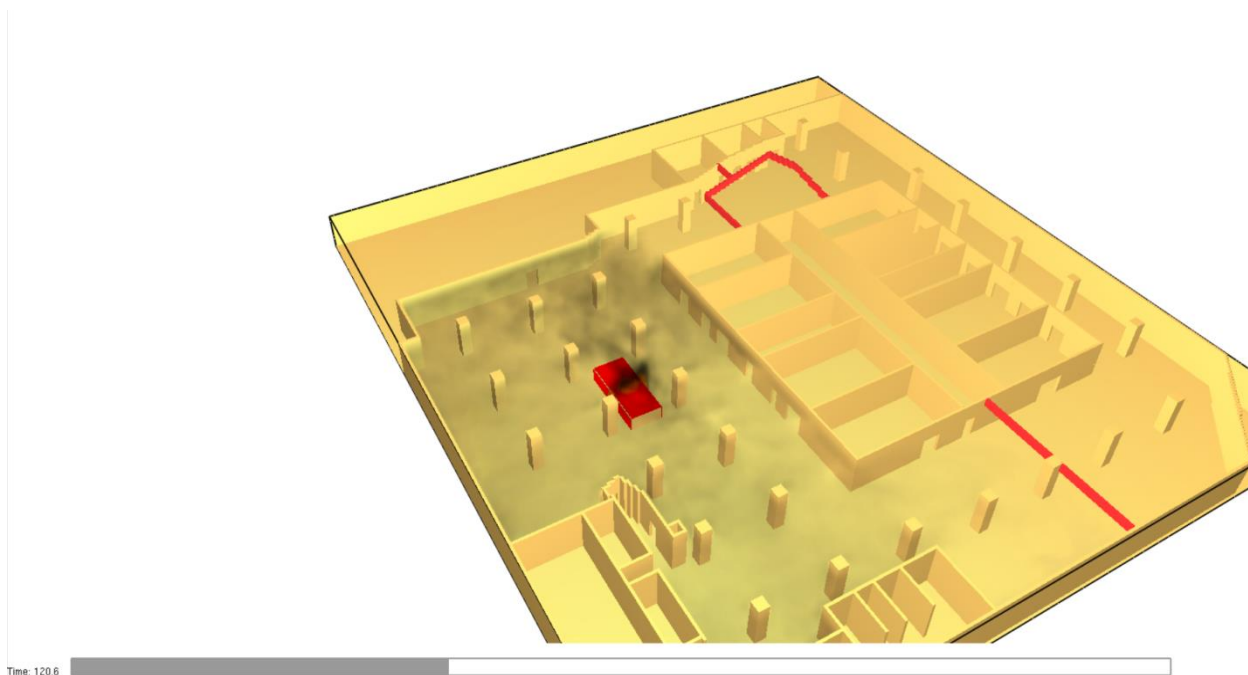


Рисунок 3.27 – Динаміка поширення диму в підвальному поверсі на 120 с

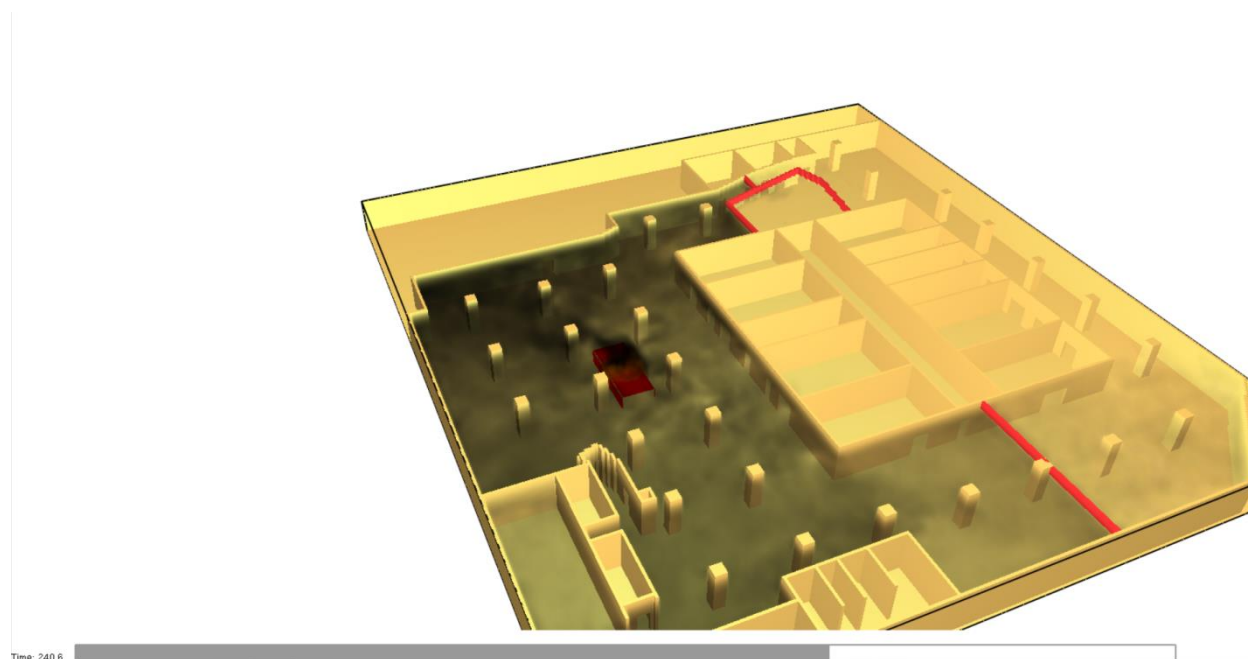


Рисунок 3.28 – Динаміка поширення диму в підвальному поверсі на 240 с

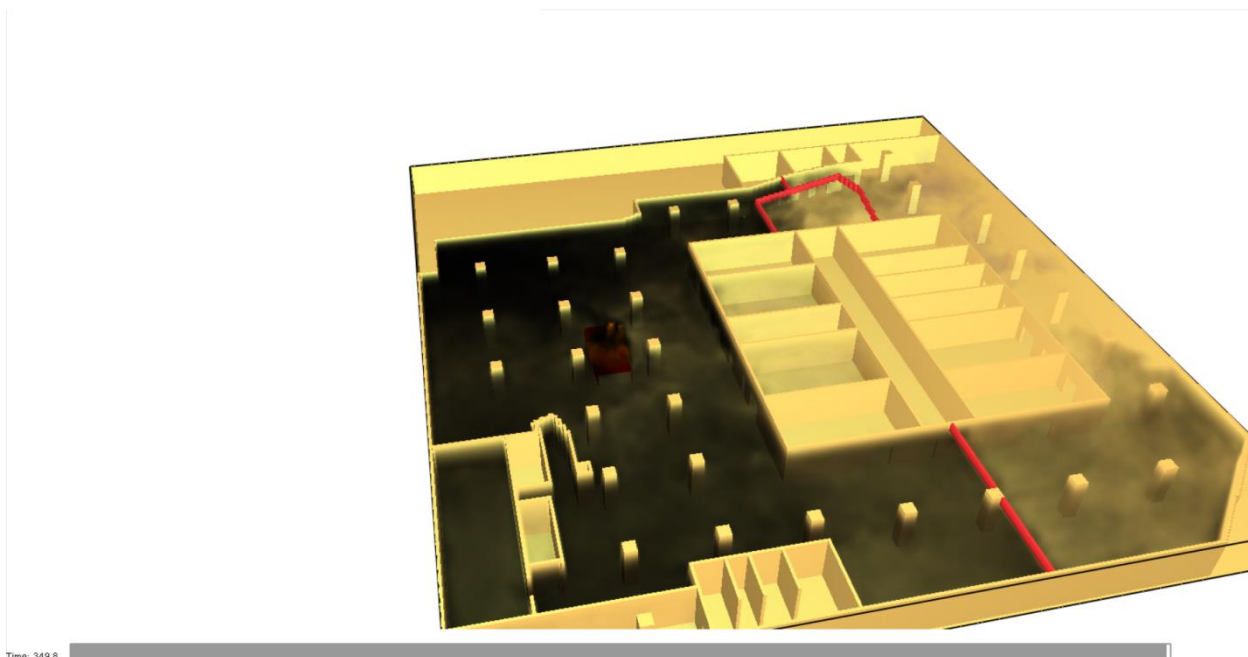


Рисунок 3.29 – Динаміка поширення диму в підвальному поверсі на 350 с

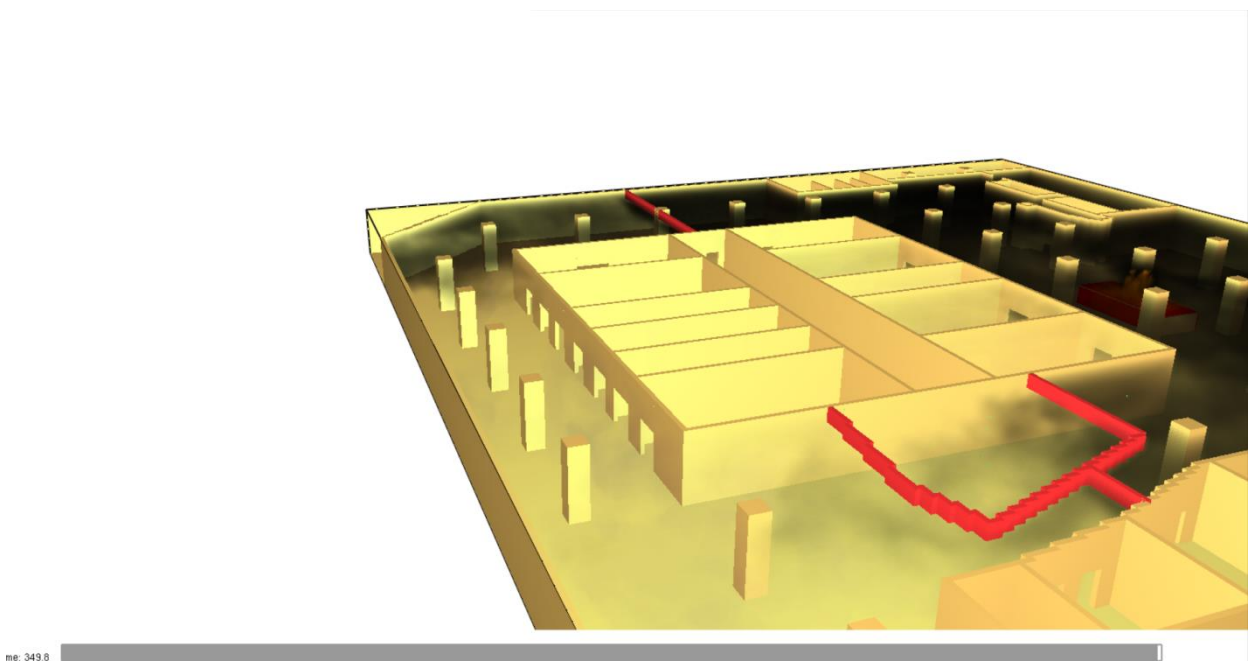


Рисунок 3.30 – Зображення задимлення відсіку захищеного димовими завісами на 350 с.

Горизонтальний розподіл диму в підвальному поверсі протягом часу моделювання наведено на рисунках 3.27 – 3.31.

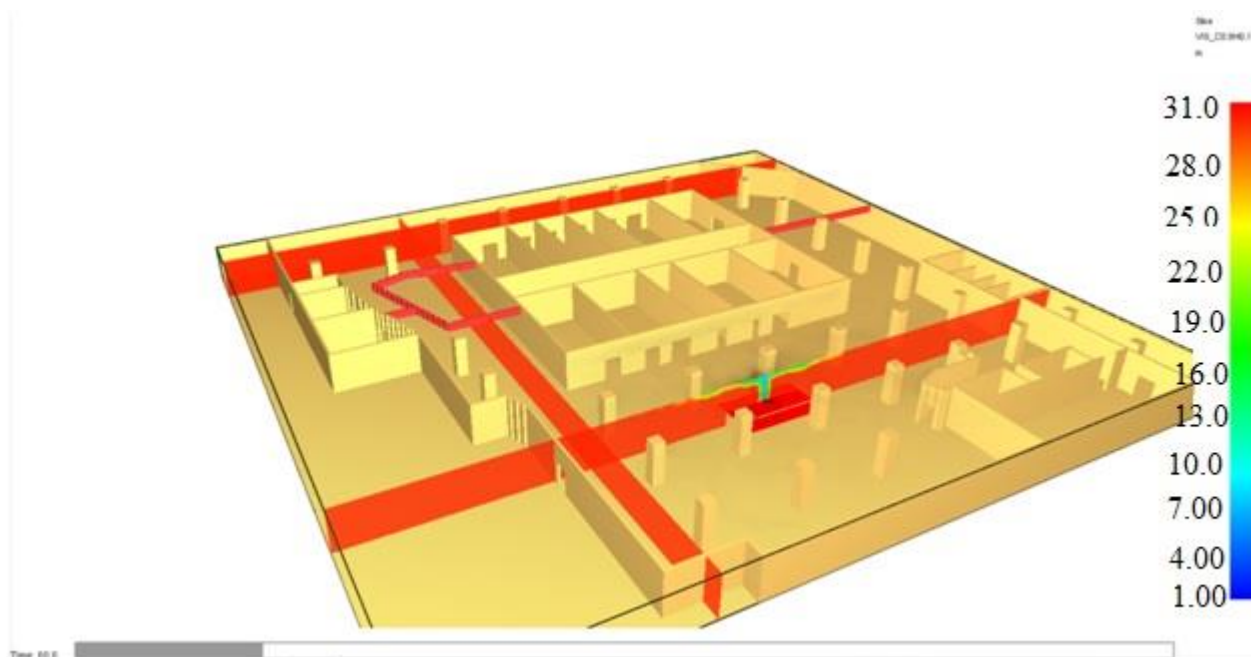


Рисунок 3.31 – Горизонтальний розподіл диму в підвальному поверсі на 60 с

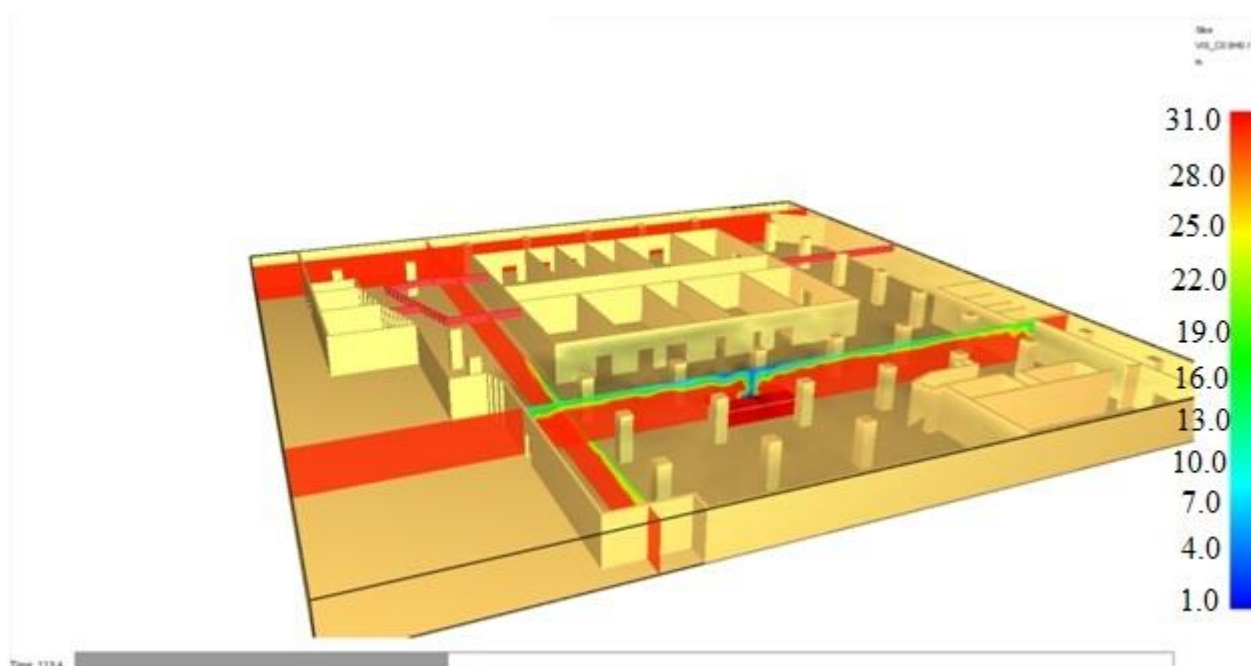


Рисунок 3.32 – Горизонтальний розподіл диму в підвальному поверсі на 120 с

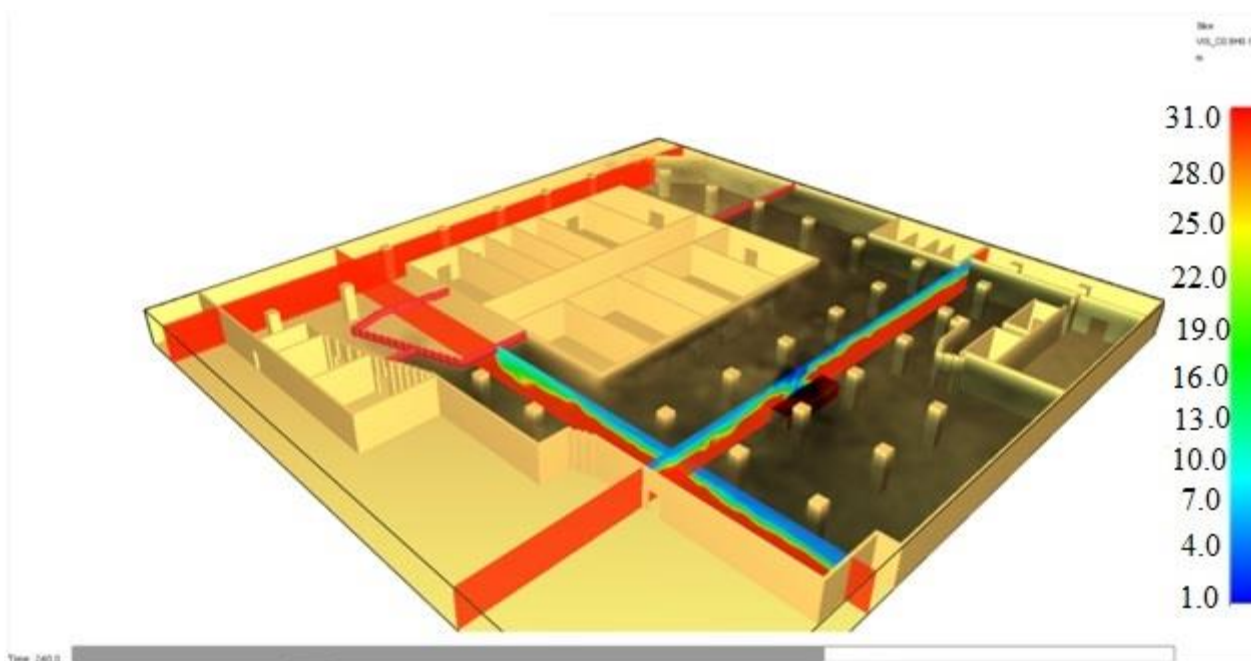


Рисунок 3.33 – Горизонтальний розподіл диму в підвальному поверсі на 240 с

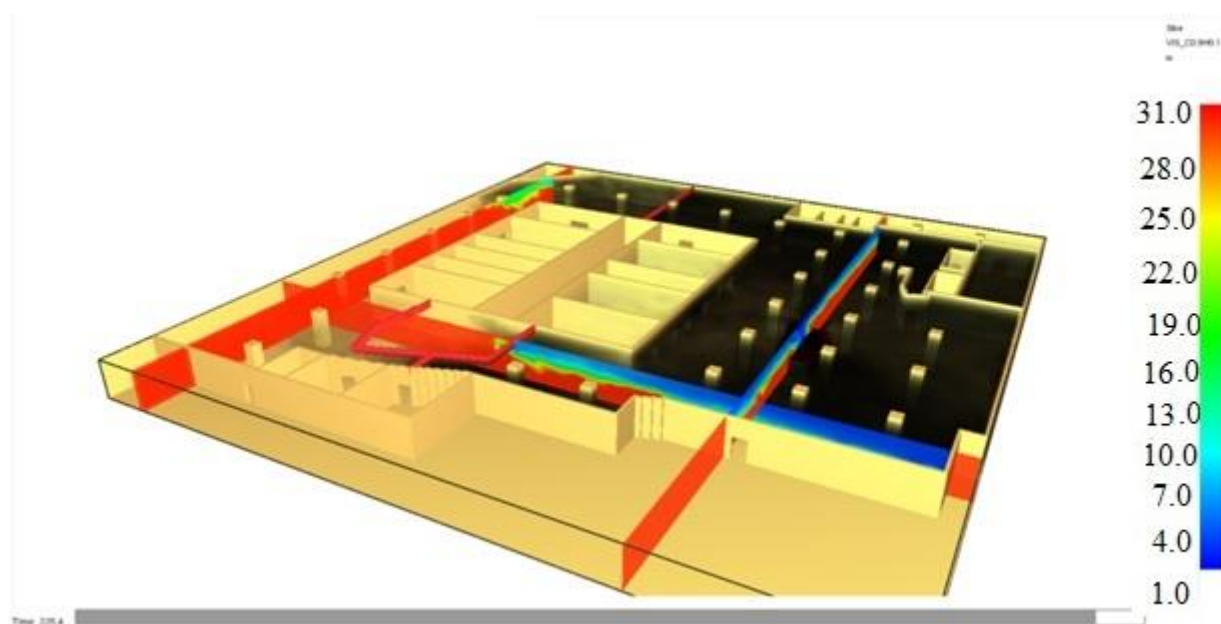


Рисунок 3.34 – Горизонтальний розподіл диму в підвальному поверсі на 335 с та його проникнення у захищений об'єм приміщення

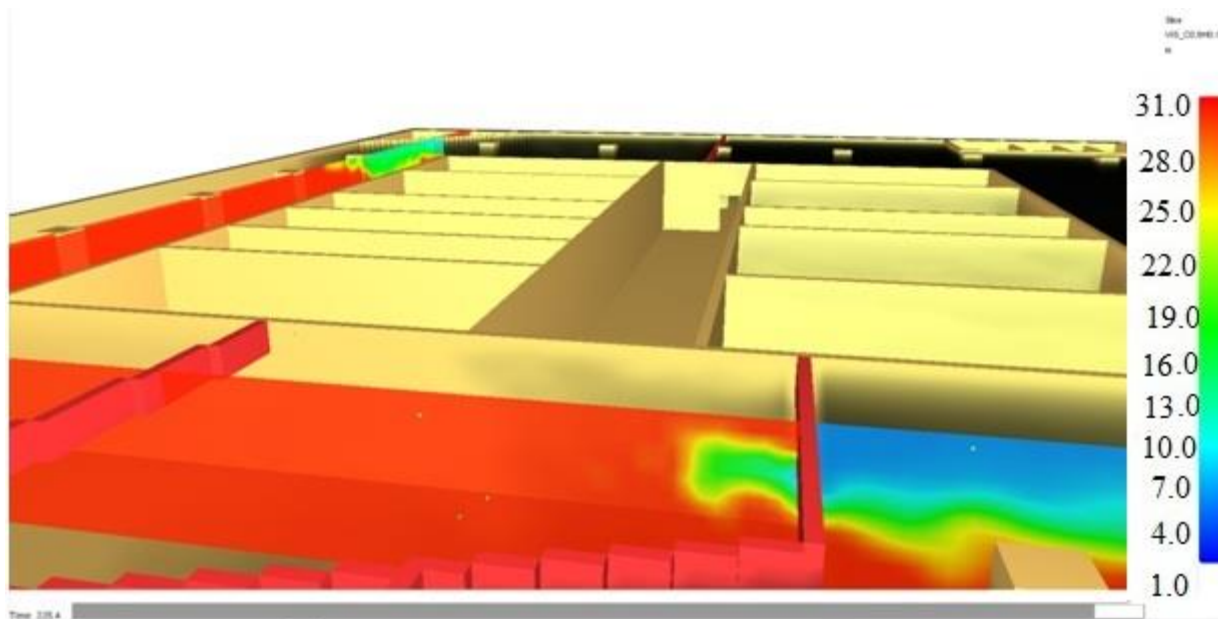


Рисунок 3.35 – Проникнення диму у захищений об'єм приміщення на 335 с

Для визначення точного часу проникнення диму в суміжні приміщення, а також аналізу динаміки розвитку димоутворення в торговельному залі та захищуваному просторі ескалаторів, розміщено 6 датчиків в кожній із досліджуваних зон на висоті 1,7 м та під стелею на висоті 3,75 м. Місця розміщення датчиків та результати їх вимірювань наведено на рисунках 3.32 – 3.38.

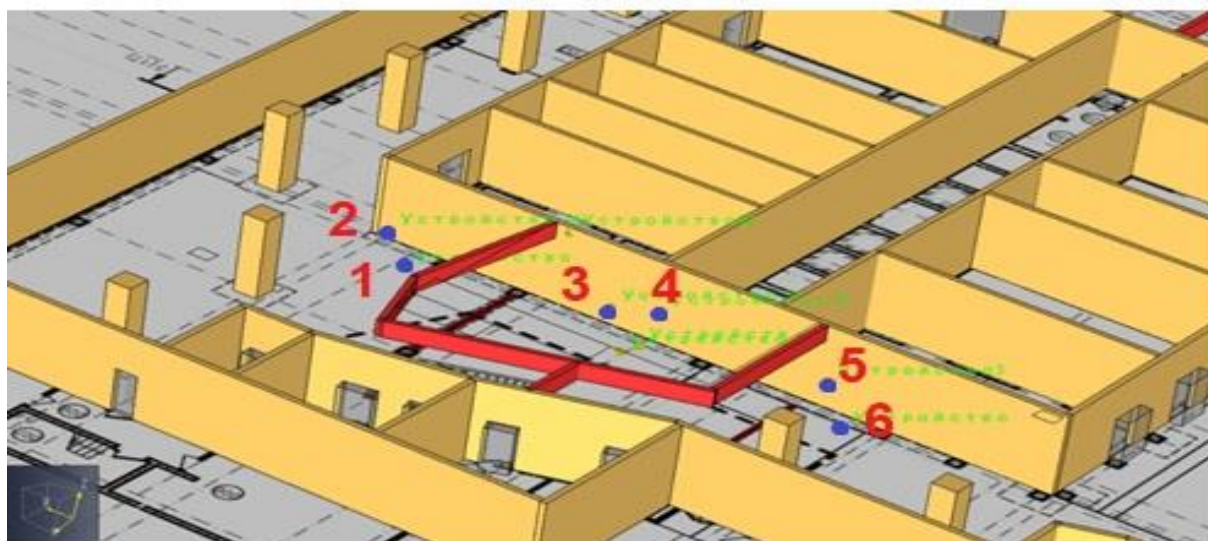


Рисунок 3.36 – Місця розміщення датчиків вимірювання задимлення

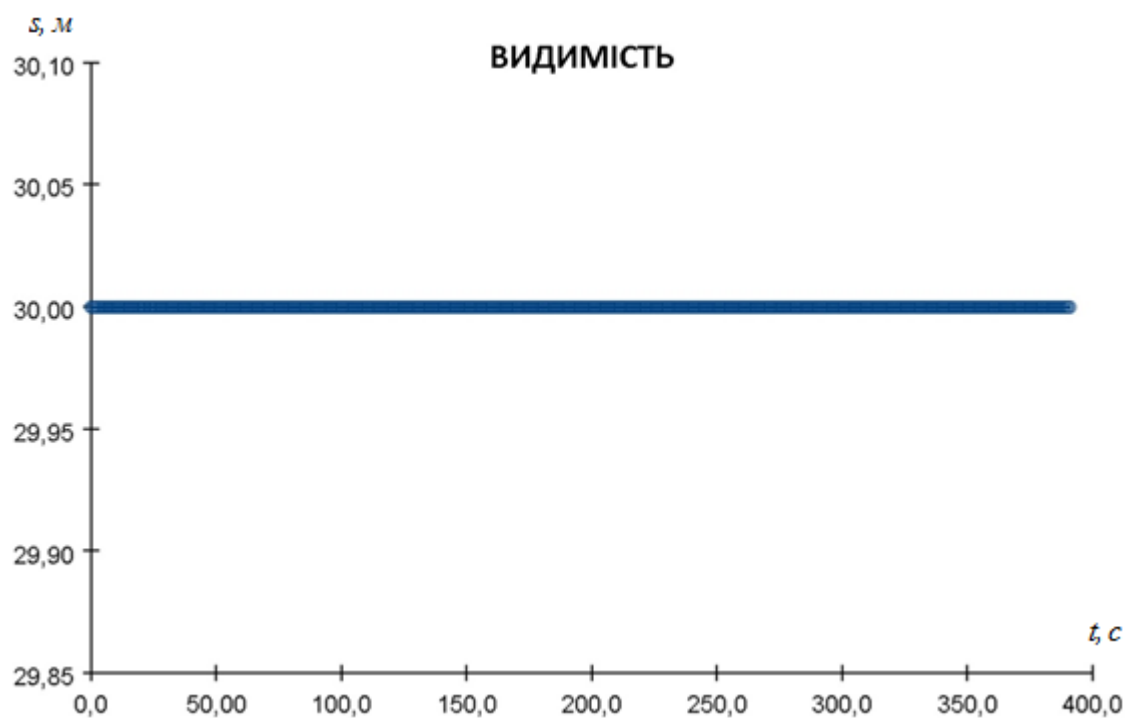


Рисунок 3.37 – Дані датчику задимлення 2 зони, на висоті 1,7 м

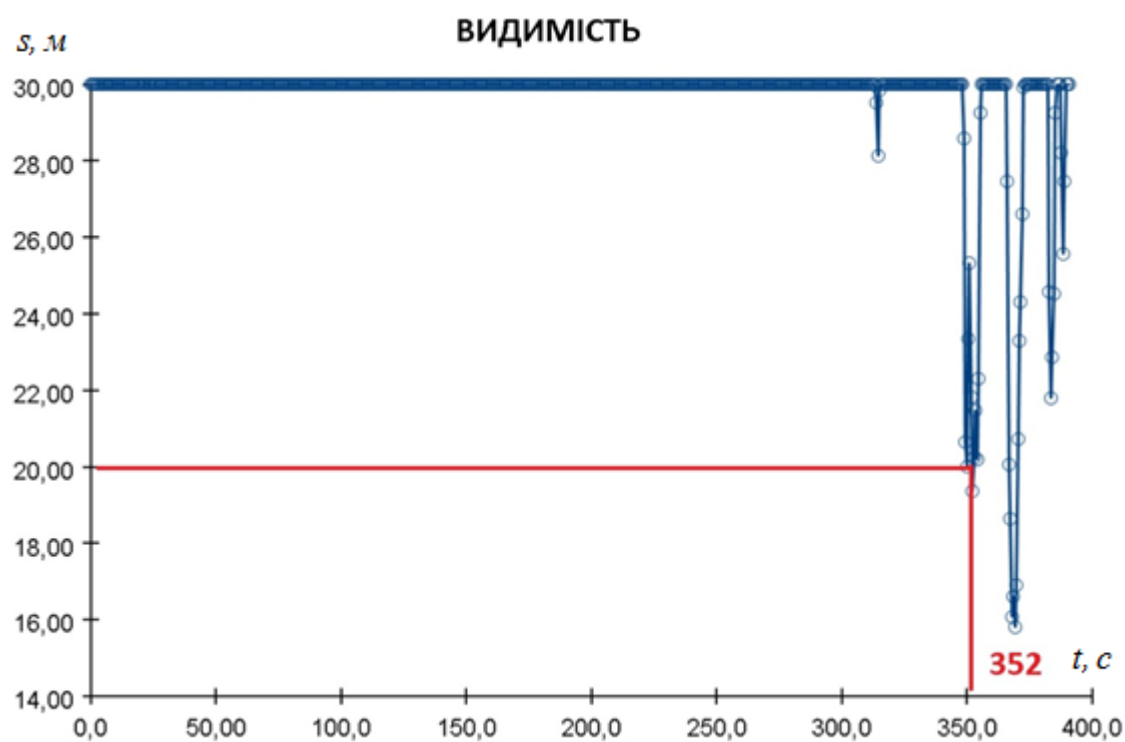


Рисунок 3.38 – Дані датчику задимлення 2 зони, на висоті 3,75 м

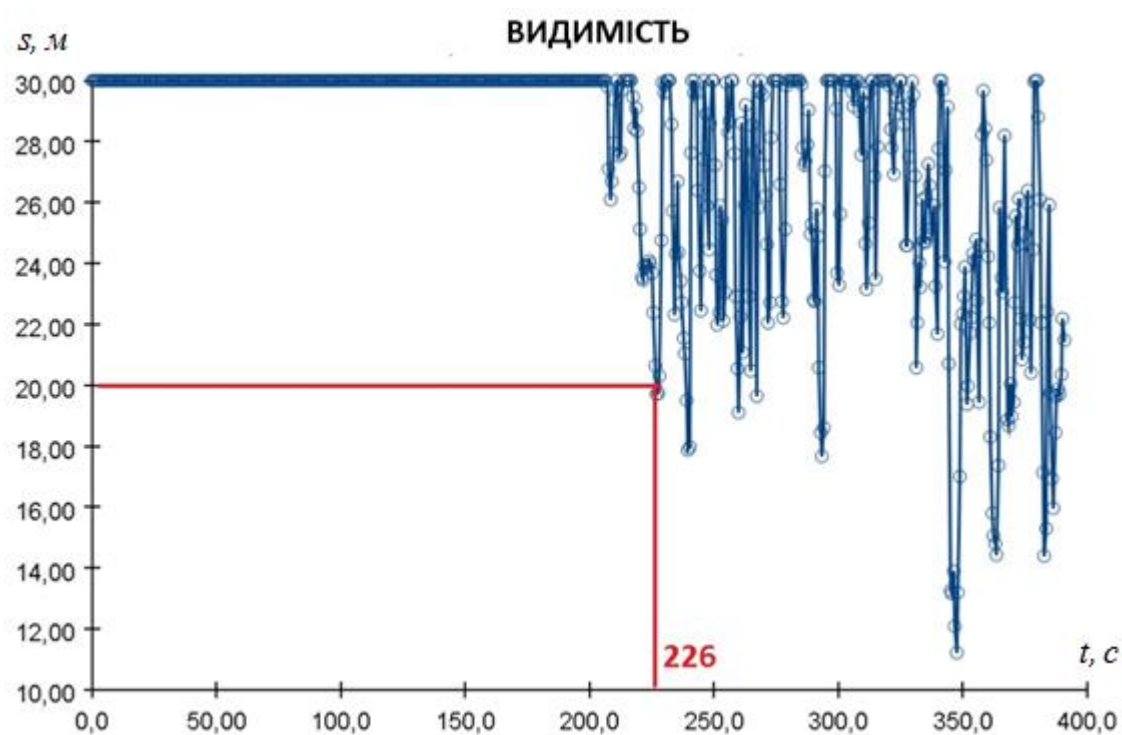


Рисунок 3.39 – Дані датчику задимлення 1 зони, на висоті 1,7 м

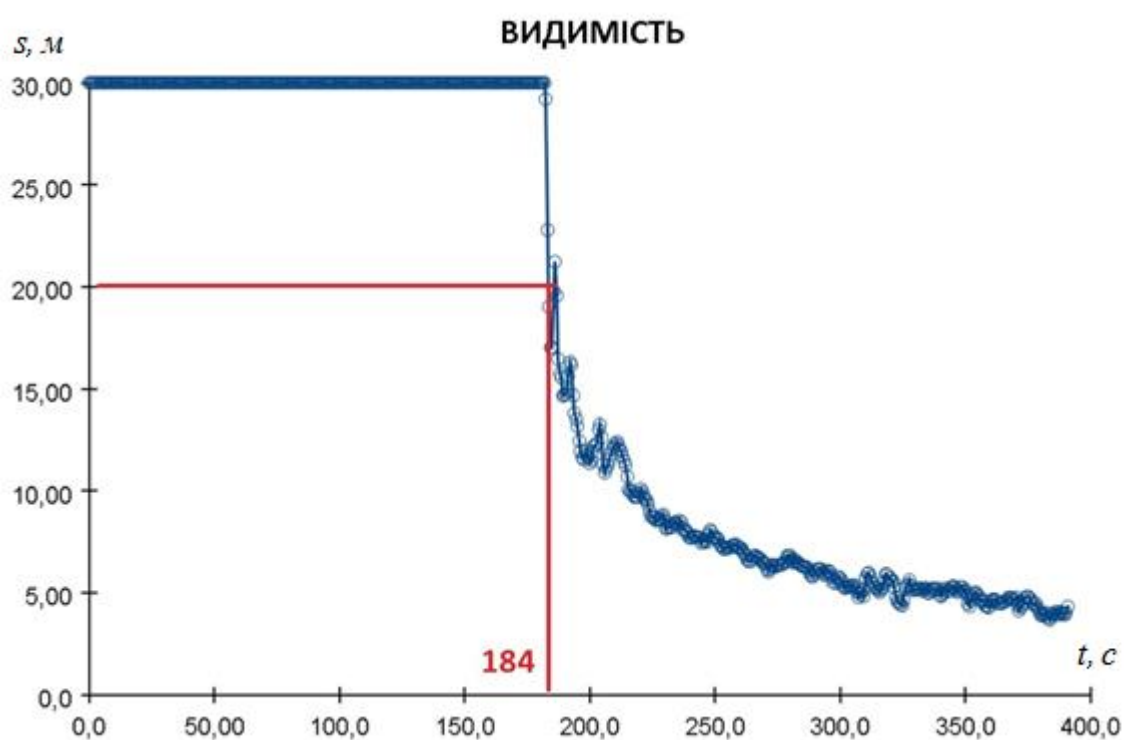


Рисунок 3.40 – Дані датчику задимлення 1 зони, на висоті 3,75 м

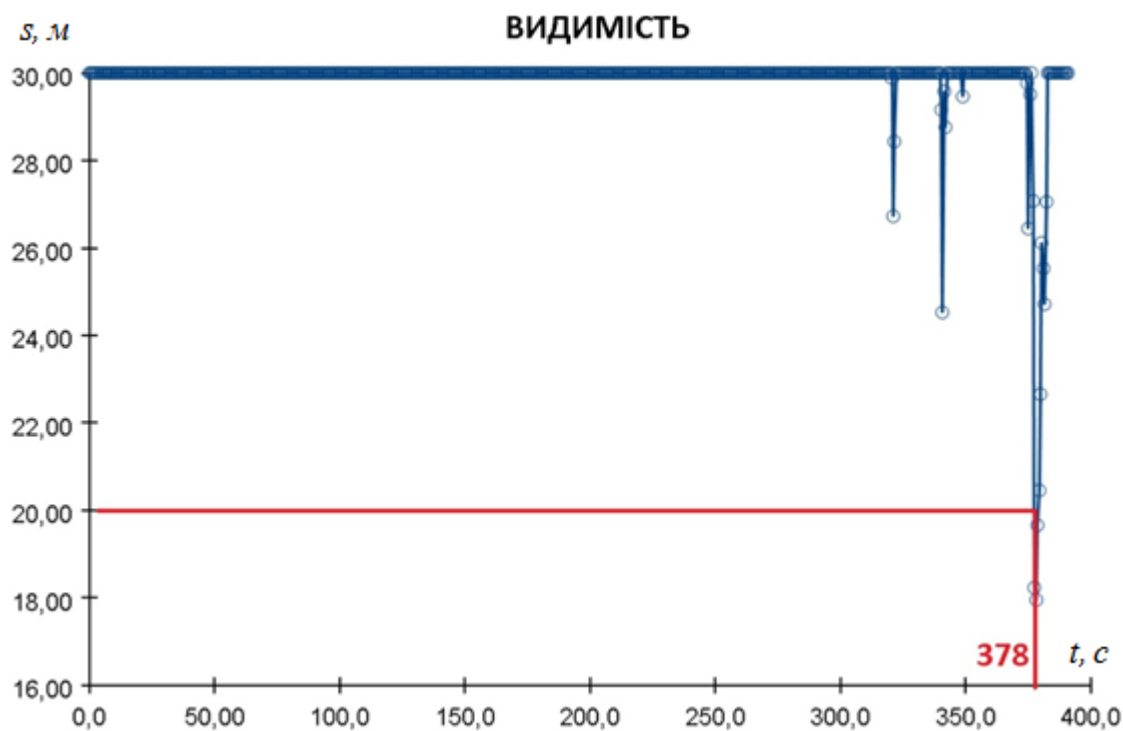


Рисунок 3.41 – Дані датчику задимлення зони ескалаторів, на висоті 1,7 м

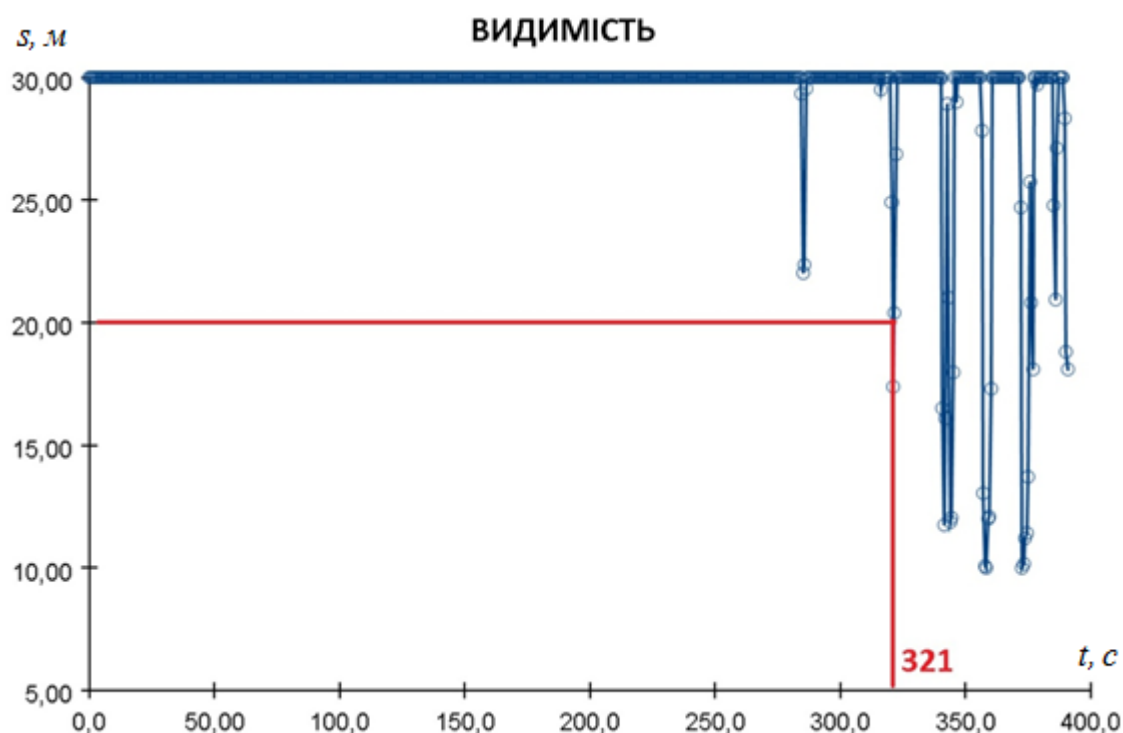


Рисунок 3.42 – Дані датчику задимлення зони ескалаторів, на висоті 3,75 м

В результаті проведення моделювання полів небезпечних чинників пожежі (задимлення) в підвальному поверху на відмітці (-3,750),

встановлено, що димова завіса з геометричною висотою 0,5 м та система димовидалення забезпечують захист від проникнення диму до зон ескалатору та до зони 1 поверху до настання 335 с. Настання граничного значення задимлення підвального поверху на висоті 1,7 настає на 378 с, при цьому, максимальне значення фактичного часу евакуації для підвального поверху згідно [267] становить 295 с, тобто умова забезпечення безпечної евакуації виконується.

### 3.4 Висновки за розділом

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Результати проведеної валідації підтверджують реалізацію запропонованої ідеї щодо створення ієрархічної структури розрахункових методів від простих, які дають результати з більшими коефіцієнтами запасу до складних, за допомогою яких можна отримати більш точні результати. При цьому, із використанням запропонованих математичних моделей отримані реальні дані, які забезпечують досить точні прогнози щодо мінімально необхідного значення протипожежної відстані. Тобто, отримані в результаті розрахунку дані відповідають даним, очікуваним в реальності.

2. Встановлено, що під час горіння пожежної навантаги більше ніж  $1500 \text{ МДж/м}^2$  (в якості якої може бути паливо на автозаправній станції) сусідній будинок, який має коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях від 25% до 50% продовж часу опромінювання до 10 хв повинен розташовуватися на відстані не менше 22,8 м від осередку пожежі, що забезпечує приріст максимальної температури в районі віконних прорізів будинку не вище  $168^\circ\text{C}$ , що не є критичним з точки зору поширення пожежі.

3. Встановлено, що під час горіння пожежної навантаги від  $100 \text{ МДж/м}^2$  до  $400 \text{ МДж/м}^2$ , що зосереджена в с середині будинку, який що має коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях від 25% до 50% продовж часу опромінювання до 10 хв дихальна арматура автозаправної

станції повинна розташовуватися на відстані не менше 20 м від осередку пожежі, що забезпечує приріст максимальної температури в дихальній арматури автозаправної станції не вище 22 °С, що не є критичним з точки зору поширення пожежі.

4. Встановлено, що під час горіння пожежної навантаги більше 1500 МДж/м<sup>2</sup> (в якості якої може бути горіння газу, що вивільняється через отвір діаметром  $d=1000$  мм) продовж часу опромінювання від 10 хв до 60 хв, сусідній резервуар із газом повинен розташовуватися на відстані не менше 20 м, що забезпечує значення теплового потоку на його стінках не більше ніж 34,9 кВт/м<sup>2</sup>, що не є критичним з точки зору поширення пожежі.

5. Встановлено, що під час горіння пожежної навантаги від 400 МДж/м<sup>2</sup> до 1500 МДж/м<sup>2</sup> (в якості якої можуть бути товари магазину) висота димових штори, які забезпечують не поширення пожежі продовж часу опромінювання до 10 хв із висотою поверху будинку до 5 м повинна становити не менше ніж 0,5 м.

6. Показана ефективність обґрунтованих математичних моделей для визначення протипожежних відстаней між об'єктами, таких як модель із використанням рівняння нестационарної теплопровідності та польова модель, які дозволяють максимально врахувати найбільш значущі фактори, що впливають на процеси можливого поширення пожежі, при цьому, визначення протипожежних відстаней мало значний економічний ефект, що доводить перспективи їх застосування.

## РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ

Сутність методів полягає у визначенні щільності теплового потоку  $q_2$  (кВт/м<sup>2</sup>) та температури  $T_2$  (°C) на поверхні об'єкту, що опромінюється (2) від факелу (1) об'єкту, що горить дивись рисунок 4.1 [268].

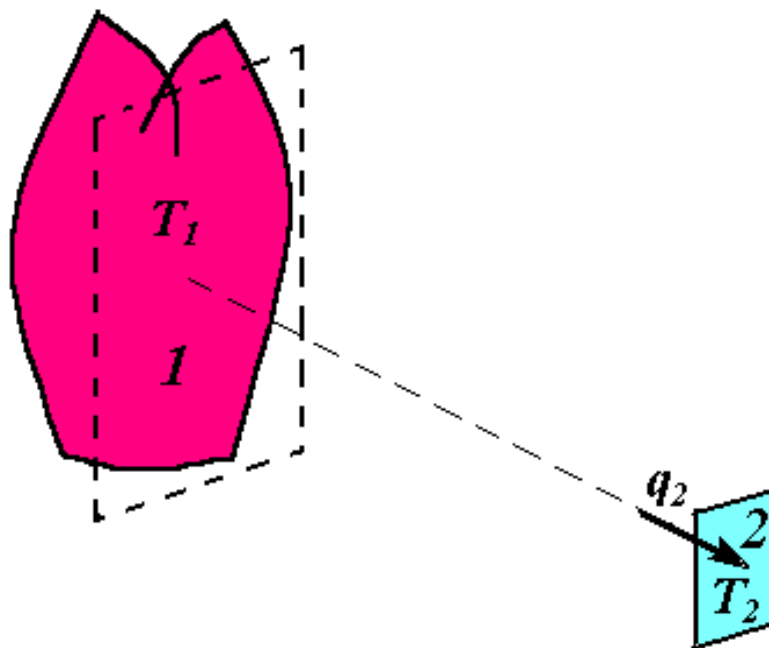


Рисунок 4.1 – Схема опромінення тіла 2 факелом 1: 1 – зведена до прямокутника поверхня факела полум'я, 2 – зведена до прямокутника поверхня тіла, що опромінюється,  $r$  – відстань між площинами прямокутників

#### 4.1 Методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та промисловими спорудами

##### *Обладнання для досліджень*

Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: модельне вогнище пожежі класу В, досліджуваний зразок, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

##### *Модельне вогнище пожежі класу В*

Під час досліджень в якості модельного вогнища в технологічній споруді використовують вогнище пожежі класу 55В, що представляє собою металеве деко діаметром  $1480 \pm 15$  мм, висотою борта  $150 \pm 5$  мм та товщиною стінки борта  $2,5 \pm 0,5$  мм, у яке заливають 18 л води та 37 л дизельного палива (рисунок 4.2) [269].



Рисунок 4.2 – Фото модельного вогнища класу 55 В

##### *Виготовлення досліджуваного зразка*

Під час досліджень використовується 6 зразків.

Для виготовлення одного зразка обрано 6 соснових суцільних бруса розмірами  $50 \times 50 \times 4000$  мм, 30 суцільних соснових дощок розміром  $20 \times 100 \times 700$  мм, 12 брусів  $50 \times 50 \times 1000$  мм, 120 цвяхів розміром  $4 \times 100$  мм, 72 цвяха розміром  $2,5 \times 60$  мм, циркулярний станок, молоток, сушильна камера, олівець, лінійка. Вигляд дослідного зразка зображено на рисунку 4.3 [269].



Рисунок 4.3 – Фото дослідного зразка

Перший етап підготовки зразків – сушка деревини, відбувається в сушильній камері до моменту, коли вологість деревини досягає 12 % [270]. Вологість деревини вимірюється за допомогою електровологоміра [271].

Другий етап підготовки зразків – з'єднання дерев'яних деталей між собою. Після з'єднання дослідний зразок набуває вигляду рисунку 4.3.

Для вимірювання на поверхні зразка температури, висвердлюються отвори, свердлом діаметром 4 мм, для встановлення термопар ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) згідно схемою наведеною на рисунку 4.5. Висвердлювання отвору здійснюється таким чином, щоб товщина недосвердленої частини до поверхні зразка становила в межах 1÷2 мм, що забезпечить визначення найбільш точних даних температурного прогріву поверхні досліджуваного зразка.

З метою обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання проведені експериментальні дослідження визначення розподілу температур зовні

відносно джерела теплового випромінювання. Результати таких досліджень представлені на рисунку 4.4.

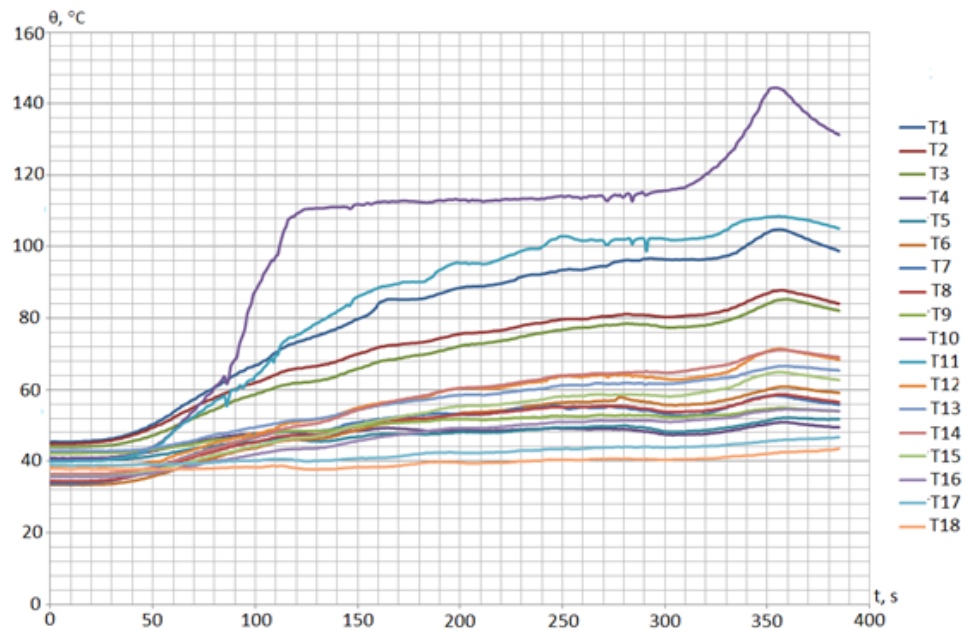


Рисунок 4.4 – Результати досліджень щодо обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання

За результатами зроблені наступні висновки та обґрунтовано місця улаштування дослідних зразків із засобами виміральної техніки, а саме: найбільш інтенсивному тепловому випромінюванню піддаються зразки, що розташовуються по центральній вісі віконного прорізу фрагменту будинку і розташовані на висоті, що відповідає нижньому краю віконного прорізу. Тому запропоновано випробувальні зразки розмістити на рівні нижнього краю віконного прорізу фрагменту будинку та на відстані 2 м, 4 м і 6 м від фрагменту будинку.

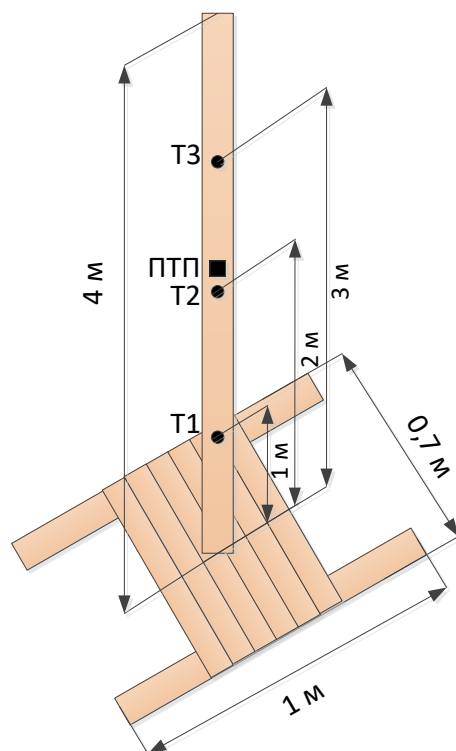
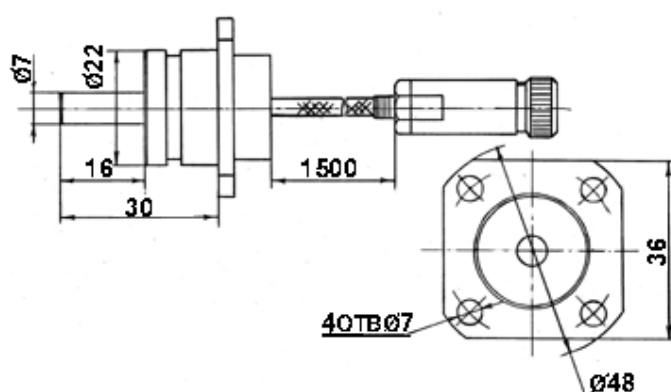


Рисунок 4.5 – Схема дослідного зразка ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – місця висвердлювання отворів для термопар)

На поверхні зразка монтується приймач теплового потоку, який вимірює сумарну густину теплового потоку, ФОА 013-01. Конструктивна схема та фото якого представлена на рисунку 4.6 [269].



а)



б)

Рисунок 4.6 – Конструктивна схема (а) та фото (б) приймача теплового потоку ФОА 013-01

Принцип дії приймача базується на вимірюванні різниці температури, що виникає при дії теплового потоку між центром і боком тонкого константанованого диску (1), закріпленого на мідному тепловідводі (2) (рисунок 4.7). Різниця температур вимірюється диференціальною термопарою, що утворена центральним та боковим мідними термоелектродами (3)

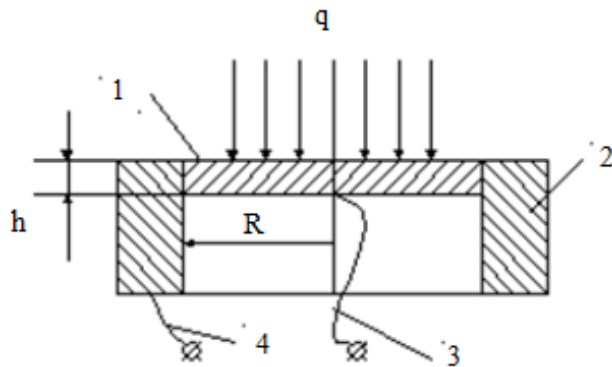


Рисунок 4.7 – Принципова схема роботи приймача теплового потоку ФОА 013-01: 1 – периферія тонкого константанованого диску (ПТКД); 2 – тепловідвід, 3, 4 – центральний та боковий термоелектроди;  $h$ ,  $R$  – товщина та радіус константанованого диску;  $q$  – діючий тепловий потік

Технічні характеристики приймача теплового потоку ФОА 013-01 зазначені в таблиці 1.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики приймача теплового потоку ФОА 013-01

| №  | Параметр                                                        | ФОА 013-01               |
|----|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. | Діапазон вимірюваної густини теплового потоку, $\text{кВт/м}^2$ | від 0 до 630             |
| 2  | Габаритні розміри, мм                                           | $36 \times 36 \times 30$ |
| 3  | Маса приймача, кг                                               | $< 0,350$                |

Густину сумарного теплового потоку, що вимірюється приймачем теплового потоку ФОА 013-01 знаходять за формулою:

$$q = E/k \cdot 10^3 \quad (4.1)$$

де  $q$  – густина сумарного теплового потоку, кВт/м<sup>2</sup>;

$E$  – вихідний сигнал приймача теплового потоку, мВ ;

$k$  – чутливість приймача теплового потоку , мкВ·м<sup>2</sup>/кВт.

Випробувальні зразки встановлюються згідно із схемою наведеною на рисунку 4.8 [269].

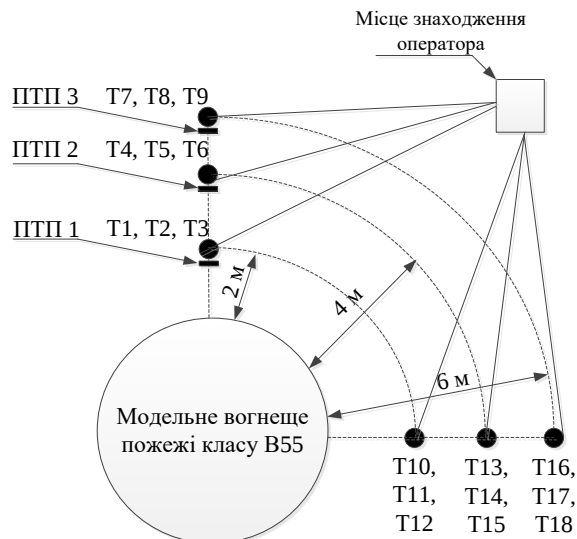


Рисунок 4.8 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів

На рисунку 4.9 Зображено фото улаштування вогнища пожежі випробувальних зразків та вимірювальних приладів

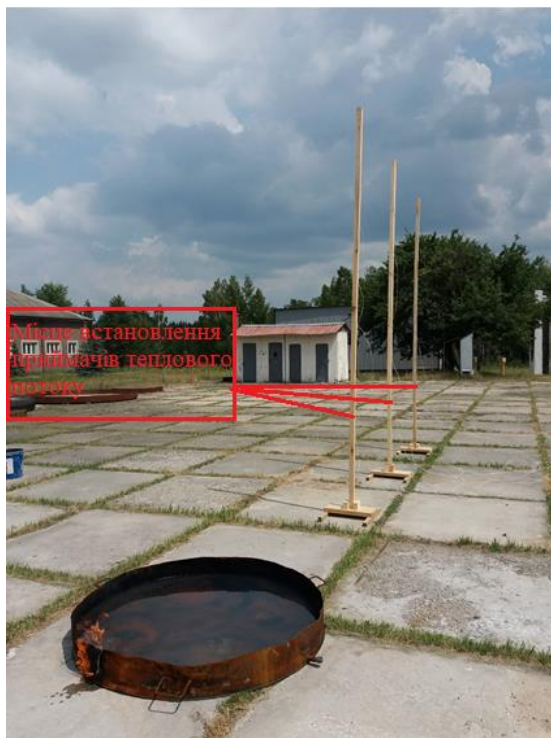


Рисунок 4.9 – Фото улаштування вогнища пожежі випробувальних зразків та вимірювальних приладів

#### *Засоби вимірювальної техніки*

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час натурних вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

#### Технічні характеристики обладнання для досліджень

| № п/п | Найменування обладнання для досліджень    | Характеристика           | Значення характеристики | Одиниці вимірювання | Похибка |
|-------|-------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------|---------|
| 1     | 2                                         | 3                        | 4                       | 5                   | 6       |
| 1.    | Пристрій для вимірювання теплового потоку | Густина теплового потоку |                         |                     |         |
| 2.    | Приймач теплового потоку ФОА 013-01       | Густина теплового потоку | 0÷630                   | кВт/м <sup>2</sup>  | ±5%     |

Продовження таблиці 4.2

| 1   | 2                                              | 3                        | 4               | 5                   | 6                                      |
|-----|------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------|----------------------------------------|
| 3.  | Термопари                                      | Температура              | -40÷1350        | <sup>0</sup> С      | ±2,5 %                                 |
| 4.  | Вимірювально-обчислювальна система «Термоконт» | Температура              | 0÷1200          | <sup>0</sup> С      | ±0,6 %                                 |
| 5.  | Блок регулятор                                 | Сила струму              | 30              | А                   |                                        |
| 6.  | Вологомір для деревини ВПК-12                  | Вологість                | 6÷100           | %                   | ±2 %                                   |
| 7.  | Рулетка Р10 УЗК                                | Метр                     | 0÷10            | м                   | 2 кл. точн.                            |
| 8.  | Психрометр аспіраційний МВ-4М                  | Температура<br>Вологість | -10÷50<br>6÷100 | <sup>0</sup> С<br>% | ±0,2 %<br>±4 %                         |
| 9.  | Барометр-анероїд М67                           | Тиск                     | 600÷800         | мм.рт.ст.           | ±1<br>мм.рт.ст.                        |
| 10. | Анемометр крильчастий АСО-3                    | Швидкість                | 0,3÷5           | м/с                 | ±1 (0,1+<br>0,05V <sub>вим</sub> ) м/с |
| 11. | Фото- відеокамера                              | Матриця                  | 14,2            | пікселей            |                                        |
| 12. | Тепловізор                                     | Матриця                  | 320 x 240       | пікселей            |                                        |

### *Вимоги до проведення досліджень*

Дослідження проводяться не менше трьох разів у безвітряну погоду.

### *Підготовка для проведення досліджень*

1. Виготовляються випробувальні зразки.
2. Розташовується на вогневій площадці модельне вогнище пожежі класу 55В.
4. Установлюються випробувальні зразки згідно із схемою наведеною на рисунку 4.7.
5. Установлюються засоби вимірювальної техніки (термопари, приймачі теплового потоку) згідно із схемою наведеною на рисунку 4.8.
6. Термопари з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», а приймачі теплового потоку із пристроєм для вимірювання величини теплового потоку і перевіряється їх працездатність.
7. Готується обладнання для проведення фото- та відео зйомок.

8. Встановлення тепловізора на штатив таким чином, щоб уникнути його падіння.

9. Готуються первинні засоби пожежогасіння.

*Послідовність проведення досліджень:*

1. Проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, вологості повітря, атмосферного тиску.

1.1. Вимірювання температури та вологості повітря проводиться психрометром аспіраційним МВ-4М, в такій послідовності:

- перед початком роботи виносимо пристрій із приміщення за 15 хв до моменту відліку вимірювань та встановлюємо його з навітряної стіни фрагменту будинку, щоб повітря йшло від пристрою до стіни, на висоті 2 м від поверхні землі;

- знімаємо зовнішній екран правого термометра та вимиваємо резервуар термометра чистою водою;

- обертаємо батистом в один оберт, таким чином, щоб заповнити резервуар термометра на відстані 3 см та зав'язуємо нитками вище і нижче резервуара та обрізаємо вільний кінець на 2-3 мм нижче резервуара;

- змочуємо батист на резервуарі термометра дистильованою водою за 4 хв до початку вимірювань. Для цього беремо наповнений дистильованою водою гумовий балон із затискувачем і легким натискуванням доводимо воду в піпетці не ближче ніж 1 см до краю і утримуємо воду на цьому рівні за допомогою затискувача. Потім вводимо піпетку у внутрішню трубку захисту і змочуємо батист. Витримавши певний час не виймаючи піпетки із трубки, розжимаємо затискувач вбираючи воду в балон і виймаємо піпетку;

- вмикаємо електромотор вентилятора психрометра до джерела живлення;

- через 4 хв після пуску вентилятора проводимо вимір температур по термометрам, відлік знімаємо із точністю до 0,25 ціни поділки шкали, значення температур округлюємо до 0,1 °С;

- температуру повітря зовнішнього середовища фіксуємо по значенню сухого термометра;
- відносну вологість повітря визначаємо за формулою [269]:

$$f = \frac{E_m - A \cdot P \cdot d_\theta \cdot 100\%}{E_c} \quad (4.2)$$

де  $E_m$  – насичена пружність водяного пара при температурі змоченого термометра;

$E_c$  - насичена пружність водяного пара при температурі сухого термометра;

$A$  – психрометричний коефіцієнт, дорівнює  $6,62010 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$P$  – тиск повітря;

$d_\theta$  – різниця між значеннями температур сухого термометра та змоченого термометра,  $^\circ\text{C}$

1.2. Вимірювання атмосферного тиску проводимо барометром анероїдом М67, в такій послідовності:

- встановлюємо барометр в робоче положення, на закріплену горизонтальну поверхню, шкалою до гори. Місце встановлення барометра повинно бути захищене від прямих променів сонця;

- усуваємо тертя в рухомих механізмах за допомогою легких ударів пальцями по корпусу або склу барометра;

- відлік показів барометра здійснюємо в момент повного співпадання в горизонтальній площині покажчика стрілки з його віддзеркаленням на дзеркальній поверхні кільця шкали;

- відлік показів барометра здійснюємо із точністю до 0,3 ціни поділки шкали. Кожний відлік по барометру повинен бути відкоригований введенням до його показників поправок:

а) температурна поправка, визначається за формулою [269]:

$$P_{\theta}=a+b\theta+c\theta^2+d\theta^3+K(\theta-20)(P_k-P_{sl}), \quad (4.3)$$

де  $a, b, c, d, K$  – коефіцієнти типової температурної залежності ( $a=0,18$  мм рт. ст.,  $b=-0,009$  мм рт. ст.,  $c=-0,000014$  мм рт. ст.,  $d=0,000002$  мм рт. ст.,  $K=0,000312$ );

$P_k$  - 97592 Па (732 мм рт. ст.);

$P_{sl}$  – значення тиску, що визначено по барометру;

$\theta$  – температура оточуючого середовища.

б) шкальна поправка, визначається згідно із паспортом барометра анероїда М67.

1.3. Вимірювання швидкості вітру проводимо анемометром крильчастим АСО-3, в такій послідовності:

- перед початком роботи вимикаємо передаточний механізм і записуємо показники лічильника по трьом шкалам;
- анемометр встановлюємо в повітряному потоці вітроприймачем на зустріч потоку і віссю крильчатки вздовж напрямку повітряного потоку;
- через 10-15 секунд одночасно вмикаємо передаточний механізм анемометра і секундомір;
- анемометр витримуємо в повітряному потоці продовж 1-2 хвилин;
- після цього передаточний механізм анемометра і секундомір вимикаємо;
- фіксуємо показники лічильника, а також визначаємо кількість поділок, що припадають на одну секунду;
- швидкість потоку визначаємо по графіку, що додається до анемометра наступним чином: на вертикальній вісі графіка знаходимо число, що відповідає числу поділок шкали лічильника анемометра в секунду. Від цієї точки проводимо горизонтальну лінію до перетину із прямою графіка. Із точки перетину опускаємо вертикальну лінію до перетину із горизонтальною віссю. Точка перетину дає значення швидкості повітряного потоку (м/с).

2. Проводиться вимірювання і реєстрація початкових значень температур за показниками усіх термопар та теплового випромінювання за показниками приймачів теплового випромінювання.

3. Заповнюються вогнище пожежі класу 55В водою та паливом, не більше ніж за 3 хвилини до початку досліджень.

4. Вмикаються вимірювально-обчислювальні пристрої у режим реєстрації, включається відеозйомка та підпалюється вогнище пожежі класу 55 В.

5. Роботи з використанням тепловізора:

- під'єднується акумулятор;
- знімається захисна кришка об'єктиву;
- встановлюється карта пам'яті;
- вмикається тепловізор;
- виконуються базові налаштування. Для більш якісного знання температур з поверхні досліджуваного зразка виставляється коефіцієнт випромінювання згідно з рекомендаціями по використанню приладу (для деревини коефіцієнт випромінювання становить 0,74);
- вмикається запис вимірювання;
- під час проведення вимірювань при необхідності можлива зміна налаштувань та положення приладу відносно дослідних зразків та джерела теплового випромінювання;
- після закінчення дослідження зберігається запис та складається обладнання приладу.

6. Під час проведення досліджень інформаційно-вимірювальною системою вимірюють та реєструють значення температур на обігрівній поверхні дослідного зразка та потужність теплового потоку на відповідних відстанях від модельного вогнища пожежі.

7. Реєстрація температури і теплового потоку проводиться з інтервалом не більше, ніж 1 хв. Фотозйомки проводимо в момент найбільшої

інтенсивності горіння пожежної навантаги. Фото та відео зйомки проводяться з метою визначення геометричних параметрів полум'я.

8. Дослідження тривають до повного вигорання пального у вогнищі пожежі класу 55 В.

#### *Оцінка результатів досліджень*

За результатами досліджень для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначають температуру  $\theta_j$  поверхні дослідного зразка, щільність теплового потоку ( $q_j$ ), геометричні параметри полум'я ( $h_j$ ,  $\delta_j$ ) [272]. Експериментальні дані заносяться до журналу.

За отриманими даними визначається похибка досліджень за формулою [44]:

$$\Delta A = \pm k \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2} \quad (4.4)$$

де  $\Delta A$  – абсолютна похибка досліджуваних величин;

$\Delta A_1$  – похибка датчиків (термопар, датчика теплового потоку, інструментальна);

$\Delta A_2$  – похибка вимірювальних пристроїв (вимірювально-обчислювальна система «Термоконт», пристрій для вимірювання теплового потоку, похибка зняття результатів для вимірювання розмірів (зазвичай дорівнює половині ціни поділки засобів вимірювань));

$k$  – коефіцієнт, який залежить від імовірності ( $k=1,1$  при  $P=0,95$ ).

Визначаються середні значення температур та щільності теплового потоку, а також геометричні параметри полум'я [273]. У графічній формі будуються залежності температур, щільності теплового потоку та геометричних параметрів полум'я від часу.

#### *Вимоги безпеки*

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами [274], інструкціями УкрНДІЦЗ, якими встановлено вимоги з безпеки праці

безпосередньо на робочому місці, іншими нормативними документами з безпеки праці.

Серед персоналу, що проводить дослідження, повинна бути 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 визначити та обгородити тимчасовою огорожею небезпечну зону з відстанню не менше 10 м від вогнища пожежі класу 55 В, в яку стороннім особам входити заборонено.

До проведення досліджень необхідно забезпечити наявність засобів пожежогасіння у кількості достатньому для гасіння вогнища пожежі класу 55В.

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 55 В;

Місце проведення досліджень забезпечують двома переносними водними вогнегасниками ВВ-5.

## **4.2 Методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та будинками**

### *Обладнання для досліджень*

Обладнання для проведення натурних вогневих досліджень включає: фрагмент будинку, досліджуваний зразок, засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

### *Фрагмент будинку*

Фрагмент будинку являє собою двоповерхову споруду (рисунки 4.10 та 4.11) розмірами в плані 4,5 м x 4,5 м x 5,6 м. Приміщення першого поверху є вогневою камерою і призначене для імітування у ньому пожежної

навантаги, що створює у вогневій камері продовж 30 хв температурний режим близький до стандартного температурного режиму [275]. Відстань між підлогами першого та другого поверху складає 2,8 м. Підлогою першого поверху є залізобетонна плита завтовшки 0,3 м. Перекриттям першого поверху та покриттям покрівлі є залізобетонні плити завтовшки 0,2 м. Приміщення першого поверху має віконний проріз розміром 1,2 м × 2,4 м. Стіни фрагменту будинку виконуються з пустотілих бетонних блоків завтовшки 0,19 м. Стіна А фрагменту будинку призначена для монтажу пожежної навантаги.

Колони перерізом 39 × 39 см виконуються із застосуванням пустотілих бетонних блоків. Приміщення мають дверні прорізи. Дверний проріз першого поверху до початку досліджень закривають. Дверний проріз другого поверху під час досліджень має бути відкритим.

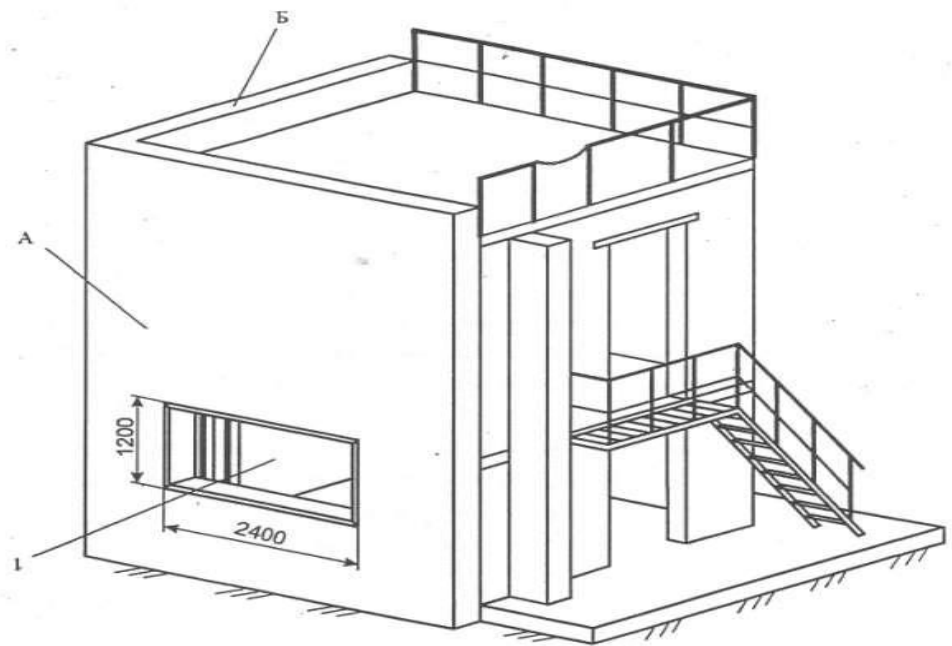


Рисунок 4.10 – Фрагмент будинку: А – стіна, яка призначена для монтажу фасаду, 1 – віконний проріз

На рисунку 4.11 наведено фото фрагменту будинку



Рисунок 4.11 – Фото фрагменту будинку

На стіну А фрагменту будинку монтується пожежна навантага у вигляді дерев'яних зрубів розміром 100 мм х 100 мм, (рисунок 4.12). Відносна вологість зрубів не повинна перевищувати 12 % [270].



Рисунок 4.12 – Фото фрагменту будинку із пожежною навантагою на стіні А

Для створення пожежної навантаги у вогневій камері (приміщення першого поверху фрагмента будинку) встановлюється вогневе навантаження у вигляді штабеля брусків з деревини (схему складання брусків наведено на рисунку 4.13). Штабель повинен складатися з брусків перерізом 3,8 мм × 8,9 мм. Відносна вологість брусків не повинна перевищувати 12 % [270]. Елементи штабелю нарізаються довжиною 1,22 м та 2,44 м. Бруски слід закріплювати цвяхами у вигляді решітчастої кладки, яка вміщує повні яруси та один неповний ярус, який складається з брусків довжиною 2,44 м. Зовнішні розміри штабелю повинні складати: 1,22 м завширшки, 2,44 м завдовжки та 0,724 м заввишки.

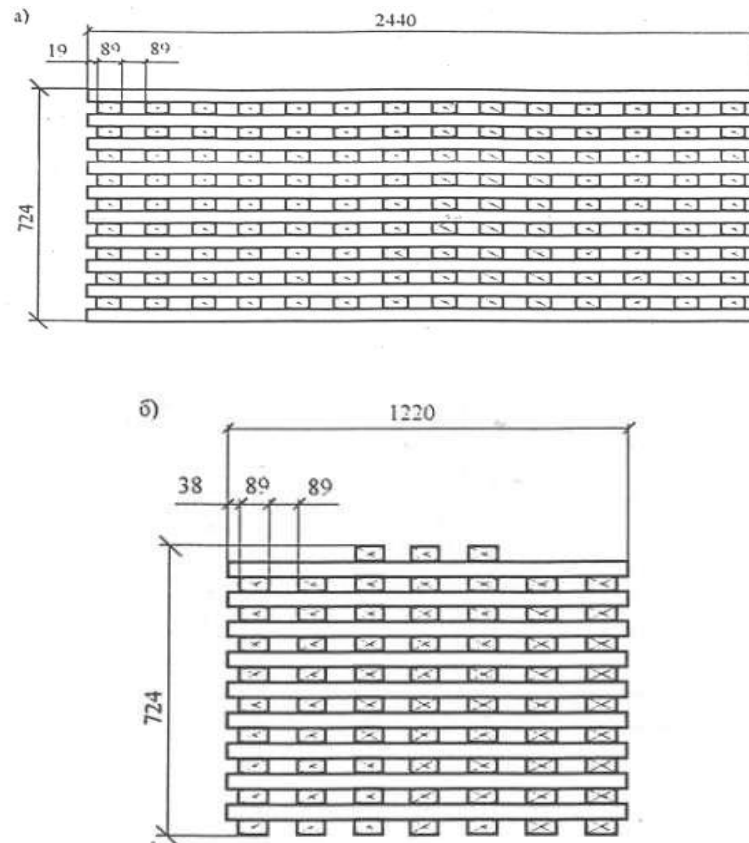


Рисунок 4.13 – Схема складання штабеля брусків з деревини: кожний поперечний ярус (а) складається з 14 елементів довжиною 1,22 м, а кожний поздовжній ярус (б) складається з 7 елементів довжиною 2,44 м. Верхній ярус складається з 3 елементів довжиною 2,44 м, що у сумі складає 18 повних ярусів та 1 неповний ярус.

На рисунку 4.14 зображено фото штабеля пожежної навантаги, що встановлюється у вогневій камері.



Рисунок 4.14 – Фото штабеля пожежної навантаги, що встановлюється у вогневій камері

Штабель повинен розташовуватись симетрично відносно центру прорізу вікна та бути зміщеним у бік вікна. Схему розташування штабелю брусків з деревини у вогневій камері наведено на рисунку 4.15. Питоме вогневе навантаження, яке створює штабель (у перерахунку на деревину) має бути не менше ніж  $25 \text{ кг/м}^2$ , що відповідає умовам створення у вогневій камері продовж 30 хв температурного режиму, найбільш наближеного до стандартного температурного режиму [276 – 278].

Штабель встановлюється на висоті 0,2 м над рівнем підлоги за допомогою бетонних блоків. Для підпалювання штабелю застосовуються два дека розміром  $(1800 \pm 20 \text{ мм}) \times (160 \pm 5 \text{ мм}) \times (60 \pm 5 \text{ мм})$ , які розташовуються під штабелем. В дека наливають по 3,0 л дизельного палива в кожне.

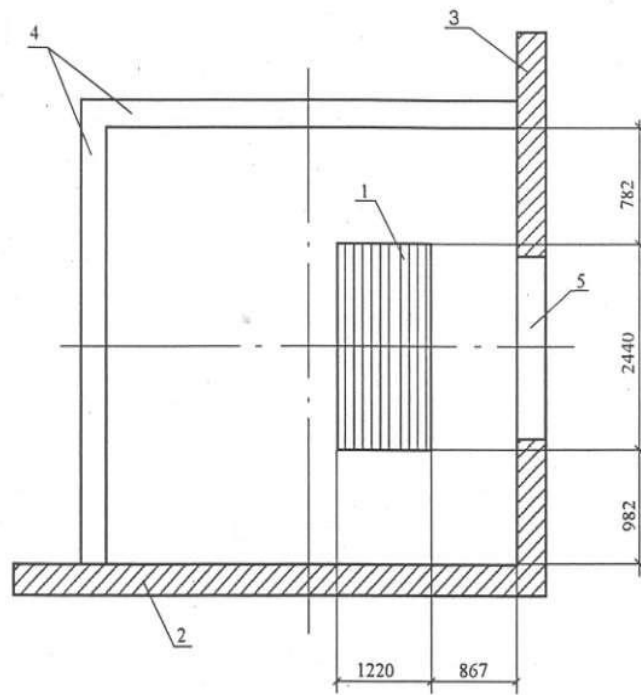


Рисунок 4.15 – Схема розташування штабеля брусків з деревини у вогневій камері: 1 - штабель брусків з деревини, 2, 3 - стіни, які призначені для монтажу постійної пожежної навантаги, 4 - стіни з бетонних блоків; 5 - віконний проріз

#### *Виготовлення досліджуваного зразка*

Під час досліджень використовується 8 зразків.

Для виготовлення одного зразка обрано 7 суцільних соснових дощок розміром  $50 \times 250 \times 4000$  мм, 120 цвяхів розміром  $3,5 \times 90$  мм, циркулярний станок, молоток, дріль, свердло  $4 \times 75$  мм, сушильна камера, олівець, лінійка.

Зразки виготовляються на пожежно-випробувальному полігоні УкрНДІЦЗ.

Перший етап підготовки зразків – сушка деревини, відбувається в сушильній камері до моменту, коли вологість деревини досягає 12 % [270]. Вологість деревини вимірюється за допомогою електровологоміра.

Другий етап підготовки зразків – розпилювання 7 дерев'яних дощок довжиною 4000 мм на 112 штук довжиною по 250 мм.

Третій етап підготовки зразків – зшивання дерев'яних деталей:

1) З'єднання дошок розмірами  $50 \times 250 \times 250$  мм між собою так як показано на схемі (рисунок 4.16).

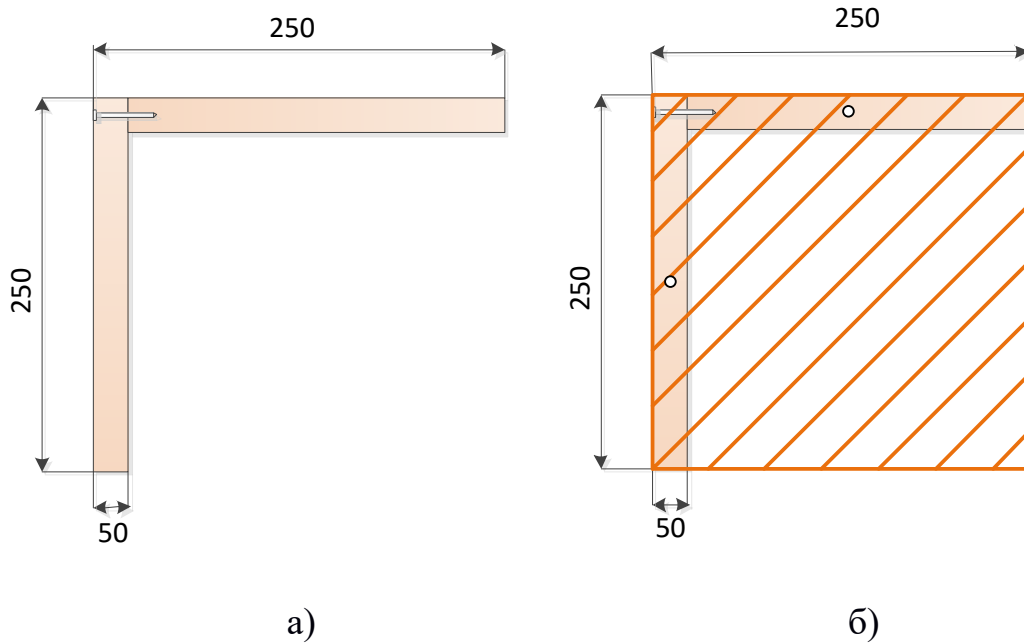


Рисунок 4.16 – Схема з'єднання дошок (вид зверху): а) бічне з'єднання дошок суміжних сторін, б) торцеве з'єднання дошок (тільки з однієї сторони).

Розташування цвяхів повинно бути так як зазначено на схемі

Після з'єднання дошок між собою зразок набуває вигляду (рисунок 4.17) [279].

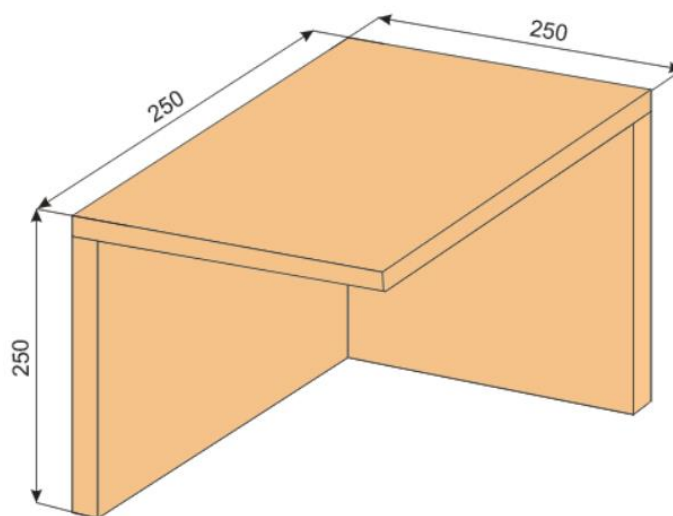


Рисунок 4.17 – Остаточний вигляд зібраного зразка

2) Для вимірювання на поверхні зразка температури, висвердлюється отвір, свердлом діаметром 4 мм, для встановлення термопари згідно схемою наведеною на рисунку 4.18. Висвердлювання отвору здійснюється таким чином, щоб товщина недосвердленої частини до поверхні зразка становила в межах  $1 \div 2$  мм, що забезпечить визначення найбільш точних даних температурного прогріву поверхні досліджуваного зразка [279].

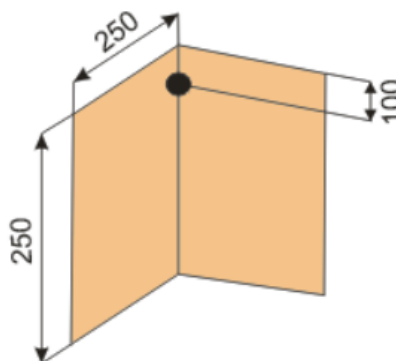


Рисунок 4.18 – Схема розташування термопари

3) Для запобігання втрати тепла в наслідок теплопровідності через дошки із яких виготовлено досліджуваний зразок, торці та внутрішні поверхні дощок зразка обшиваються теплоізоляційним матеріалом мулітокремнеземним фетром МКРФ-100 товщиною 20 мм (рисунок 4.19) [279].

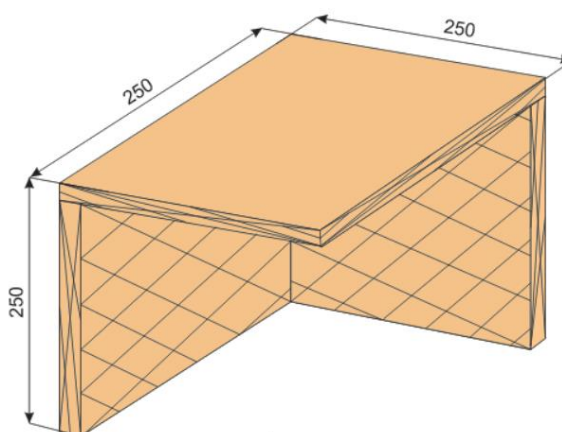


Рисунок 4.19 Місця обшивання досліджуваного зразка теплоізоляційним шаром (  - шар теплоізоляції)

Запропонована форма досліджуваного зразка дозволяє імітувати частину будинку із огорожувальними конструкціями, що підпадає під вплив теплового випромінювання від пожежі. Така форма зразка за рахунок його відповідної орієнтації по відношенню до полум'я дозволить врахувати, під час експериментальних досліджень, найбільш несприятливі умови, при яких нагрівання поверхні зразка буде найбільш інтенсивним [280]. На рисунку 4.20 зображено фото дослідного зразка



Рисунок 4.20 – Фото дослідного зразка

З метою обґрунтування місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання проведені експериментальні дослідження визначення розподілу температур зовні віконного прорізу (на різних відстанях від віконного прорізу та на різних висотах) фрагменту будинку від горіння пожежної навантаги у вигляді штабеля, що розташовується у вогневій камері. Схема улаштування термопар по відношенню до віконного прорізу фрагменту будинку наведена на рисунку 4.21 [281].

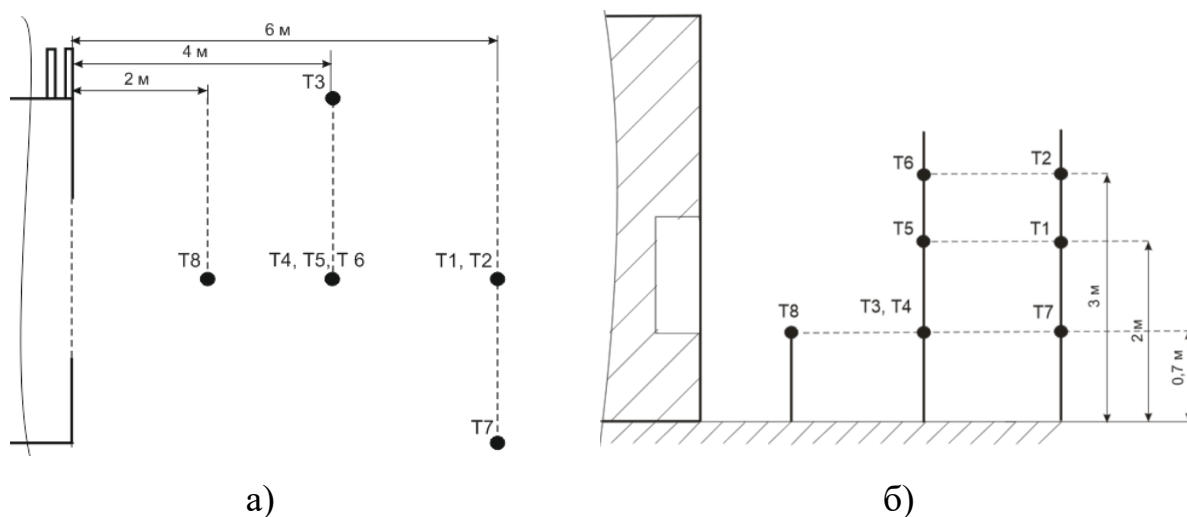


Рисунок 4.21 – Схема улаштування термопар по відношенню до віконного прорізу фрагменту будинку: а) вид зверху, б) вид з боку

На рисунку 4.22 зображено фото дослідного обладнання та фрагмент будинку із улаштуванням термопар та приймачів теплового потоку.



Рисунок 4.22 – Фото дослідного обладнання та фрагмент будинку

Залежності температур від часу теплового випромінювання в різних місцях по відношенню до віконного прорізу фрагменту будинку наведені на рисунок 4.23 [281].

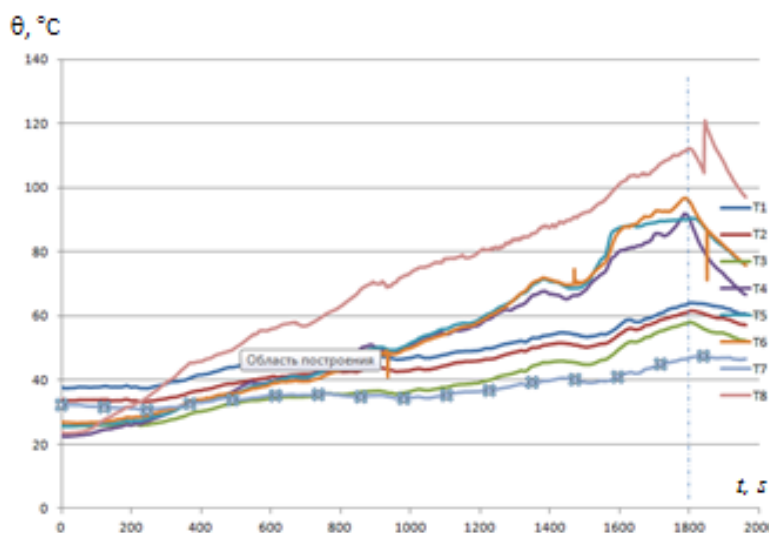


Рисунок 4.23 – Залежності температур від часу теплового випромінювання

Таким чином можна зробити висновки, що найбільш інтенсивному тепловому випромінюванню піддаються зразки, що розташовуються по центральній вісі віконного прорізу фрагменту будинку і розташовані на висоті, що відповідає нижньому краю віконного прорізу.

Тому під час експериментальних досліджень процесів теплопередачі між суміжними об'єктами висота встановлення випробувальних зразків повинна визначатися із розрахунку, щоб випробувальний зразок розташовувався нижче вершини факела пожежі для урахування найбільшого впливу теплового опромінювання від осередку пожежі, а також виключення можливості опромінення від поверхні землі.

Тому запропоновано випробувальні зразки розмістити на рівні нижнього краю віконного прорізу фрагменту будинку та на відстані 2 м, 4 м і 6м від фрагменту будинку, рисунок 4.21.

### *Засоби вимірювальної техніки*

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час натурних вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики приведені в таблиці 4.1.

### *Вимоги до проведення досліджень*

Натурні вогневі дослідження проводяться у два етапи:

- 1 етап: фрагмент будинку оснащується пожежною навантагою у вигляді штабелю, що розміщується у вогневій камері;
- 2 етап: фрагмент будинку оснащується пожежною навантагою у вигляді штабелю, що розміщується у вогневій камері та пожежною навантагою, що монтується на стіні А фрагменту будинку.

Кожний етап натурних вогневих досліджень проводиться не менше трьох разів.

### *Підготовка для проведення досліджень*

1. Виготовляються зразки.
3. Виготовляється і розташовується у вогневій камері фрагменту будинку пожежна навантага у вигляді штабеля, а також дека для її підпалювання.
2. Монтується пожежна навантага на стіну А фрагменту будинку (для другого етапу натурних вогневих досліджень).
4. Установлюються зразки згідно із схемою наведеною на рисунку 4.24, а також монтуються випробувальні зразки на суміжній споруді рисунок 4.25.
5. Установлюються засоби вимірювальної техніки (термопари, приймачі теплового випромінювання) згідно із схемою наведеною на рисунках 4.24, 4.25 [281].

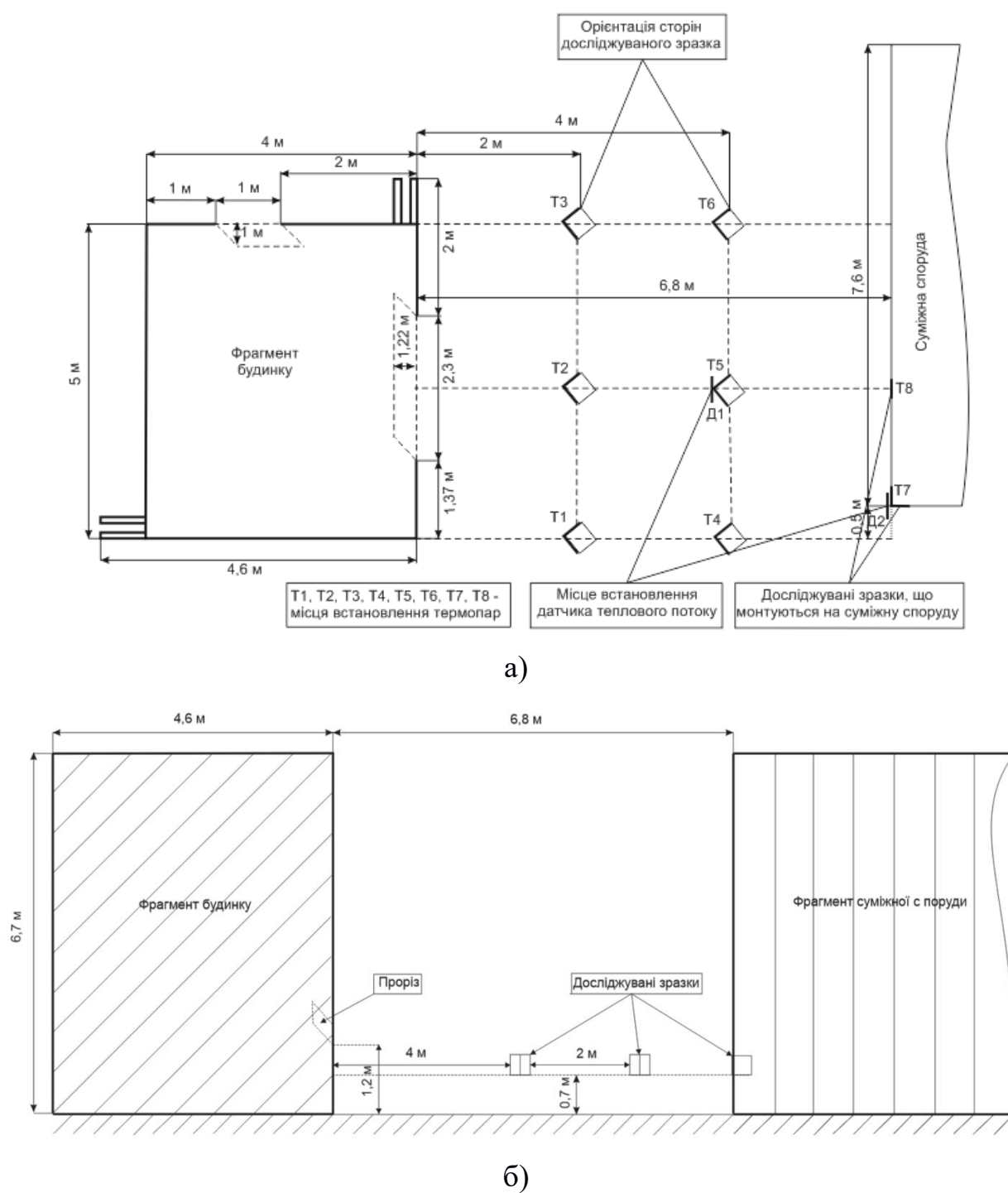


Рисунок 4.24 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів а) вид зверху; б) вид збоку

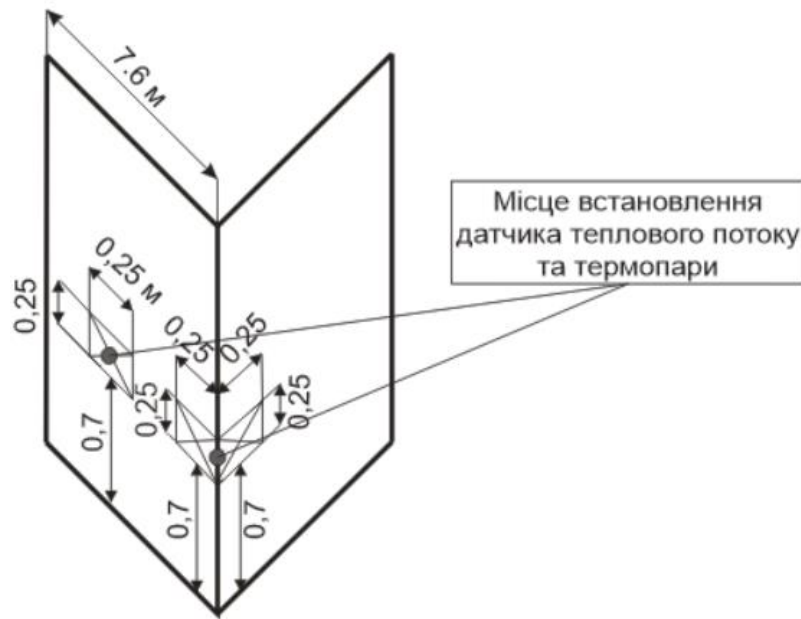


Рисунок 4.25 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів на суміжній споруді

6. Термопари з'єднуються із інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт», а приймачі теплового потоку із пристроєм для вимірювання величини теплового потоку і перевіряється їх працездатність.

7. Готується обладнання для проведення фото- та відео зйомок. Обладнання для проведення фото- та відео зйомок встановлюється з боку фрагменту суміжної споруди напроти прорізу вогневої камери фрагменту будинку.

8. Встановлення тепловізора на штатив таким чином, щоб уникнути його падіння.

9. Готуються первинні засоби пожежогасіння.

#### *Проведення досліджень*

Спочатку проводяться натурні вогневі дослідження із фрагментом будинку, який оснащений пожежною навантагою у вигляді штабелю, що розміщується у вогневій камері (етап 1). Після цього проводяться натурні вогневі дослідження із фрагментом будинку, який оснащений пожежною навантагою у вигляді штабелю, що розміщується у вогневій камері та пожежною навантагою, що монтується на стіні А фрагменту будинку (етап 2).

Дослідження завершують після повного вигорання пожежної навантаги фрагменту будинку.

*Послідовність проведення досліджень:*

1. Проводиться вимірювання і реєстрація параметрів зовнішнього середовища, а саме: температури повітря, швидкості вітру, вологості повітря, атмосферного тиску у послідовності, що наведена у розділі 4.1 цієї роботи.

2. Проводиться вимірювання і реєстрація початкових значень температур за показниками усіх термопар та теплового випромінювання за показниками приймачів теплового випромінювання.

3. Заповнюються дека для підпалювання штабеля палимим, не більше ніж за 3 хвилини до початку досліджень, та закривається дверний проріз першого поверху фрагменту будинку.

4. Вмикаються вимірювально-обчислювальні пристрої у режим реєстрації, включається відеозйомка та підпалюються дека за допомогою дистанційного електричного підпалювача.

5. Використання тепловізора згідно з методом описаним у розділі 4.2.

6. Реєстрація температури і теплового потоку проводиться з інтервалом не більше, ніж 1 хв. За результатами досліджень для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначають температуру  $\theta_j$  поверхні дослідного зразка, щільність теплового потоку ( $q_j$ ), геометричні параметри полум'я ( $h_j$ ,  $\delta_j$ ). Експериментальні дані заносяться до журналу.

Фотозйомки проводимо в момент найбільшої інтенсивності горіння пожежної навантаги. Фото та відео зйомки проводяться з метою визначення геометричних параметрів полум'я, для цього поруч із фрагментом будинку розташовуються рейки із попередньо нанесеними на них шкалою відстані (для етапу 2) та шкала відстані наноситься безпосередньо на фрагменті будинку (для етапу 1).

*Оцінка результатів досліджень*

Оцінювання результатів досліджень проводиться у послідовності наведених у розділі 4.1 цієї роботи.

### *Вимоги безпеки*

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами [274], інструкціями УкрНДІЦЗ, якими встановлено вимоги з безпеки праці безпосередньо на робочому місці, іншими нормативними документами з безпеки праці.

Серед персоналу, що проводить дослідження, повинна бути 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 визначити та обгородити тимчасовою огорожею небезпечну зону з відстанню не менше 10 м від фрагмента будинку, в яку стороннім особам входити заборонено.

До проведення досліджень необхідно забезпечити наявність засобів пожежогасіння у кількості достатньому для гасіння постійної та тимчасової пожежної навантаги фрагменту будинку.

Під час проведення досліджень оператор має бути екіпірований захисним одягом пожежника, пожежною каскою та поясом, захисними рукавицями та взуттям.

Забороняється:

- обливати водою внутрішні та зовнішні стіни фрагмента будинку;
- під час гасіння тимчасової пожежної навантаги заходити у вогневу камеру.

Місце проведення досліджень забезпечують двома переносними водними вогнегасниками ВВ-5.

### **4.3 Висновки за розділом**

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблена методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та промисловими спорудами (пожежа не обмежується вогнеперешкоджувальними огорожувальними будівельними конструкціями).

2. Розроблена методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання та будинками (пожежа обмежується вогнеперешкоджувальними огорожувальними будівельними конструкціями, а опромінювання суміжного об'єкту відбувається через віконний проріз).

3. Запропоновано новий досліджуваний зразок форма якого дозволяє імітувати частину будинку із огорожувальними конструкціями, що підпадає під вплив теплового випромінювання від пожежі та дозволяє врахувати, під час експериментальних досліджень, найбільш несприятливі умови, при яких нагрівання поверхні зразка відбувається найбільш інтенсивною.

4. Обґрунтовано місця улаштування досліджуваних зразків по відношенню до джерела теплового випромінювання та встановлено, що під час експериментальних досліджень процесів теплопередачі між суміжними об'єктами висота встановлення випробувальних зразків повинна визначатися із розрахунку, щоб випробувальний зразок розташовувався нижче вершини факела пожежі для урахування найбільшого впливу теплового опромінювання від осередку пожежі, а також виключення можливості опромінення від поверхні землі.

5. Розроблено методику та експериментальне обладнання для визначення критичного значення щільності теплового потоку для речовин і матеріалів

## РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 5.1 Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела модельного вогнища пожежі класу В на елементи суміжних об'єктів

#### 5.1.1 За критерієм температури

Для визначення температурного впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в промисловій споруді, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур на поверхні досліджуваних зразків проведені експериментальні дослідження процесів теплопередачі від модельного вогнища пожежі класу 55 В згідно із методикою наведеною у розділі 4.1.

Дані дослідження імітують випадок опромінювання сусідньої споруди від осередку теплового випромінювання, що не обмежений конструкціями, які можуть чинити опір поширенню тепла. Як правило це пожежі в зовнішніх технологічних установках [281].

Модельне вогнище пожежі та досліджувані зразки, які описані у розділі 4.1. Встановлювалися згідно із схемою, що наведена на рисунку. 5.1 [269].

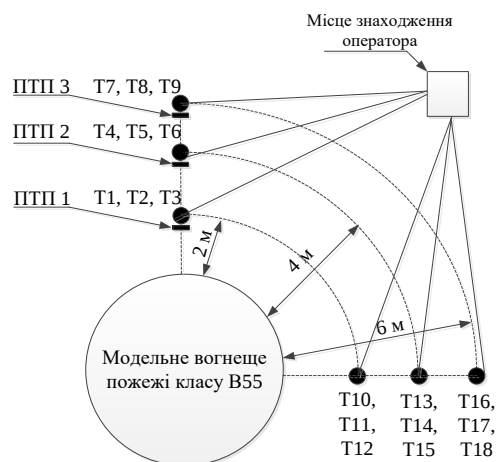


Рисунок 5.1 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірних приладів

На рисунку 5.2 зображені фото розташування модельного вогнища пожежі та досліджуваних зразків, а також фото під час проведення експериментального дослідження.



а)

б)

Рисунок 5.2 – Фото експериментальних досліджень: а) розташування модельного вогнища пожежі та досліджуваних зразків перед проведенням експериментальних досліджень, б) фрагмент проведення експериментального дослідження

Під час експериментального дослідження спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків, що можна прирівняти до експоненційного розподілу [282], дослідні зразки, які розташовувалися на відстанях 2 м обвуглювалися, але їх займання не відбувалося. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігалось на 10 хв експериментального дослідження.

Усереднені результати експериментальних досліджень представлені на рисунку 5.3 [283, 284].

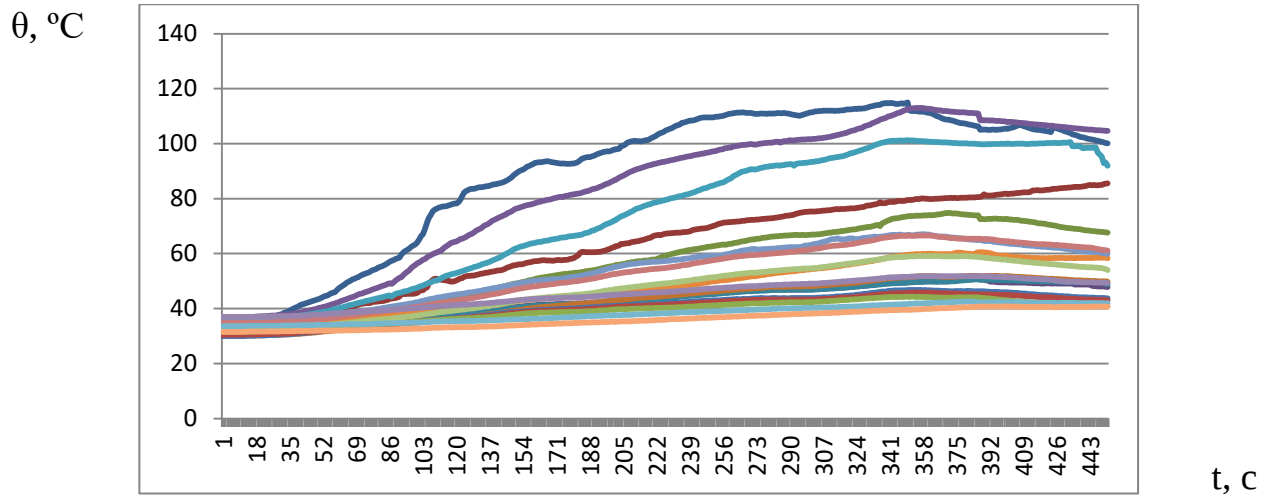


Рисунок 5.3 – Усереднені результати експериментальних досліджень

Із рисунку 5.3 можна визначити максимальні значення температур, що фіксувалися термопарами так вони становлять: для T1 – 116 °C, для T2 – 101 °C, для T3 – 76 °C, для T4 – 53 °C, для T5 – 55 °C, для T6 – 55 °C, для T7 – 45 °C, для T8 – 47 °C, для T9 – 48 °C, для T10 – 110 °C, для T11 – 85 °C, для T12 – 70 °C, для T13 – 48 °C, для T14 – 67 °C, для T15 – 55 °C, для T16 – 48 °C, для T17 – 40 °C, для T18 – 49 °C, що досягнуті на 7-й хвилині дослідження.

Проведемо перевірку результатів досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса [285].

Для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряду  $y_{jmax}$  викидом чи квазівикидом, розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmax}$  за формулою 5.1 [284].

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (5.1)$$

де  $\bar{y}_j$  і  $S_j$  - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 5.2 [285]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{S_j} \quad (5.2)$$

Розраховані таким чином значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [285], які для п'яти досліджень відповідно становлять 1,715 та 1,764.

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 рисунку 5.4.

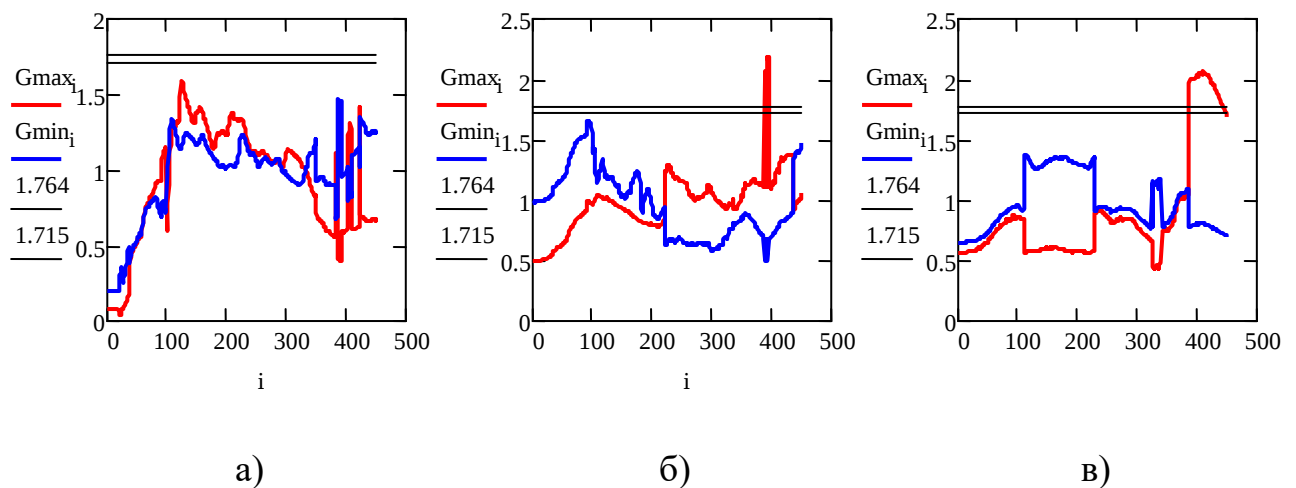


Рисунок 5.4 – аркуш 1. Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса: а)-в) значення показів термопар відповідно Т1 – ТЗ

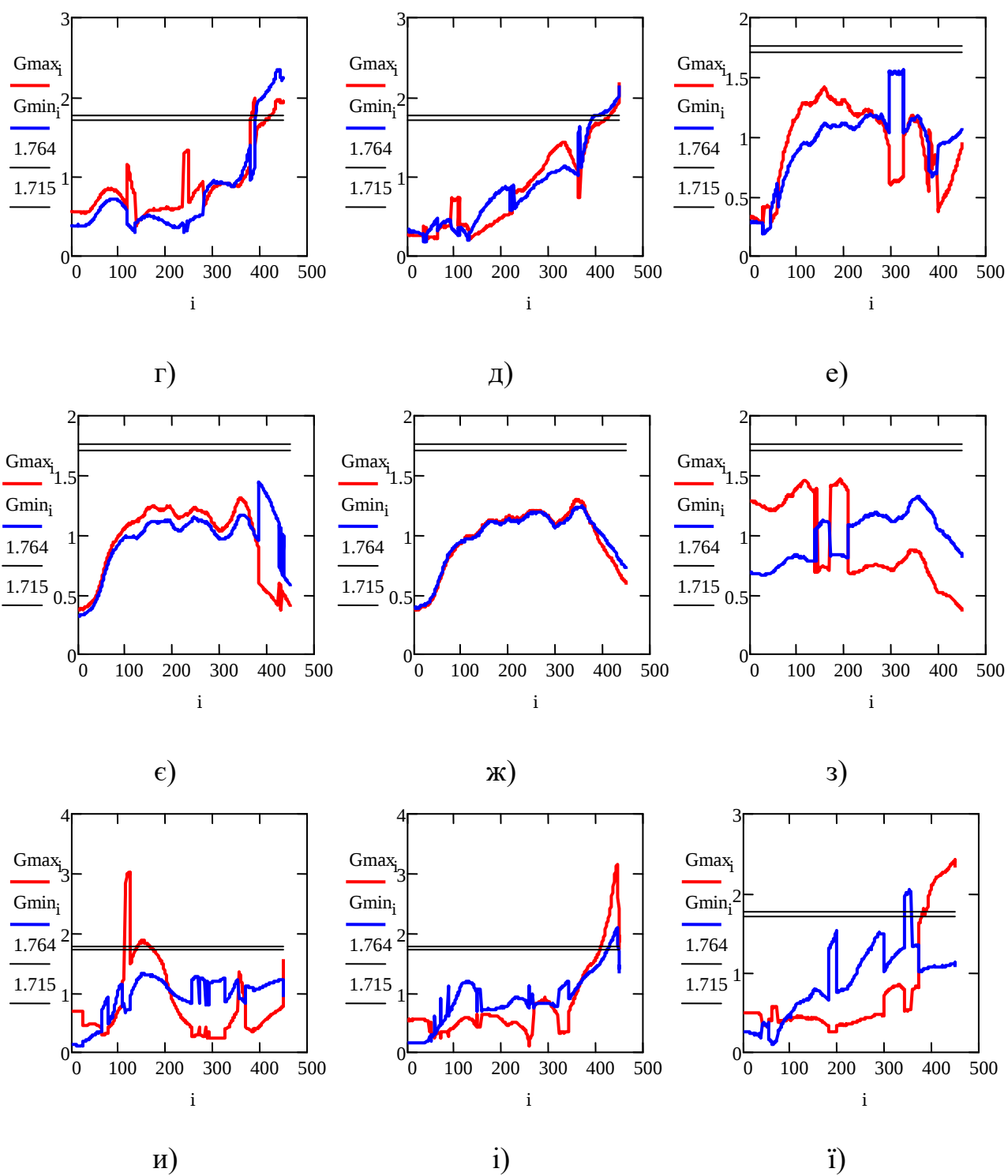


Рисунок 5.4 – аркуш 2. Значення показів термопар T1 – T12

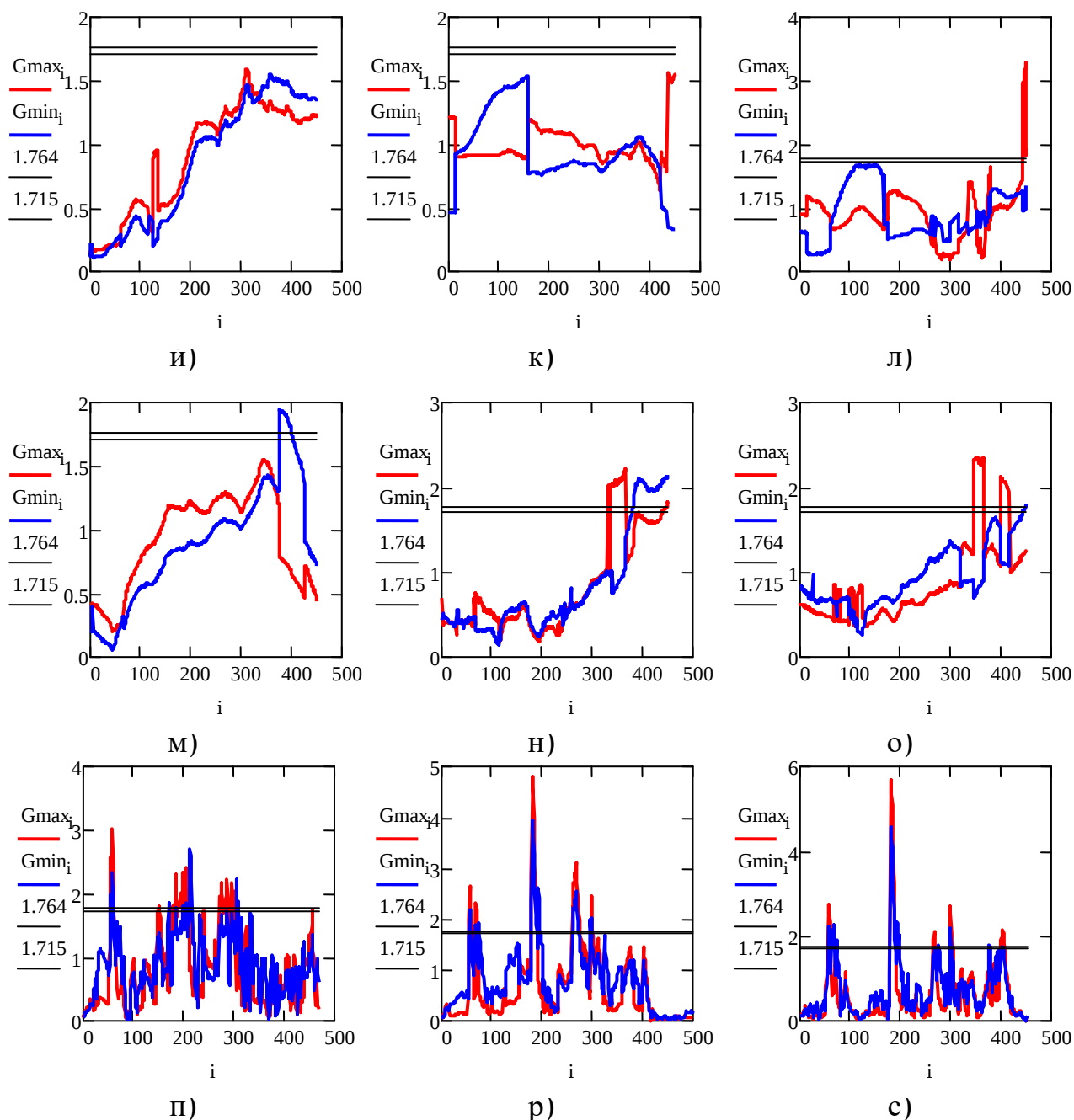


Рисунок 5.4 – аркуш 3. Значення показів термодпар відповідно: и) – с)

T13-T21

Таким чином отримані результати свідчать, що експериментальні дослідження за термопарами T1, T6-T9, T13, T14 не містять викидів та квазівикидів. А експериментальні дослідження за термопарами T2-T5, T10 – T12, T15-T21 містять викиди та квазівикиди, які ми виключаємо та переходимо до подальшого оброблення результатів експериментальних досліджень.

За даними термопар, що розташовувалися в осередку пожежі (термопари Т19-Т21, дивись рисунок 4.3 розділу 4.1) визначено залежність температури в осередку модельного вогнища пожежі класу 55 В на різних висотах від часу дослідження. На рисунку 5.5 показано графіки зміни температури в осередку пожежі, модельного вогнища пожежі класу 55 В, що заповнене дизелем, в залежності в часі для різних висот розташування термопар.

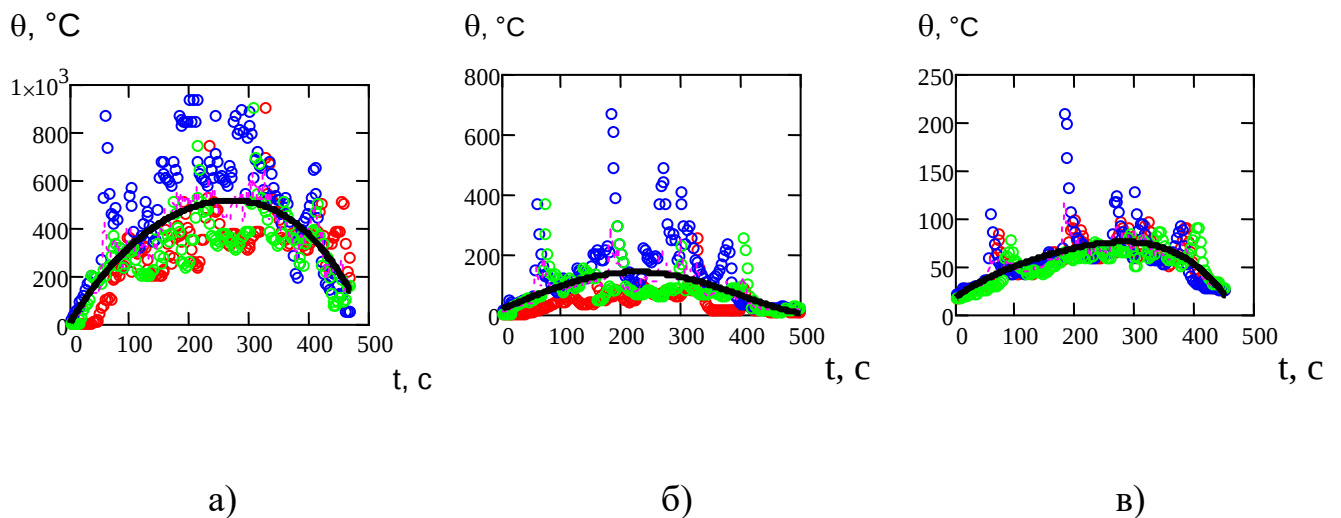


Рисунок 5.5 – Зміна температури в осередку пожежі, модельне вогнище пожежі класу 55 В, у часі, залежно від висоти встановлення термопар: а) 1 м; б) 2 м; в) 3 м

Із рисунку 5.5 встановлено, що під час горіння модельного вогнища пожежі класу 55 В зміну температури полум'я можна умовно поділити на такі стадії: стадія зростання температури, яка триває до 4 хв дослідження; стадія усталеної температури, яка триває від 4 до 6 хв дослідження і стадія спадання температури. Максимальні значення температур в залежності від висоти встановлення термопар становлять відповідно: на висоті 1 м – 565 °С, на висоті 2 м – 185 °С, на висоті 3 м – 68 °С, що досягнуті приблизно на 5-6-й хвилини дослідження.

За результатами 5-ти експериментальних досліджень, з метою визначення збіжності кожного окремого експериментального дослідження,

побудовані графіки порівнянь для кожної термопари та для кожних відповідних пар термопар, що розташовувались на однакових відстанях та висотах відносно модельного вогнища пожежі. Порівняння проводилися за такими парами термопар T1 та T10 (відстань 2 м, висота 1 м), T2 та T11 (відстань 2 м, висота 2 м), T3 та T12 (відстань 2 м, висота 3 м), T4 та T13 (відстань 4 м, висота 1 м), T5 та T14 (відстань 4 м, висота 2 м), T6 та T15 (відстань 4 м, висота 3 м), T7 та T16 (відстань 6 м, висота 1 м), T8 та T17 (відстань 6 м, висота 2 м), T9 та T18 (відстань 6 м, висота 3 м). Результати порівнянь для кожної термопари наведені на рисунках 5.6 – 5.15.

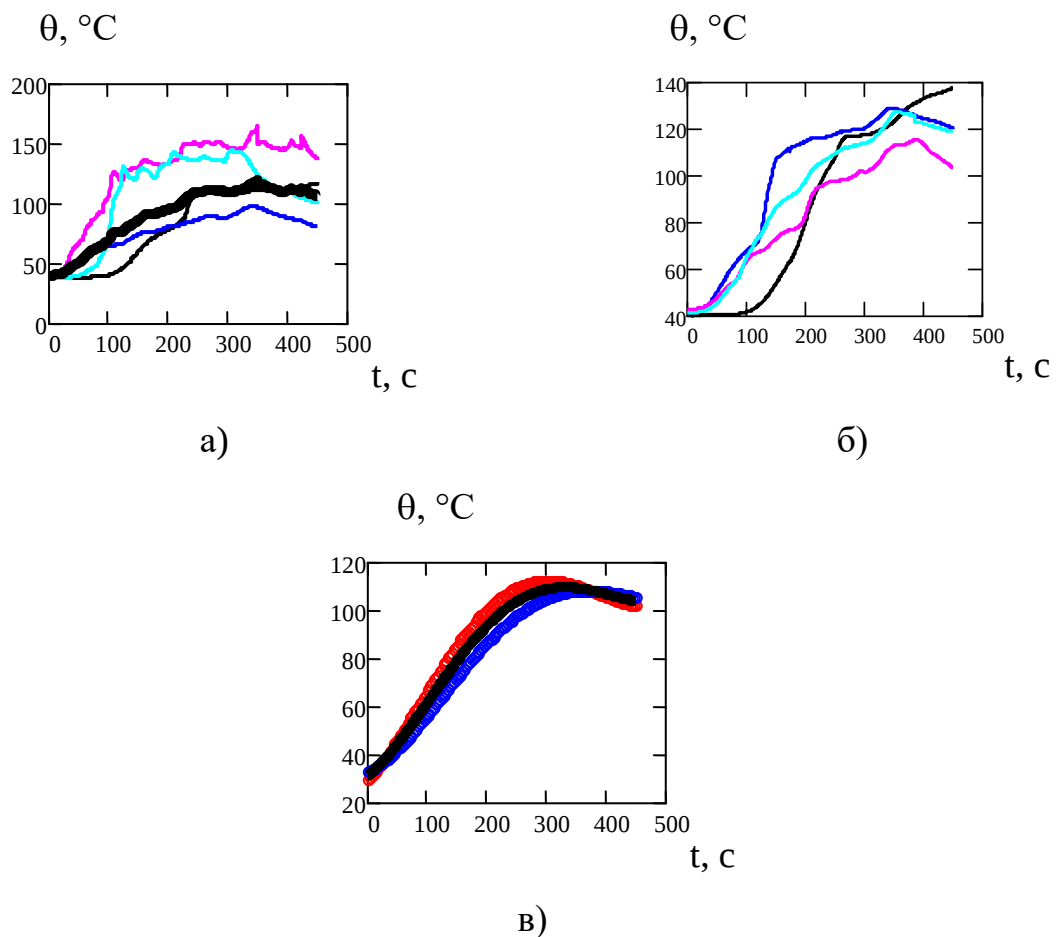


Рисунок 5.6 – Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами T1; б) за термопарами T10; в) середні значення за термопарами T1 та T10

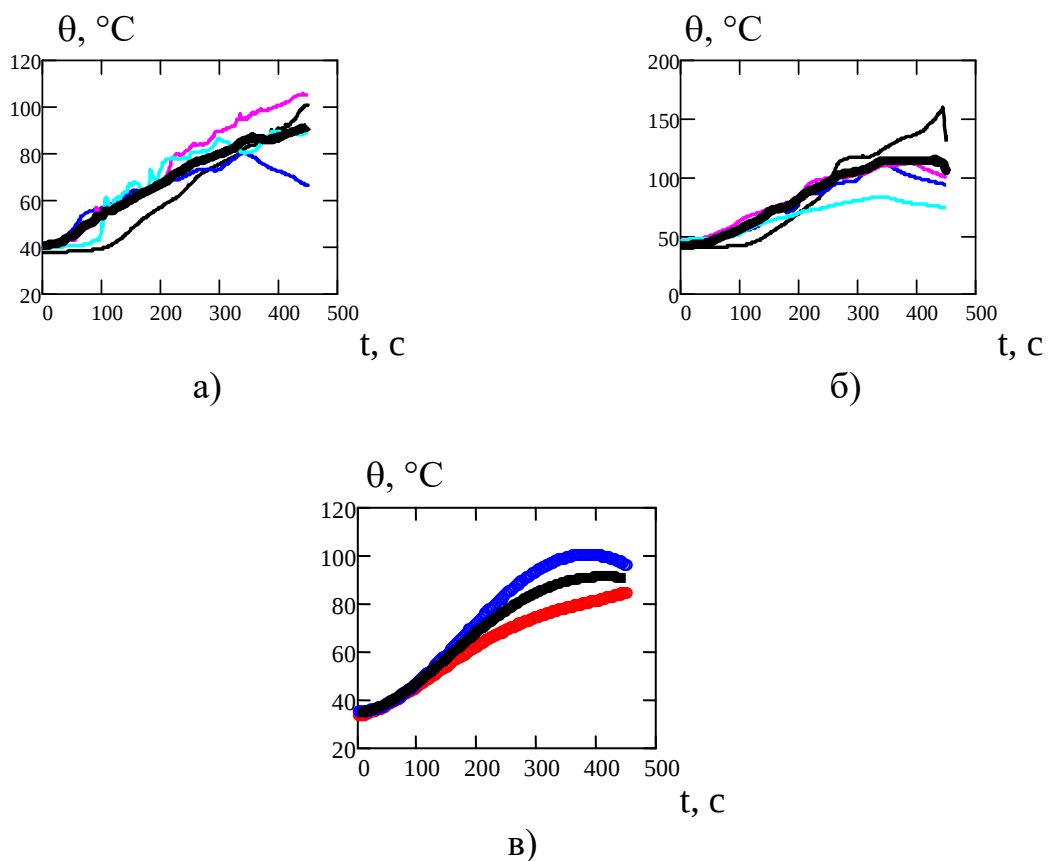


Рисунок 5.7 – Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами T2; б) за термопарами T11; в) середні значення за термопарами T2 та T11

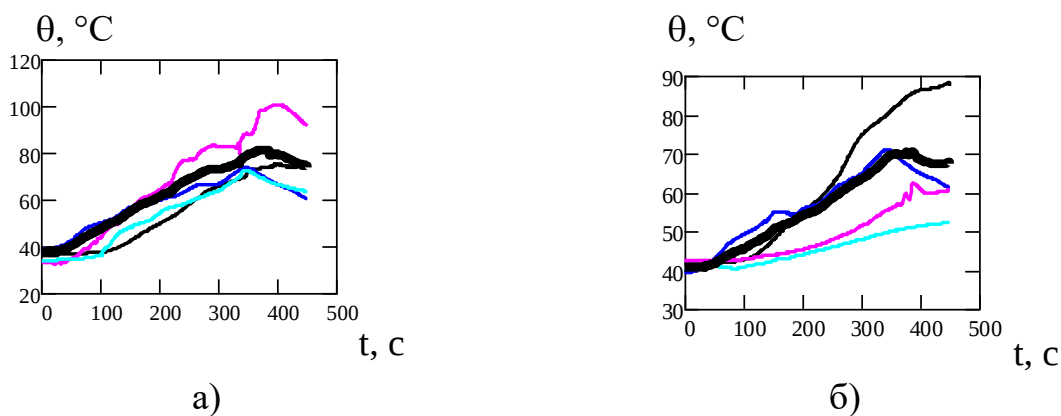


Рисунок 5.8 – аркуш 1. Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами T3; б) за термопарами T12

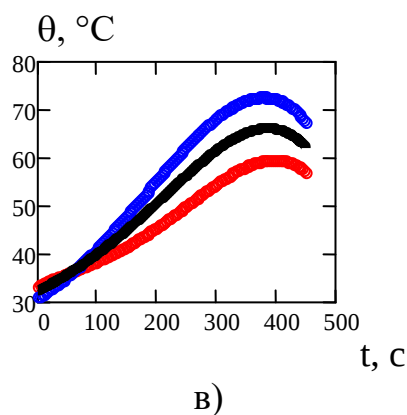


Рисунок 5.8 – аркуш 2. Середні значення за термопарами в): Т6 та Т15

Різниця між показами аналогічних термопар зростає по мірі віддалення розташування термопар від землі (рисунок 5.8).

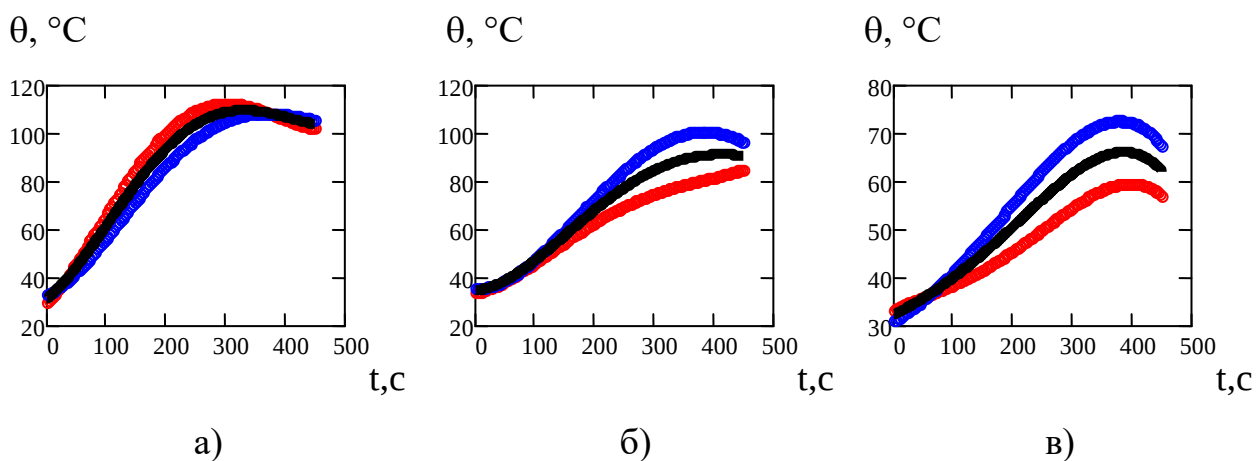


Рисунок 5.9 – Середні значення зміни температур в аналогічних парах досліджуваних зразків, в залежності від висоти розташування термопари

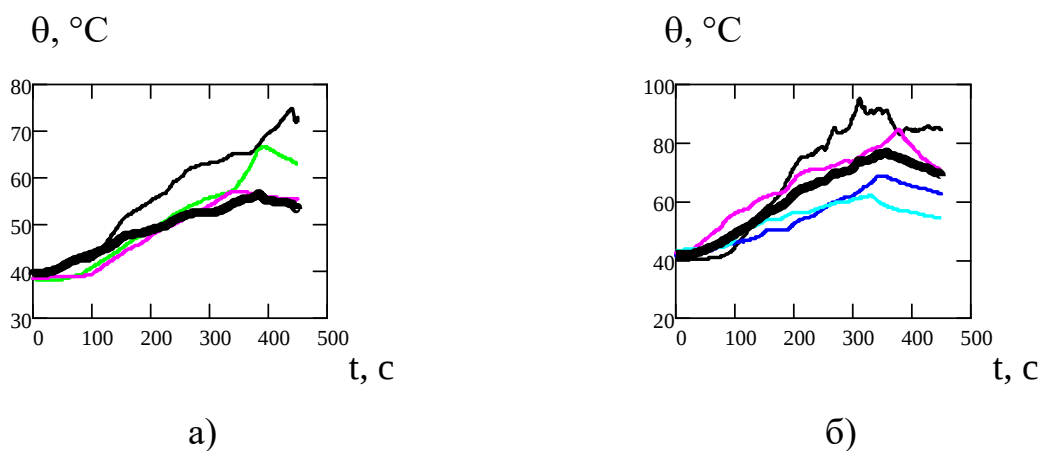
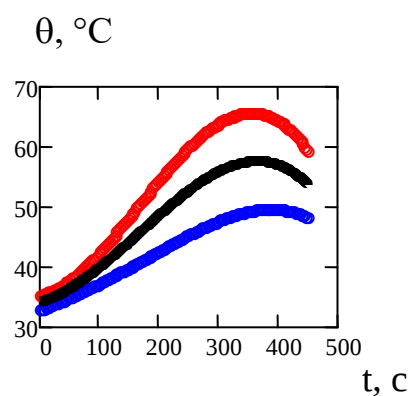
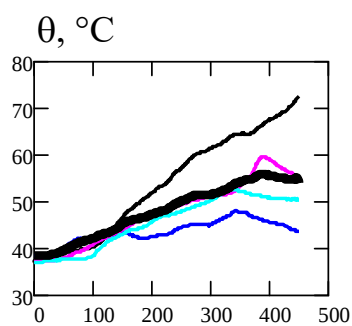


Рисунок 5.10 – аркуш 1. Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами Т4; б) за термопарами Т13

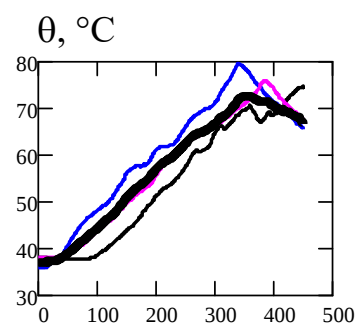


в)

Рисунок 5.10 – аркуш 2. Середні значення за термопарами в): Т4 та Т13

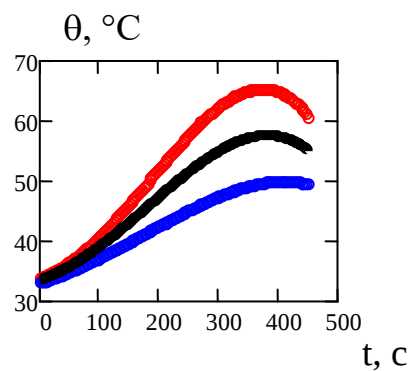


а)



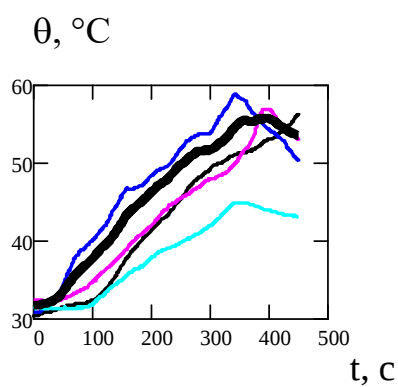
б)

б)

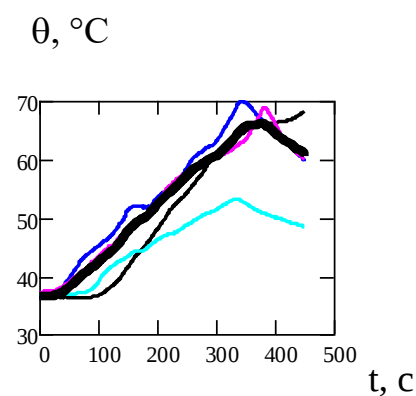


в)

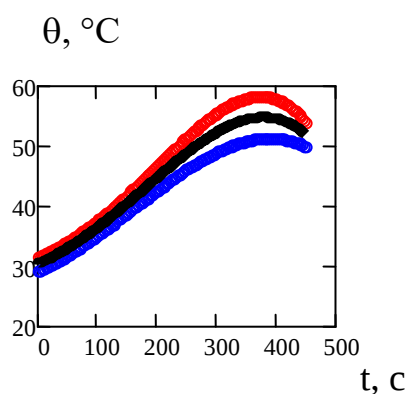
Рисунок 5.11 – Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами Т5; б) за термопарами Т14; в) середні значення за термопарами Т5 та Т14



а)

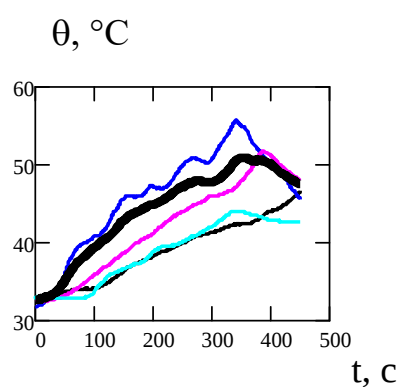


б)

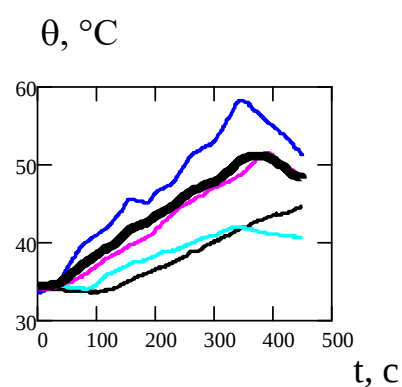


в)

Рисунок 5.12 – Порівняння результатів експериментальних даних:  
а) за термопарами Т6; б) за термопарами Т15; в) середні значення за термопарами Т6 та Т15

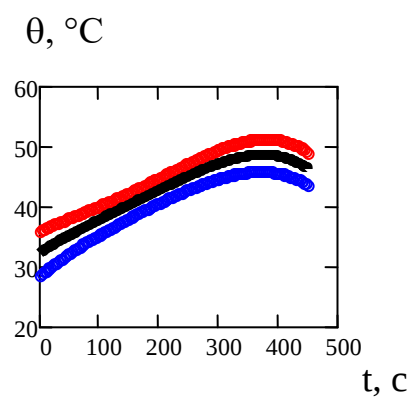


а)



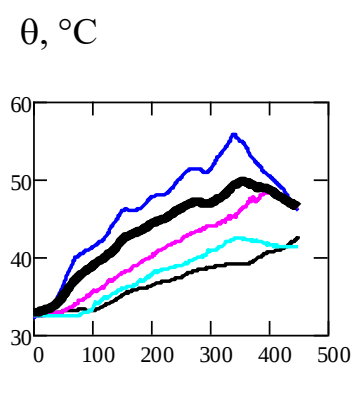
б)

Рисунок 5.13 – аркуш 1. Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами Т7; б) за термопарами Т16

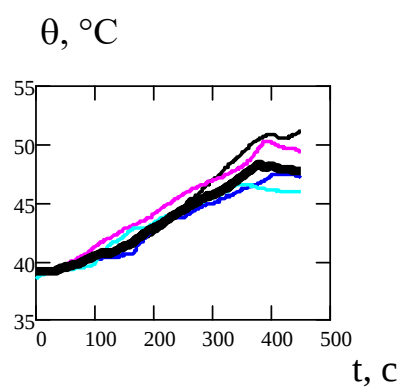


в)

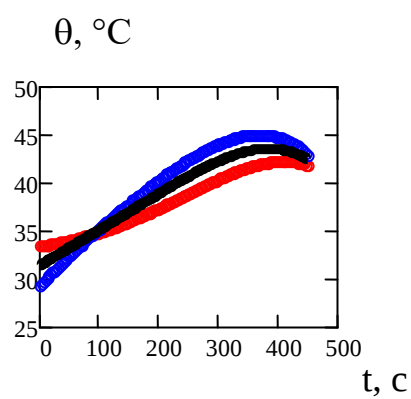
Рисунок 5.13 – аркуш 2. Середні значення за термопарами в): T7 та T16



а)

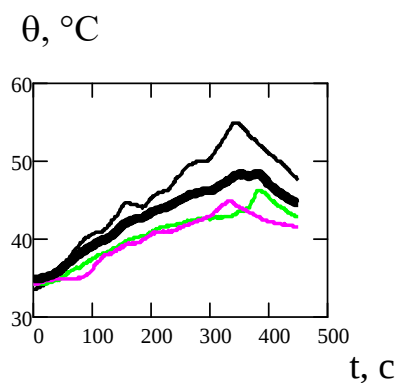


б)

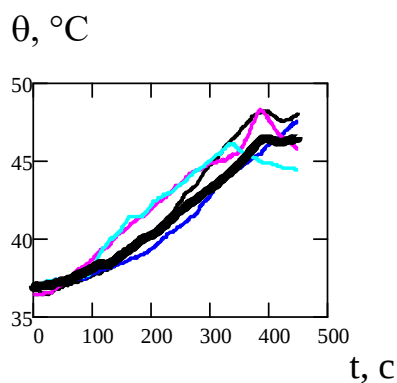


в)

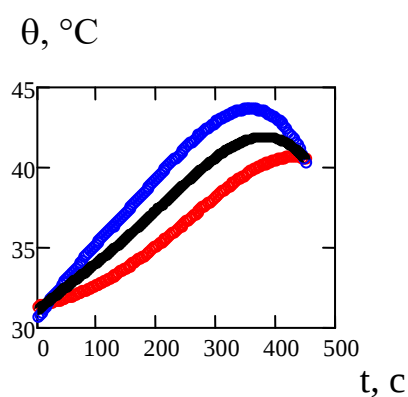
Рисунок 5.14 – Порівняння результатів експериментальних даних: а) за термопарами T8; б) за термопарами T17; в) середні значення за термопарами T8 та T17



а)



б)



в)

Рисунок 5.15 – Порівняння результатів експериментальних даних:  
а) за термопарами Т9; б) за термопарами Т18; в) середні значення за термопарами Т9 та Т18

Результати експериментальних даних свідчать, що продовж 10 хвилинного впливу джерела теплового потоку, в якості вогнища пожежі класу 55В на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка зростає по експоненційному розподілу.

З метою перевірки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися за формулою 5.3 [285]:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n} \quad (5.3)$$

де  $x_i$  – значення і-го дослідження;

$\bar{x}_i$  – середнє значення;

$n$  – кількість досліджень.

Дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, що порівнювалися наведені на рисунку 5.16.

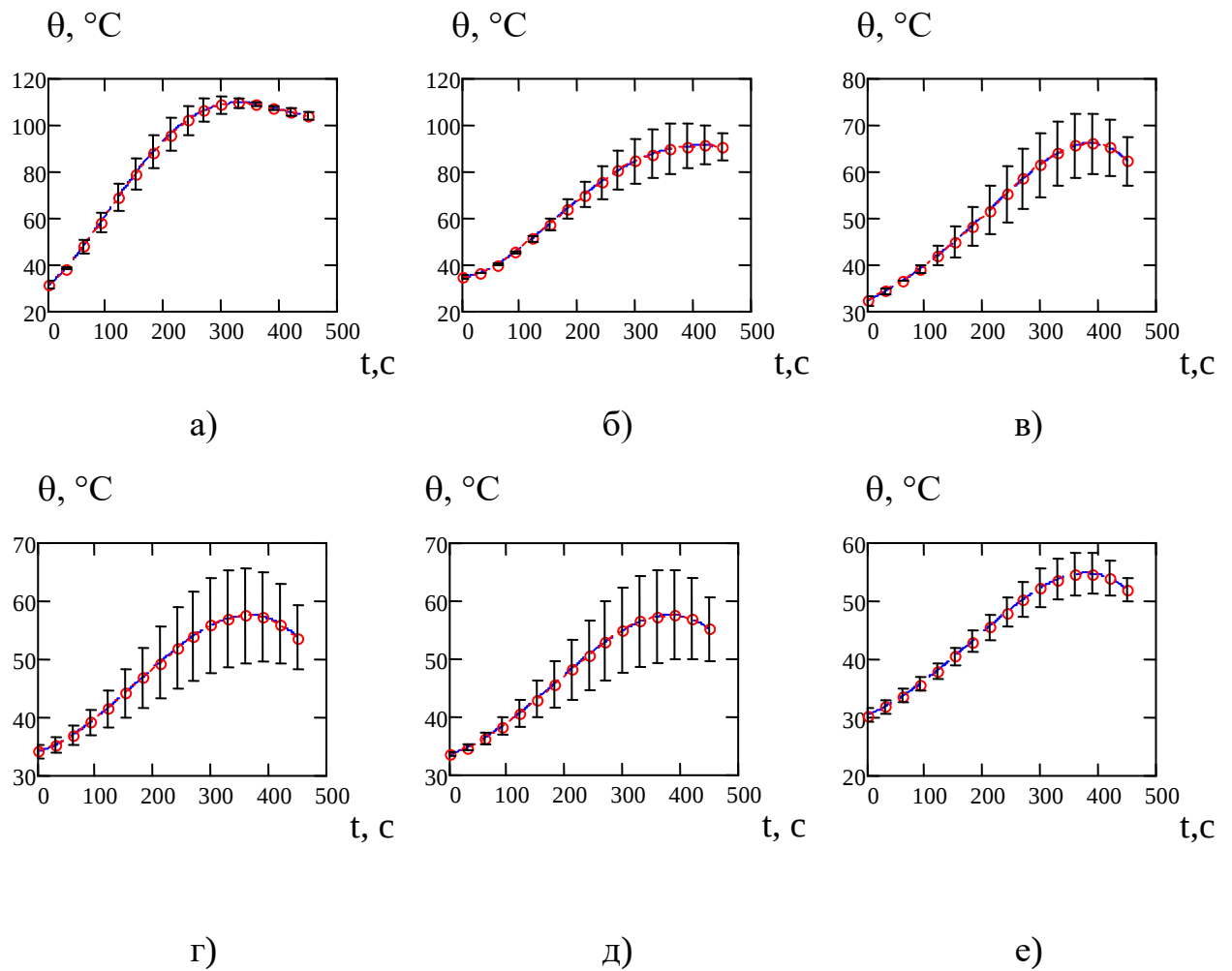


Рисунок 5.16 – аркуш 1. Дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, а саме: а) T1, T10; б) T2, T11; в) T3, T12; в) T4, T13; г) T5, T14; е) T6, T15;

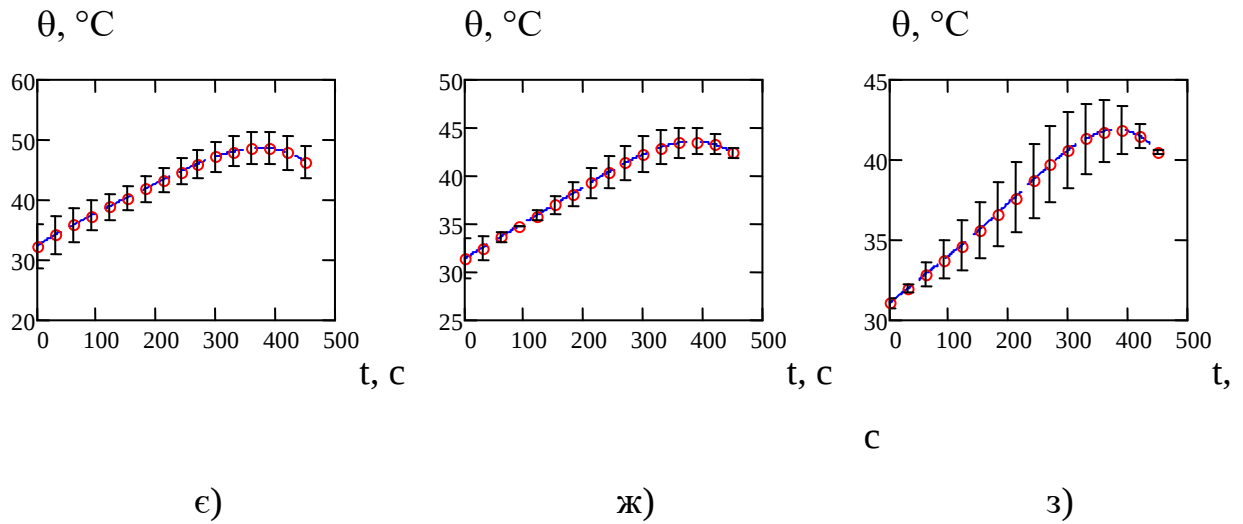


Рисунок 5.16 – аркуш 2. Дисперсії відхилень по середнім значенням відповідних термопар, а саме: е) T7, T16; ж) T8, T17; з) T9, T18

На рисунку 5.17 наведено залежність дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваних зразків T2 та T11.

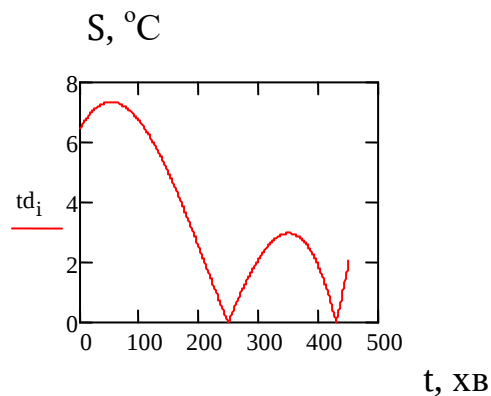


Рисунок 5.17 – Дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваних зразків T2 та T11

З метою визначення на скільки в середньому відхиляються значення  $i$ -го дослідження від середнього значення всіх досліджень обчислено середнє абсолютне відхилення за формулою 5.4 [285]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (5.4)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 5.5 [285]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

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 5.6 [285]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}} \quad (5.6)$$

Дані щодо середніх абсолютних відхилень, середніх відносних відхилень, середніх квадратичних відхилень для відповідних термопар, що порівнювалися приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення для відповідних термопар, що порівнювалися

| № п/п              | Термопари | Абсолютні відхилення, °C | Відносні відхилення, % | Середньо квадратичні відхилення, °C |
|--------------------|-----------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 1.                 | T1 та T10 | 3,2                      | 3,8                    | 4,4                                 |
| 2.                 | T2 та T11 | 5,5                      | 6,8                    | 6,6                                 |
| 3.                 | T3 та T12 | 4,2                      | 7,1                    | 5                                   |
| 4.                 | T4 та T13 | 5,4                      | 10,5                   | 6                                   |
| 5.                 | T5 та T14 | 4,8                      | 9,2                    | 5,5                                 |
| 6.                 | T6 та T15 | 2,3                      | 4,8                    | 2,5                                 |
| 7.                 | T7 та T16 | 2,5                      | 6                      | 2,5                                 |
| 8.                 | T8 та T17 | 1                        | 2                      | 1,3                                 |
| 9.                 | T9 та T18 | 1,5                      | 4                      | 1,7                                 |
| Діапазон відхилень |           | 1÷5,5                    | 2÷10,5                 | 1,3÷6,6                             |
| Середні значення   |           | 3,4                      | 6                      | 3,9                                 |

Таким чином статистика досліджень свідчить, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що відсоткових показниках не перевищує  $15\%$ , середньоквадратичні відхилення становлять в межах  $1,3\div 6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки.

Перевіримо належність дисперсій, отриманих під час проведення досліджень до однієї генеральної сукупності.

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 [286] за формулою 5.7:

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} = F, \quad (5.7)$$

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 [285]. 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 –  $15,98$ .

Якщо виконується 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. Такі дані не належать до однієї генеральної сукупності.

Результати розрахунків критерію Фішера представлені у таблиці 5.2

Таблиця 5.2

Результати перевірки належності дисперсій, отриманих під час досліджень до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера

| №<br>п/п | Номер<br>термопар | Табличне<br>значення<br>критерію<br>Фішера | Розрахункове<br>значення<br>критерію Фішера | Висновок                                                                                                                                                                              |
|----------|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | T1                | 5%* - 6,39<br>1% - 15,98                   | 5,531                                       | Розрахункове<br>значення<br>критерію Фішера<br>не перевищує 5%<br>критичне<br>(табличне)<br>значення, отже<br>дані досліджень є<br>вибірками з<br>однієї<br>генеральної<br>сукупності |
| 2.       | T2                |                                            | 0,256                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 3.       | T3                |                                            | 0,462                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 4.       | T4                |                                            | 0,824                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 5.       | T5                |                                            | 2,03                                        |                                                                                                                                                                                       |
| 6.       | T6                |                                            | 0,448                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 7.       | T7                |                                            | 0,689                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 8.       | T8                |                                            | 0,837                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 9.       | T9                |                                            | 1,442                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 10.      | T10               |                                            | 0,424                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 11.      | T11               |                                            | 1,935                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 12.      | T12               |                                            | 1,599                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 13.      | T13               |                                            | 0,833                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 14.      | T14               |                                            | 0,198                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 15.      | T15               |                                            | 0,332                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 16.      | T16               |                                            | 0,698                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 17.      | T17               |                                            | 1,793                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 18.      | T18               |                                            | 1,209                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 19.      | T19               |                                            | 1,968                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 20.      | T20               |                                            | 1,909                                       |                                                                                                                                                                                       |
| 21.      | T21               |                                            | 1,894                                       |                                                                                                                                                                                       |

\* для порівняння приймаємо 5% табличне значення критерію Фішера

Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що отримані дані температур 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.

З урахуванням вищенаведеного, для подальшого оброблення експериментальних даних застосовували середні значення температури, отримані за даними 5-х експериментів для певної тривалості теплового впливу, з урахуванням наявності викидів та квазівикидів. Дані щодо цих значень температури наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Дані щодо температури на поверхні досліджуваних зразків залежно від відстані їх розташування від осередку горіння та тривалості теплового впливу

| Відстань від осередку горіння L, м | Тривалість теплового впливу t, хв |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | 1                                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|                                    | Температура $\Theta$ , °C         |       |       |       |       |       |       |
| 0*                                 | 219.9                             | 368.3 | 464.2 | 512.9 | 512.4 | 455.0 | 323.5 |
| 2,0                                | 47.6                              | 68.7  | 88.2  | 102.2 | 109.1 | 109.3 | 105.7 |
| 4,0                                | 36.9                              | 41.5  | 46.7  | 51.8  | 55.9  | 57.6  | 56.2  |
| 6,0                                | 35.8                              | 38.9  | 41.8  | 44.7  | 47.2  | 48.6  | 47.9  |

Примітка: \* Наведені значення температури для  $L = 0$  відповідають даним вимірювання температури факелу полум'я

Проведено апроксимацію зазначених в таблиці 5.3 даних щодо температури поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) із застосуванням рівняння числової регресії (5.8), яке встановлює співвідношення між температурою поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) та тривалістю теплового впливу ( $t$ ) і відстанню від осередку горіння ( $L$ ) та визначено значення п'яти констант цього рівняння, які надано у таблиці 5.4 [284]:

$$\theta = a_0 + \frac{a_1}{L} + a_2 t + \frac{a_3 t}{L} + \frac{a_4 t}{L^2} + \frac{a_5}{L^2} \quad (5.8)$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – константи рівняння числової регресії.

Таблиця 5.4

## Результати визначення констант рівняння числової регресії

| Значення констант рівняння числової регресії |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $a_0$                                        | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
| 24,64                                        | 52,12 | -2,17 | 2,51  | -2,3  | -2,14 |

За цією формулою побудовано розрахункові залежності температури від тривалості теплового впливу для значень відстані 2 м, 4 м та 6 м та для різної тривалості теплового впливу (3 хв, 5 хв, 7 хв), які наведено на рисунку 5.18. На цьому ж рисунку наведено (позначені кружками) експериментальні дані (таблиця 5.3). Із порівняння розрахункових і експериментальних даних випливає, що найбільше відхилення розрахункових значень температури від експериментальних має місце для зразка, розташованого на відстані  $L$ , яка становить 2 м, найменше – для зразка, розташованого на відстані  $L = 6$  м. При цьому максимальне відхилення не перевищує 15 %.

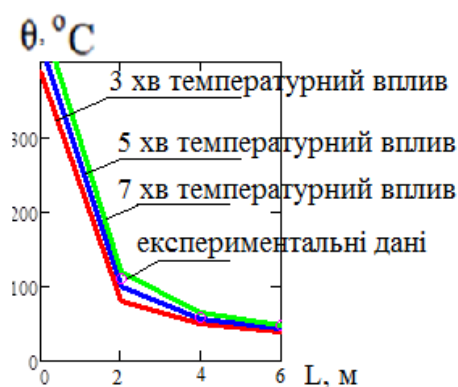


Рисунок 5.18 – Розрахункові залежності (отримані за формулою (5.8)) температури на поверхні фасаду будівлі від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу (3 хв, 5 хв, 7 хв)

Далі за даними середніх значень температур, що отримані в результаті п'яти експериментальних досліджень, побудовані залежності температури на поверхні досліджуваних зразків від часу теплового впливу для відповідних відстаней та висот розташування термопар [287].

На рисунку 5.19 показано графіки зміни температури на поверхні досліджуваних зразків від часу теплового впливу для термопар, що розташовані на різній висоті відносно поверхні землі.

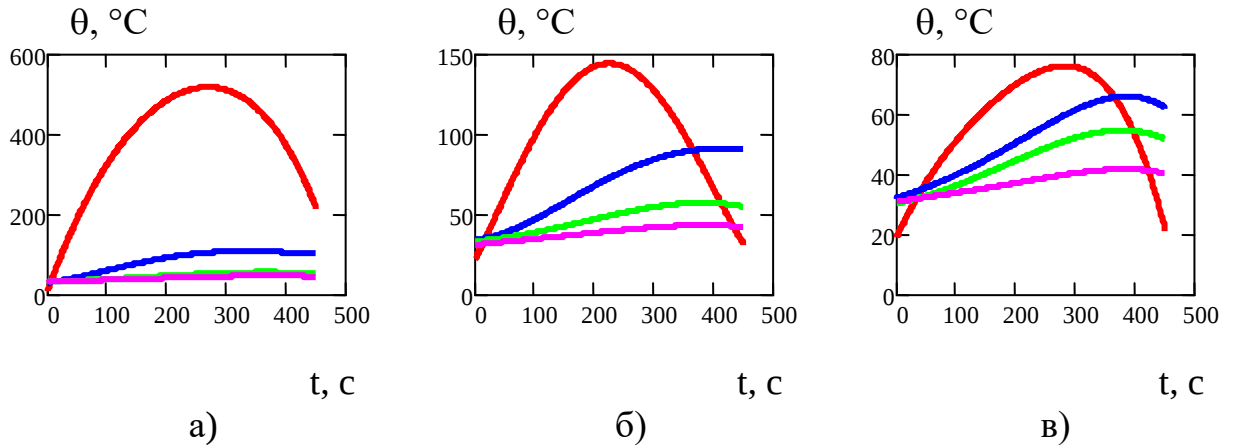


Рисунок 5.19 – Залежності температури на поверхні досліджуваних зразків від часу теплового впливу для термопар, що розташовані на висоті відносно поверхні землі: а) 1 м; б) 2 м; в) 3 м

На рисунку 5.20 показано графіки зміни температури на поверхні досліджуваних зразків від часу теплового впливу для термопар, що розташовані на різній відстані відносно осередку теплового випромінювання.

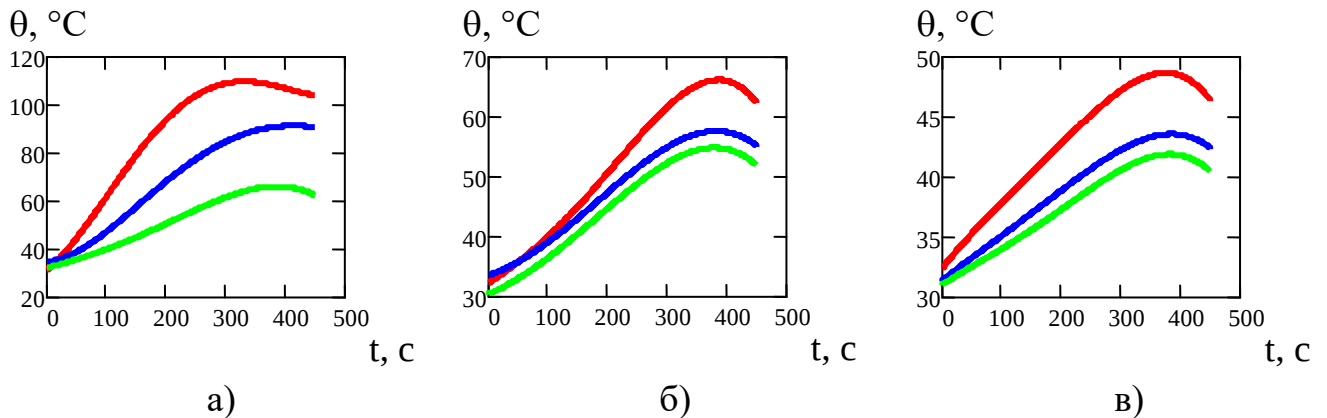


Рисунок 5.20 – Зміна температури на поверхні досліджуваних зразків від часу теплового впливу для термопар, що розташовані на відстанях відносно осередку теплового випромінювання: а) 2 м; б) 4 м; в) 6 м.

По графіку залежностей температур у відповідних точках досліджуваних зразків від часу теплового впливу модельного вогнища пожежі можна визначити максимальні значення температур на поверхні досліджуваного зразка, залежно від відстані на якій зразок розташовується таблиця 5.5.

Таблиця 5.5

Максимальні значення температур на поверхні досліджуваного зразка, залежно від відстані на якій зразок розташовується

| Відстань від вогнища до зразка, м | Висота, га якій розташовуються термопар, м |     |    |
|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----|----|
|                                   | 1                                          | 2   | 3  |
| Осередок, 0 м                     | 509                                        | 145 | 77 |
| 2                                 | 110                                        | 92  | 66 |
| 4                                 | 58                                         | 56  | 54 |
| 6                                 | 48                                         | 43  | 39 |

На рисунку 5.21 наведені дані щодо зміни температур в залежності від віддалення досліджуваних зразків від модельного вогнища пожежі класу 55 В залежно від висоти розташування термопар.

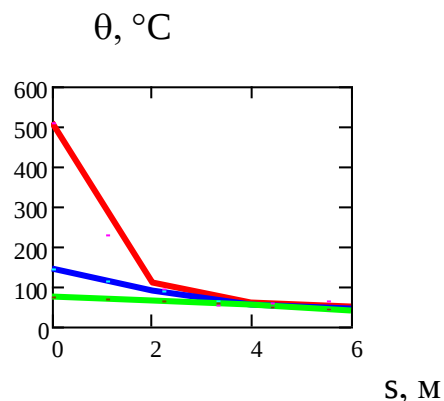


Рисунок 5.21 – Зміна температур залежно від віддалення досліджуваних зразків від модельного вогнища пожежі класу 55 В для термопар, що розташовувалися на висоті 1 м, 2 м та 3 м

На рисунку 5.22 зображено залежність зміни температури залежно від віддалення досліджуваних зразків від модельного вогнища пожежі та висоти розташування засобів вимірювань [284].

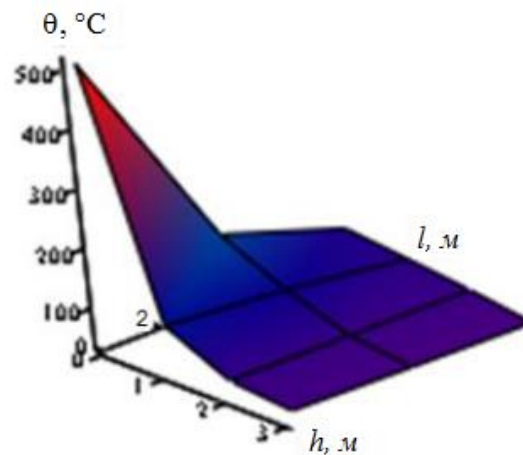


Рисунок 5.22 – Залежність зміни температури від віддалення досліджуваних зразків від модельного вогнища пожежі та висоти розташування засобів вимірювань

Зазначені залежності апроксимовані у вигляді поліномів, що описуються залежністю типу  $\Theta(d)=d_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$ , коефіцієнти регресії, яких наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Параметри регресійних залежностей

| Коефіцієнти регресії<br>$\Theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$ | $a_0$ ,<br>мм | $a_1$ ,<br>мм/хв <sup>-1</sup> | $a_2$ ,<br>мм/хв <sup>-2</sup> | $a_3$ ,<br>мм/хв <sup>-3</sup> |
|--------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Висота 1 м                                                         | 509           | -337,1                         | 81,5                           | -6,4                           |
| Висота 2 м                                                         | 145           | -29,8                          | 1,4                            | -0,125                         |
| Висота 3 м                                                         | 77,5          | -5,6                           | 0,125                          | -0,04                          |

Таким чином під час експериментальних досліджень впливу потужності теплового потоку від джерела теплового випромінювання, яким

може бути пожежа в промисловій споруді, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температури на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- що продовж 10 хвилинного впливу джерела теплового потоку модельного вогнища пожежі класу 55В на досліджуваний зразок на висоті установки термопар 1 м, температура на його поверхні зростає по експоненційному розподілу та досягає на відстані 2 м – 110 °С, 4 м – 58 °С, 6 м – 48 °С;

- статистика досліджень свідчить, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують 10 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 15 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 1,3÷6,6 °С, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки, результати термопар Т1-Т18 не мітять викидів та квазівикидів за критерієм Граббса, дані, що отримані за результатами експериментальних досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження;

- вперше встановлено, що залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання описується залежністю типу  $d(\Theta) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур на висоті відносно землі 1 м, 2 м та 3 м;

- отримані експериментальні дані дають можливість провести верифікацію математичних моделей теплообміну між спорудами під час пожежі, котрі ляжуть в основу методології визначення протипожежних відстаней.

### **5.1.2 За критерієм теплового потоку**

Для визначення чутливості приймача теплового потоку ФОА 013-01 проведені експериментальні дослідження. Суть досліджень полягала у тому,

що на три приймачі теплового потоку ФОА 013-01 впливав потік заданої величини  $20 \text{ кВт/м}^2$  та  $40 \text{ кВт/м}^2$ . Фото експериментальної установки зображено на рисунку. 5.23. Процедура вимірювання кожним приймачем проводилася три рази.

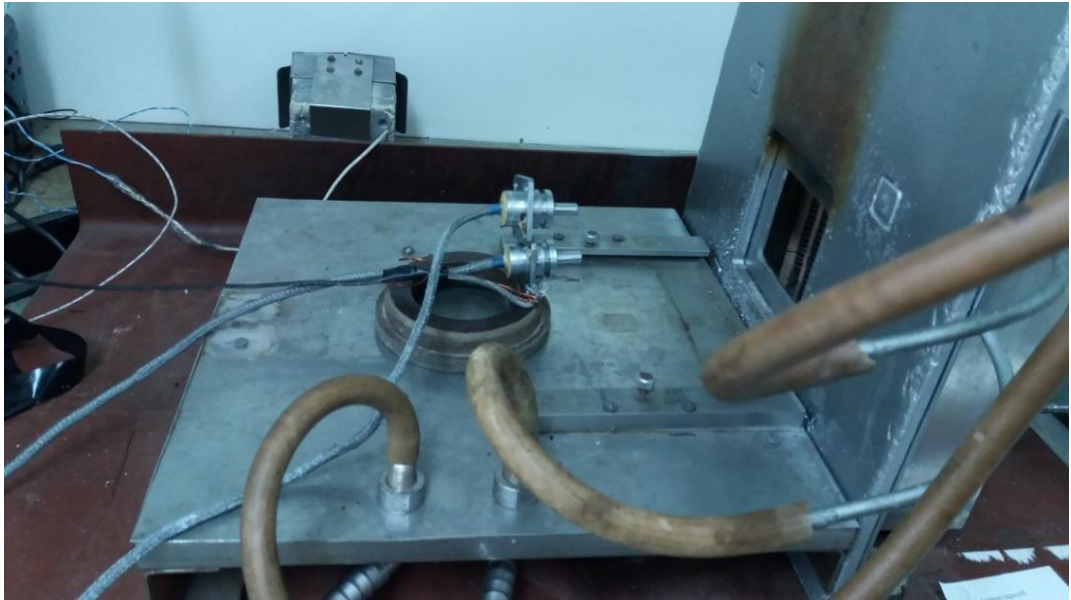


Рисунок 5.23 – Процедура калібрування теплоприймача ФОА 013-01 на радіаційній панелі

Результати експериментальних досліджень представлені у таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Отримані показники теплового потоку приймачем ФОА 013-01

| № | Величина теплового потоку, $\text{кВт/м}^2$ | Теплоприймач ФОА 013-01 № 1          | Теплоприймач ФОА 013-01 № 2          | Теплоприймач ФОА 013-01 № 3          |
|---|---------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
|   |                                             | Показники в мВ, $(\text{кВт/м}^2)^*$ | Показники в мВ, $(\text{кВт/м}^2)^*$ | Показники в мВ, $(\text{кВт/м}^2)^*$ |
| 1 | 20                                          | 114,24 (20,04)                       | 112,46 (19,72)                       | 116,02 (20,35)                       |
| 2 | 40                                          | 224,92 (39,45)                       | 232,04 (40,70)                       | 224,92 (39,45)                       |

**\* Примітка.** Показники в  $\text{кВт/м}^2$  зазначено на підставі виведеного коефіцієнта чутливості  $k = 5,70 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2 / \text{кВт}$  та формули (1)

На підставі отриманих показників приймачів в мВ виведено коефіцієнт чутливості. Для цього знайдено середні значення показників напруги 3 теплоприймачів для величини теплового потоку  $20 \text{ кВт/м}^2$  та  $40 \text{ кВт/м}^2$ . Отримані значення розділені на величини теплового потоку  $20 \text{ кВт/м}^2$  та  $40 \text{ кВт/м}^2$  та виведено два коефіцієнти, з яких взято середнє значення. Таким чином на підставі проведених досліджень виведено коефіцієнт чутливості, що становить  $k = 5,70 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2 / \text{кВт}$ .

Порівняння отриманих результатів проводили із результатами, що отримані приймачем теплового потоку РАП 12.М.2, що має повірку. Показники теплового потоку отримані приймачем РАП 12.М.2 занесена в таблицю 5.8.

Таблиця 5.8

## Отримані показники теплового потоку приймачем РАП 12.М.2

| № | Величина теплового потоку, $\text{кВт/м}^2$ | Теплоприймач РАП 12.М.2      | Теплоприймач РАП 12.М.2      | Теплоприймач РАП 12.М.2      |
|---|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   |                                             | Показники в $\text{кВт/м}^2$ | Показники в $\text{кВт/м}^2$ | Показники в $\text{кВт/м}^2$ |
| 1 | 20                                          | 19,21                        | 19,18                        | 19,91                        |
| 2 | 40                                          | 38,65                        | 39,01                        | 38,90                        |

Проведено оцінювання отриманих результатів приймачами теплового потоку ФОА 013-01 та РАП 12М за критеріями Граббса та Фішера.

Розрахунки показали, що для приймача ФОА 013-01  $G_{jmax}=0,995$ ,  $G_{jmin}=1,005$ , для приймача РАП 12М  $G_{jmax}=1,154$ ,  $G_{jmin}=0,613$ . Ці значення менші за критичні табличні, тому результати вимірювань не містять викидів та квазिवикидів.

Здійснено перевірку належності дисперсій, отриманих під час проведення вимірювань приймачами до однієї генеральної сукупності.

Для оцінювання дисперсій висувають нуль-гіпотезу, тобто припускають, що різниця між дисперсіями результатів випробувань двох лабораторій

дорівнює нулю і дані, отримані лабораторіями, є вибірками з генеральної сукупності.

Розраховане значення коефіцієнта  $F$  порівнюють з табличним значенням. 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  $F_{q,k_1,k_2}$ .

Критичне значення в таблиці  $F$ -розподілення Фішера знаходять залежно від заданого рівня статистичної значущості  $q\%$  на перетині стовпця  $k_1$  та рядка  $k_2$ .

Якщо виконується 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 вимірювань двох приймачів можна вважати несуттєвою і можна пояснити впливом випадкових чинників та обмеженим обсягом даних. Таким чином, дані, отримані приймачами, є вибірками з однієї генеральної сукупності.

Якщо  $F > F_{q,k_1,k_2}$ , то на підставі отриманих результатів нуль-гіпотезу відкидають і розбіжність між дисперсіями результатів вимірювань двох приймачів вважають суттєвою. Такі дані не належать до однієї генеральної сукупності.

Перевірка показала, що середньоквадратичне відхилення по приймачу ФОА 013-01 становить  $0,315\%$ , по приймачу РАП 12М –  $0,413\%$ , а критерій Фішера становить  $1,72$ , що не перевищує табличного значення. Таким чином отримані показники приймачами теплового потоку належать до однієї генеральної сукупності.

В ході проведених досліджень встановлено, що чутливість приймача теплового потоку ФОА 013-01 становить  $k = 5,70 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{кВт}$ .

Здійснено порівняння отриманих показників за статистичними критеріями. Перевірка за критерієм Граббса показала, що отримані

показники не містять викидів та квазівикидів, що підтверджує достовірність отриманих даних приймачами.

Встановлено, що під час оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку можливо використати приймач теплового потоку типу ФОА 013-01. При цьому встановлено, що похибка вимірювань під час використання зазначеного приймача теплового потоку становить в межах 1 %.

Згідно з схемою рисунку 5.24 проведено вимірювання величини теплового потоку за допомогою приймачів теплового потоку: ПТП1, ПТП2, ПТП3 [288]. Приймачі встановлювалися на відстані 2 м, 4 м, 6 м від джерела теплового випромінювання [289 – 291].

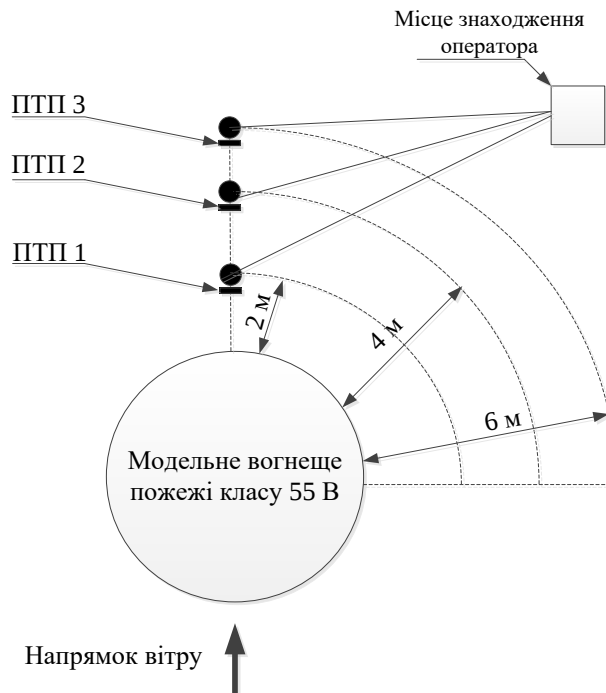


Рисунок 5.24 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів

Отримані значення теплового потоку зображено у вигляді графіків (рисунок 5.25).

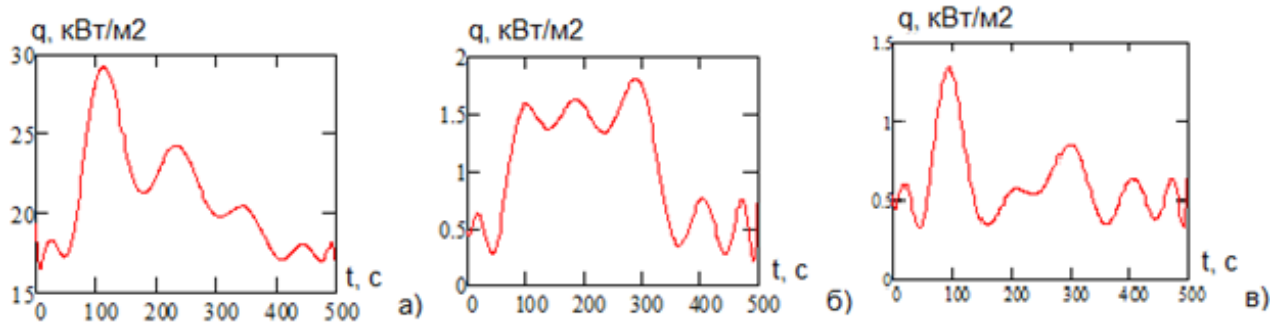


Рисунок 5.25 – Графіки залежностей величини теплового потоку на досліджуваних зразках від часу вогневого впливу модельного вогнища пожежі класу 55 В встановлених: а) на відстані 2 м від модельного вогнища; б) на відстані 4 м від модельного вогнища; в) на відстані 6 м від модельного вогнища

З графіків рисунку 5.25 можна встановити, що з віддаленням досліджуваних зразків від модельного вогнища пожежі класу 55 В, тепловий потік спадає. Однак впродовж всього періоду дослідження його величина є не стабільною. Це пояснюється тим, що експериментальні дослідження проводились на відкриті території, де погодні умови є чи не головним фактором впливу на отримані показники. Адже вітер, а особливо його пориви, змінюють нахил полум'я модельного вогнища пожежі, тим самим змінюючи напрям дії теплового потоку. Проведені експериментальні дослідження максимально наближені до реальних умов пожежі. Однак, при визначенні протипожежних відстаней між спорудами, значення теплового потоку в якості критерію брати недоцільно, оскільки його величина нестабільна і суттєво залежить від погодних умов. Тому критерій по температурі має лягти за основу при визначенні протипожежних відстаней.

Таким чином під час експериментальних досліджень впливу потужності теплового потоку від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в промисловій споруді, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення потужності теплового потоку на поверхні досліджуваних зразків встановлено, що значення параметру теплового потоку біля елементів

будинку, який суміжний із будинком, що горить є не стабільним та змінним в часі, що пояснюється впливом зовнішніх умов, зокрема повітряних потоків. В свою чергу зазначене не дозволяє порівняти значення теплового потоку із відповідними характеристиками матеріалів, які використовуються у суміжному будинку, що опромінюється від пожежі, зазначене означає, що критерій тепловий потік не можна використовувати під час оцінювання протипожежної відстані.

## **5.2 Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела вогнища пожежі класу А на елементи суміжних об'єктів**

Для визначення температурного впливу (впливу потужності теплового потоку) від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур (потужності теплового потоку) на поверхні досліджуваних зразків проведені експериментальні дослідження процесів теплопередачі від модельного вогнища, що представляло собою фрагмент будинку згідно із методикою наведеною у розділі 4.1.

Дані дослідження імітують випадок опромінювання сусідньої споруди від осередку теплового випромінювання, що обмежений негорючими будівельними конструкціями, а опромінювання сусіднього будинку відбувається через віконні прорізи [292]. Як правило це пожежі в будинках (цивільного, виробничого призначення).

Модельне вогнище пожежі та досліджувані зразки, які описані у розділі 4.1. Встановлювалися згідно із схемою, що наведена на рисунку 5.26 [292].

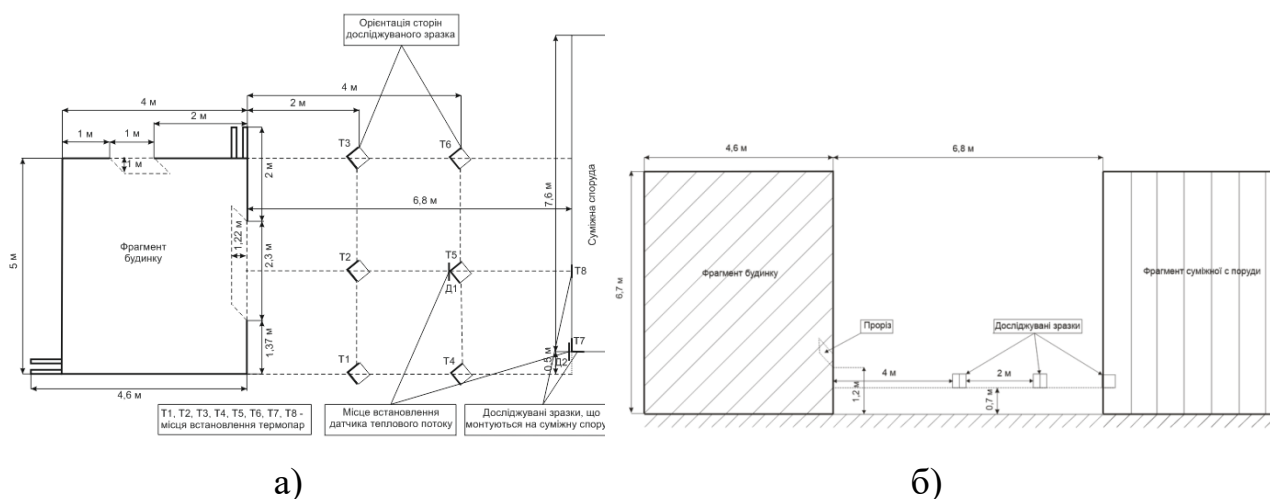


Рисунок 5.26 – Схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів: а) вид зверху, б) вид з боку

На рисунку 5.27 зображені фото розташування модельного вогнища пожежі та досліджуваних зразків, а також фото під час проведення експериментального дослідження.



Рисунок 5.27 – Фото експериментальних досліджень

Під час експериментального дослідження спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків, що можна прирівняти до експоненційного розподілу, дослідні зразки, які розташовувалися на відстанях 2 м обвуглювалися, але їх займання не відбувалося. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігалось на 30 хв експериментального дослідження.

Усереднені результати експериментальних досліджень представлені на рисунку 5.28.

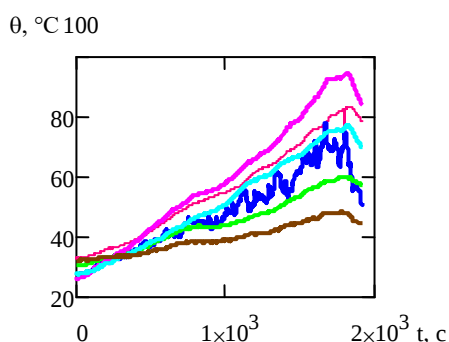


Рисунок 5.28 – Усереднені результати експериментальних досліджень

Із рисунку 5.28 можна визначити максимальні значення температур, що фіксувалися термопарами так вони становлять: для T1 – 85 °C, для T2 – 125 °C, для T3 – 75 °C, для T4 – 60 °C, для T5 – 93 °C, для T6 – 75 °C, для T7 – 48 °C, для T8 – 55 °C, що досягнуті приблизно на 27-й хвилині дослідження.

Проведемо перевірку результатів досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса за формулами 5.1 та 5.2.

Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рисунку 5.29.

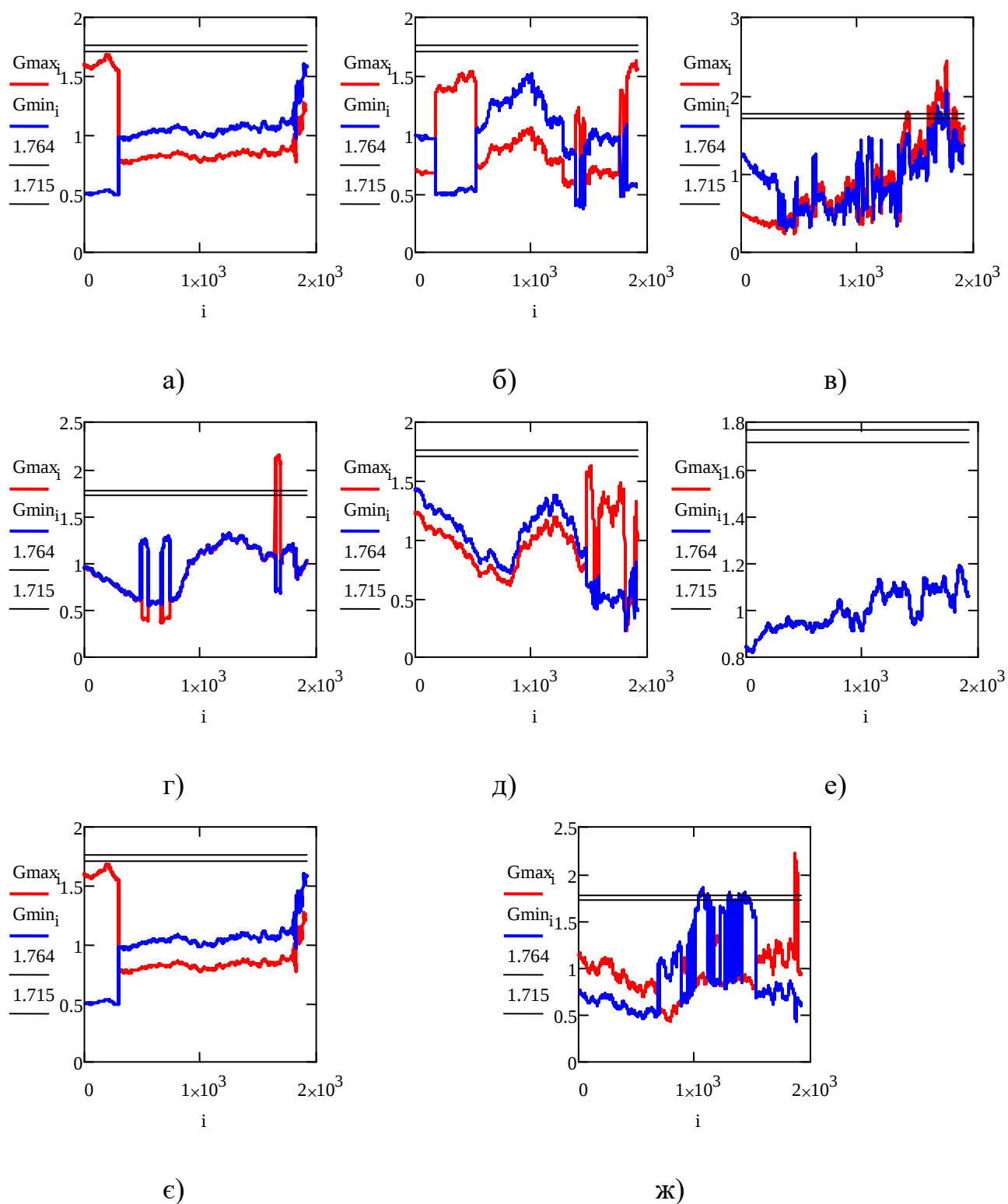


Рисунок 5.29 – Результати перевірки досліджень на наявність викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса: а)-ж) значення показів термопар відповідно Т1-Т8

Таким чином отримані результати свідчать, що експериментальні дослідження за термопарами Т1, Т2, Т5-Т7 не містять викидів та квазिवикидів.

А експериментальні дослідження за термопарами ТЗ, Т4, Т8 містять викиди та квазівикиди, які ми виключаємо та переходимо до подальшого оброблення результатів експериментальних досліджень.

За даними термопар, що розташовувалася над віконним прорізом фрагменту будинку (із зовні вогневої камери) Т9 визначено залежність температури поверхні, що випромінює тепло від часу випромінювання, рисунок 5.30.

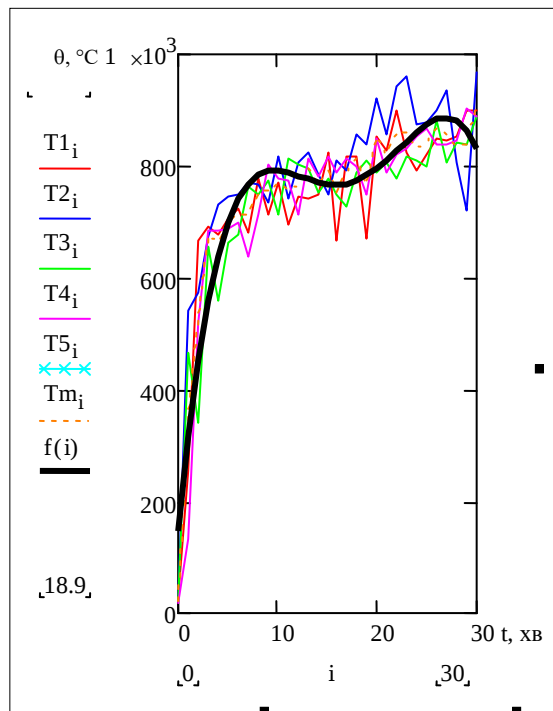


Рисунок 5.30 – Зміна температури над віконним прорізом фрагменту будинку

Із рисунку 5.30 встановлено, що під час горіння пожежної навантаги у вогневій камері фрагменту будинку максимальне значення температури над віконним прорізом фрагменту будинку становить близько 883 °C, що досягнуто приблизно на 5-6-й хвилині дослідження.

За результатами 5-ти експериментальних досліджень, з метою визначення збіжності кожного окремого експериментального дослідження, побудовані графіки порівнянь для кожної термопар. Результати порівнянь для кожної термопар наведені на рисунках 5.31.

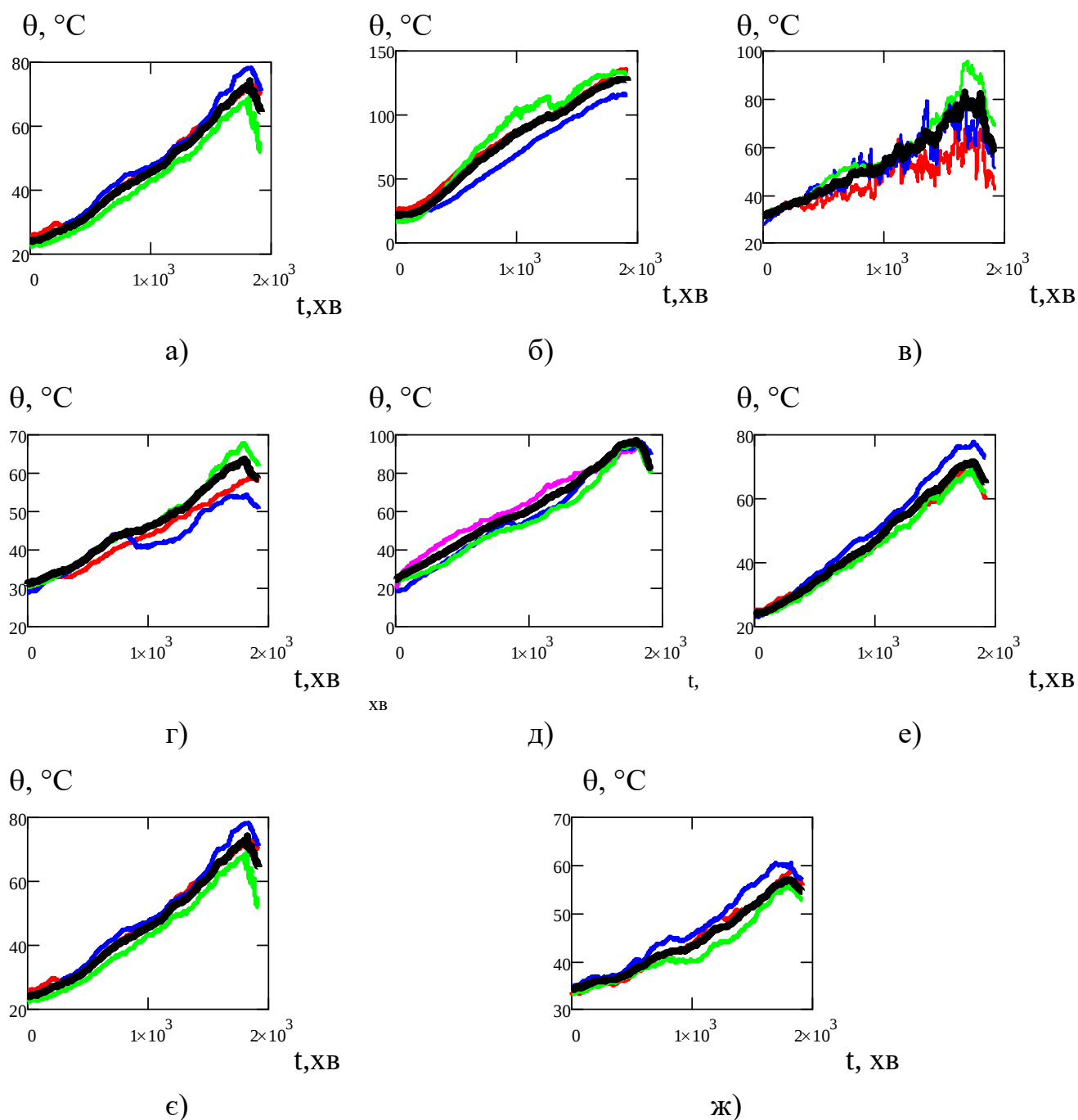


Рисунок 5.31 – Порівняння результатів експериментальних даних: а)- ж) за термопарами Т1-Т8 відповідно

Дані експериментального дослідження свідчать, що продовж 30 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання через віконний проріз на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка зростає по експоненційному розподілу та досягає максимальних значень  $161^{\circ}\text{C}$ ,  $94^{\circ}\text{C}$  та  $55^{\circ}\text{C}$  відповідно для відстаней від осередку горіння 2 м, 4 м та 6,8 м.

З метою перевірки збіжності експерименту, обчислено дисперсії відхилень по значенням відповідних термопар для кожного експериментального дослідження за формулою 5.3.

Дисперсії відхилень по значенням відповідних термопар наведені на рисунку 5.32.

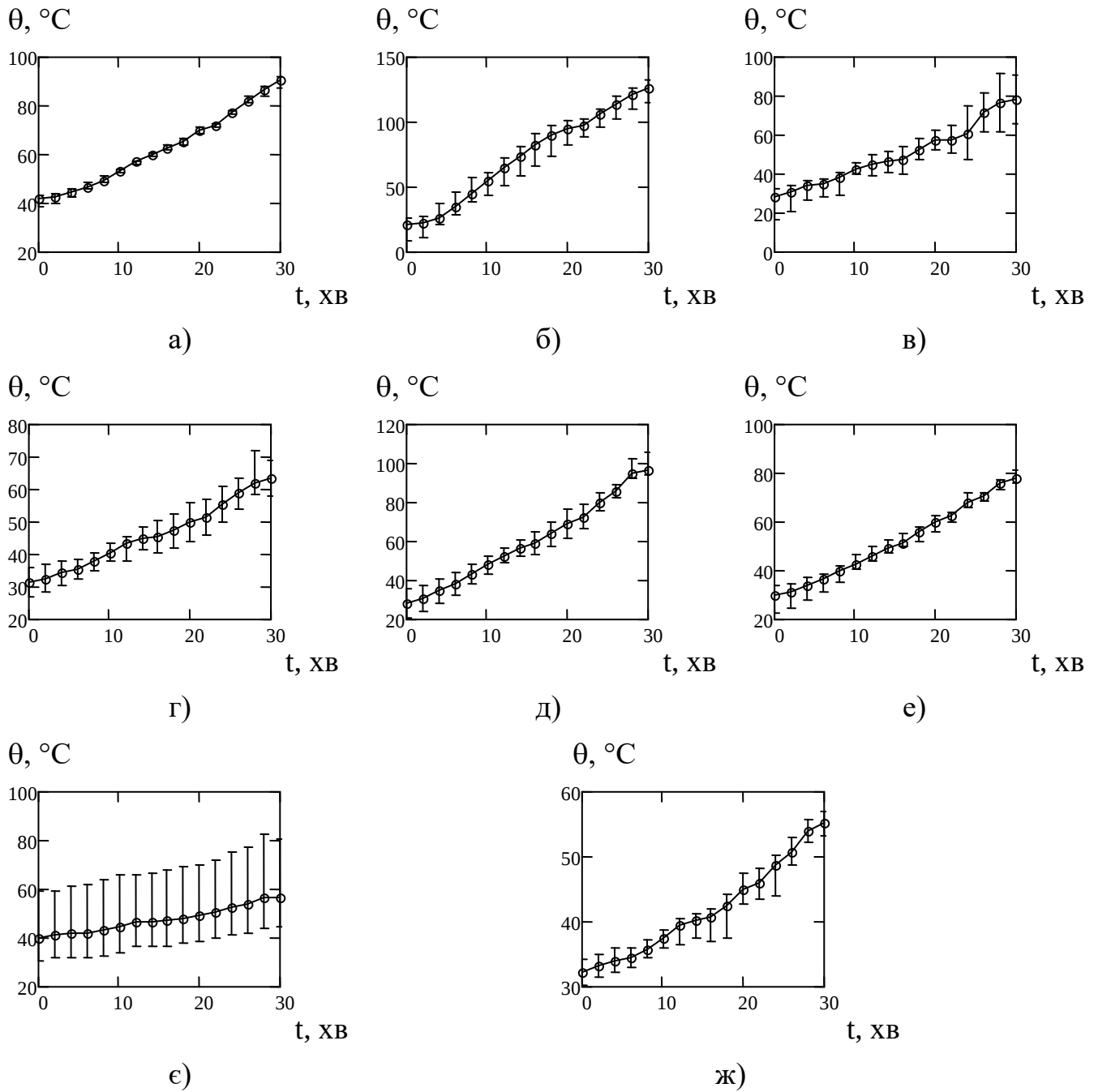


Рисунок 5.32 – Дисперсії відхилень по значенням відповідних термопар, а саме: а) T1 – T8

З метою перевірки належності даних, отриманих в кожному експерименті, до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера визначені дисперсії температур (S) експериментальних даних від середнього значення за такою формулою [285]:

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n_i} (\theta_i - \bar{\theta}_1)^2 \quad (5.9)$$

На рис. 5.33 наведено дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваного зразка T2.

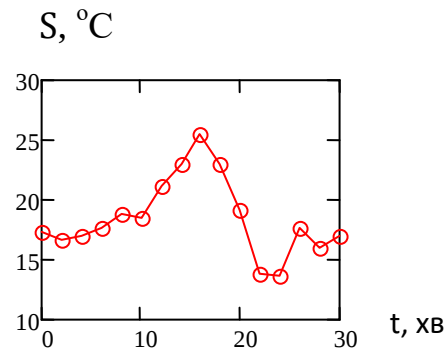


Рисунок 5.33 – Дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваного зразка T2

Дані щодо оцінки належності дисперсій температур до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера, формула 5.9, представлені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9

Результати перевірки належності дисперсій, отриманих під час досліджень до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера

| № п/п | Номер термопари | Табличне значення критерію Фішера | Розрахункове значення критерію Фішера | Висновок                       |
|-------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1     | 2               | 3                                 | 4                                     | 5                              |
| 1.    | T1              | 5%* - 6,39                        | 0,513                                 | Розрахункове значення критерію |
| 2.    | T2              | 1% - 15,98                        | 0,63                                  |                                |

Продовження таблиці 5.9

| 1  | 2  | 3 | 4     | 5                                                                                                                     |
|----|----|---|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3  | T3 |   | 0,462 | Фішера не перевищує 5% критичне (табличне) значення, отже дані досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності |
| 4  | T4 |   | 0,961 |                                                                                                                       |
| 5. | T5 |   | 1,392 |                                                                                                                       |
| 6. | T6 |   | 0,25  |                                                                                                                       |
| 7. | T7 |   | 0,385 |                                                                                                                       |
| 8. | T8 |   | 0,485 |                                                                                                                       |

\* для порівняння приймаємо 5% табличне значення критерію Фішера

Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 можна стверджувати, що отримані дані температур 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.

З урахуванням вищенаведеного, для подальшого оброблення експериментальних даних застосовували середні значення температури, отримані за даними 3-х експериментів для кожного зразка і певної тривалості теплового впливу, з урахуванням наявності викидів та квазівикидів. Дані щодо цих значень температури наведено в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10

Дані щодо температури на поверхні досліджуваних зразків залежно від відстані їх розташування від осередку горіння та тривалості теплового впливу

| Відстань від осередку горіння L, м | Тривалість теплового впливу t, хв |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                    | 3                                 | 6   | 9   | 12  | 15  | 18  | 21  | 24  | 27  | 30  |
|                                    | Температура $\Theta$ , °C         |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 0*                                 | 451                               | 698 | 783 | 788 | 771 | 768 | 795 | 843 | 883 | 864 |
| 2,0                                | 33                                | 39  | 50  | 65  | 78  | 89  | 98  | 105 | 117 | 126 |
| 4,0                                | 32                                | 38  | 45  | 52  | 57  | 63  | 70  | 80  | 89  | 96  |
| 6,8                                | 32                                | 34  | 36  | 39  | 40  | 42  | 45  | 48  | 52  | 55  |

Примітка: \* Наведені значення температури для L = 0 відповідають даним вимірювання температури полум'я у віконному прорізі

Максимальні абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення значень температури, визначені для всієї тривалості теплового впливу, що визначені за формулами 5.4 – 5.6 приведені в таблиці 5.11.

Таблиця 5.11

Максимальні абсолютні, відносні відхилення, середньо квадратичні відхилення показів термопар, що отримані у різних дослідах

| № п/п              | Термопари | Абсолютні відхилення, °C | Відносні відхилення, % | Середньо квадратичні відхилення, °C |
|--------------------|-----------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 1.                 | T1        | 2                        | 3                      | 2                                   |
| 2.                 | T2        | 10,8                     | 16                     | 9,9                                 |
| 3.                 | T3        | 8,7                      | 15                     | 8,7                                 |
| 4.                 | T4        | 4,5                      | 9,6                    | 8,7                                 |
| 5.                 | T5        | 5,8                      | 10,4                   | 5,6                                 |
| 6.                 | T6        | 3,2                      | 6,8                    | 3,4                                 |
| 7.                 | T7        | 6,7                      | 11,8                   | 6,3                                 |
| 8.                 | T8        | 2,8                      | 5                      | 2,3                                 |
| Діапазон відхилень |           | 2÷10,8                   | 3÷16                   | 2÷9,9                               |
| Середні значення   |           | 6,4                      | 9,5                    | 6                                   |

Із аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що абсолютні відхилення експериментальних даних кожного експерименту від усереднених значень не перевищують 10,8°C, що у відсоткових показниках становить 16 %, а максимальне середньоквадратичне відхилення становить 9,9 °C, що вказує на задовільну збіжність отриманих експериментальних даних та на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки

Проведено апроксимацію зазначених в таблиці 5.6 даних щодо температури поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) із застосуванням рівняння числової регресії (5.9), яке встановлює співвідношення між температурою поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) та тривалістю теплового впливу ( $t$ ) і

відстанню від осередку горіння ( $L$ ) та визначено значення п'яти констант цього рівняння, які надано у таблиці 5.10 [293]:

$$\theta = a_0 + \frac{a_1}{L} + a_2 t + \frac{a_3 t}{L} + \frac{a_4 t}{L^2} + \frac{a_5}{L^2} \quad (5.10)$$

де  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – константи рівняння числової регресії.

Таблиця 5.12

Результати визначення констант рівняння числової регресії

| Значення констант рівняння числової регресії |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $a_0$                                        | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
| -13,72                                       | 6,57  | 0,48  | -0,18 | 0,04  | -1,39 |

За цією формулою побудовано розрахункові залежності температури від тривалості теплового впливу для значень відстані 2 м, 4 м та 6,8 м, які наведено на рисунок 5.34 [293]. На цьому ж рисунку наведено (позначені кружками) експериментальні дані (таблиця 5.10). Із порівняння розрахункових і експериментальних даних випливає, що найбільше відхилення розрахункових значень температури від експериментальних має місце для зразка, розташованого на відстані  $L$ , яка становить 4 м, найменше – для зразка, розташованого на відстані  $L = 2$  м. При цьому максимальне відхилення дорівнює 10,4 %.

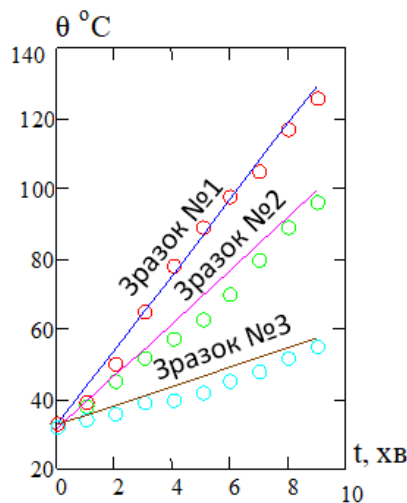


Рисунок 5.34 – Залежність температури на поверхні фасаду будівлі від тривалості теплового впливу: 1 -  $L = 2$  м, 2 -  $L = 4$  м та 3 -  $L = 6,8$  м

На рисунку 5.35 наведено розрахункові залежності (отримані за формулою 5.10) температури на поверхні фасаду будівлі від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу (12 хв, 21 хв, 30 хв) [293]. На цьому ж рисунку наведено (позначені кружками) експериментальні дані щодо цієї температури (таблиця 5.10) для 30 хвилинного температурного впливу.

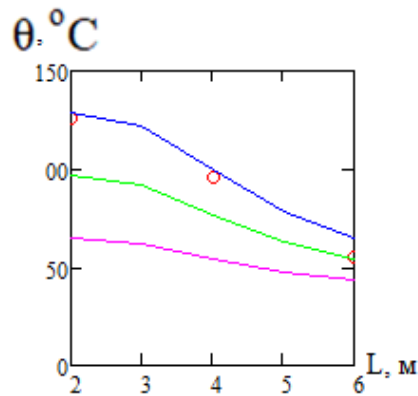


Рисунок 5.35 – Розрахункові залежності (отримані за формулою (5.9)) температури на поверхні фасаду будівлі від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу (12 хв, 21 хв, 30 хв)

В таблиці 5.13 наведені дані максимальних значень температур на поверхні досліджуваних зразків, що отримані під час експерименту залежно від відстані, на якій розташовувалися дослідні зразки.

Таблиця 5.13

Максимальні значення температур на поверхні досліджуваного зразка, залежно від відстані на якій зразок розташовується від осередку горіння

| Відстань від осередку горіння до зразка, м | Температура, °C |
|--------------------------------------------|-----------------|
| 0                                          | 883             |
| 2                                          | 161             |
| 4                                          | 94              |
| 6,7                                        | 55              |

На рисунку 5.36 наведено залежність зміни максимальної температури на поверхні досліджуваних зразків, що отримані під час експерименту залежно від відстані, на якій розташовувалися дослідні зразки.

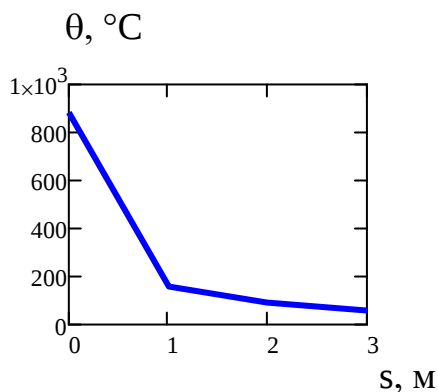


Рисунок 5.36 – Зміна температур залежно від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння

Зазначену залежність апроксимовано у вигляді поліномів, що описуються залежністю типу  $\Theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$ , коефіцієнти регресії, яких наведено в таблиці 5.14.

Таблиця 5.14

Параметри регресійних залежностей

| Коефіцієнти регресії                       | $a_0,$<br>мм | $a_1,$<br>мм/хв <sup>-1</sup> | $a_2,$<br>мм/хв <sup>-2</sup> | $a_3,$<br>мм/хв <sup>-3</sup> |
|--------------------------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| $\Theta(d) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$ | 883          | -629,25                       | 160,25                        | -13,063                       |

На рисунку 5.37 зображено залежність зміни температури від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння, що віддалені відповідно в повздовжньому, і в поперечному напрямках.

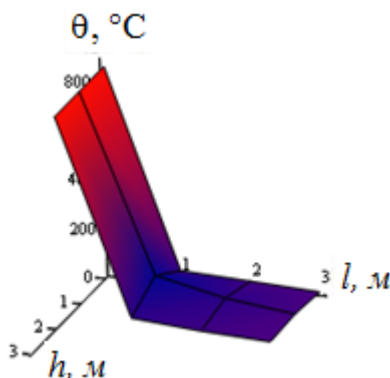


Рисунок 5.37 – Залежність зміни температури від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння, що віддалені відповідно в повздовжньому, і в поперечному напрямках

За максимальними даними термопар Т1-Т8 використовуючи залежність 5.11 визначаємо значення кутового коефіцієнту випромінювання та його зміну залежно від віддалення від джерела випромінювання [293]:

$$\varphi = \frac{T_i}{T_n}, \quad (5.11)$$

де  $T_i$  – значення відповідних термопар Т1, Т3, Т4, Т6, Т7, що розташовуються з боків відносно вісі віконного прорізу;

$T_n$  – значення відповідних термопар Т2, Т5 та Т8, що розташовуються вздовж вісі віконного прорізу.

Отримані результати наведені в таблиці 5.15.

Таблиця 5.15

Результати розрахунку кутового коефіцієнту випромінювання

| Відстань від джерела теплового випромінювання до дослідних зразків | 2 м  |      | 4 м  |      | 6,8 м |
|--------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|-------|
| Точка для якої визначається значення, $\varphi$                    | Т1   | Т3   | Т4   | Т6   | Т7    |
| Значення, $\varphi$                                                | 0,5  | 0,47 | 0,8  | 0,65 | 0,87  |
| Середнє значення, $\varphi$                                        | 0,49 |      | 0,73 |      | 0,87  |

Зміна значення кутового коефіцієнту випромінювання залежно від віддалення від джерела теплового випромінювання наведено на рисунку 5.38.

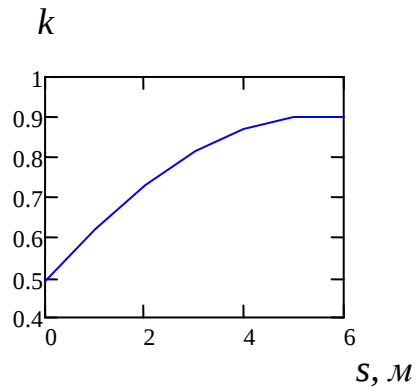


Рисунок 5.38 – Зміна значення кутового коефіцієнту випромінювання залежно від віддалення від джерела теплового випромінювання

Таким чином під час експериментальних досліджень температурного впливу (впливу потужності теплового потоку) від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур (потужності теплового потоку) на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- що продовж 30 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання через віконний проріз на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка зростає по експоненційному розподілу та досягає максимальних значень 161 °С, 94 °С та 55°С відповідно для відстаней від осередку горіння 2 м, 4 м та 6,8 м;

- статистика досліджень свідчить, що абсолютні відхилення експериментальних досліджень не перевищують 11 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 16 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 2÷9,9 °С, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки, результати термопар Т1-Т8 не мітять викидів та квазівикидів за критерієм Граббса, дані, що отримані за

результатами експериментальних досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження;

- вперше встановлено, що залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання через віконний проріз будинку описується залежністю типу  $\Theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур.

### **5.3 Результати експериментальних досліджень процесів теплового впливу факела вогнища пожежі під час горіння фасаду будинку на елементи суміжними об'єктів**

Для визначення температурного впливу (впливу потужності теплового потоку) від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа фасаду будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур (потужності теплового потоку) на поверхні досліджуваних зразків проведені експериментальні дослідження процесів теплопередачі від модельного вогнища, що представляло собою фрагмент будинку згідно із методикою наведеною у розділі 4.1.

Дані дослідження імітують випадок опромінювання сусідньої споруди від осередку теплового випромінювання, що відбувається через віконні прорізи та фасадну частину будинку.

Модельне вогнище пожежі та досліджувані зразки, які описані у розділі 4.1. Встановлювалися згідно із схемою, що наведена на рисунку 5.26.

На рисунку 5.39 зображені фото розташування модельного вогнища пожежі та досліджуваних зразків, а також фото під час проведення експериментального дослідження.



Рисунок 5.39 – Фото експериментальних досліджень

Під час експериментального дослідження спостерігалось монотонне зростання температури на поверхні дослідних зразків, що можна прирівняти до експоненційного розподілу. Відбулося загорання дослідного зразка, який розташовувався на відстанях 2 м на проти віконного прорізу на 40 хв експериментального дослідження. Повне вигорання пожежної навантаги спостерігалось на 60 хв експериментального дослідження.

Усереднені результати експериментальних досліджень представлені на рисунку 5.40.

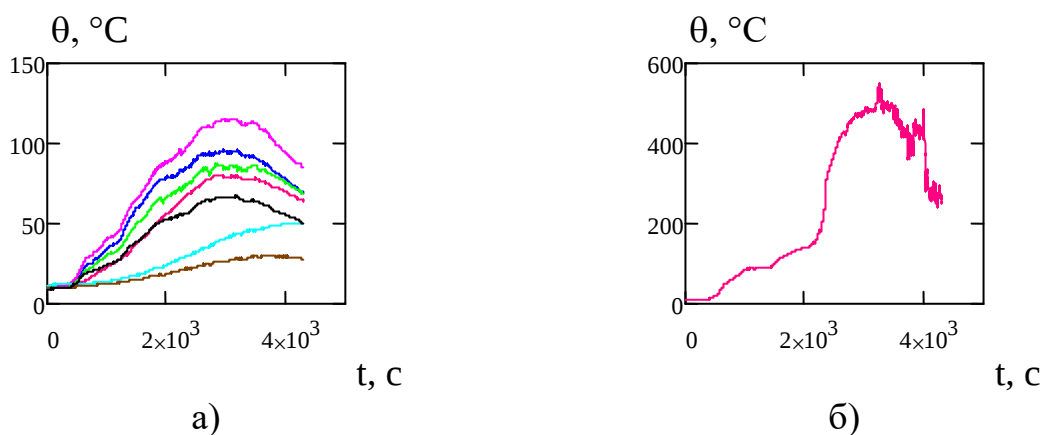


Рисунок 5.40 – Усереднені результати експериментальних досліджень: а) термопари Т1-Т8, що встановлені в дослідних зразках; б) термопара Т9, що встановлена над віконним прорізом

Результати досліджень для двох експериментів, а також усереднене їх значення по кожній термопарі представлено на рисунок 5.41 (а-ж).

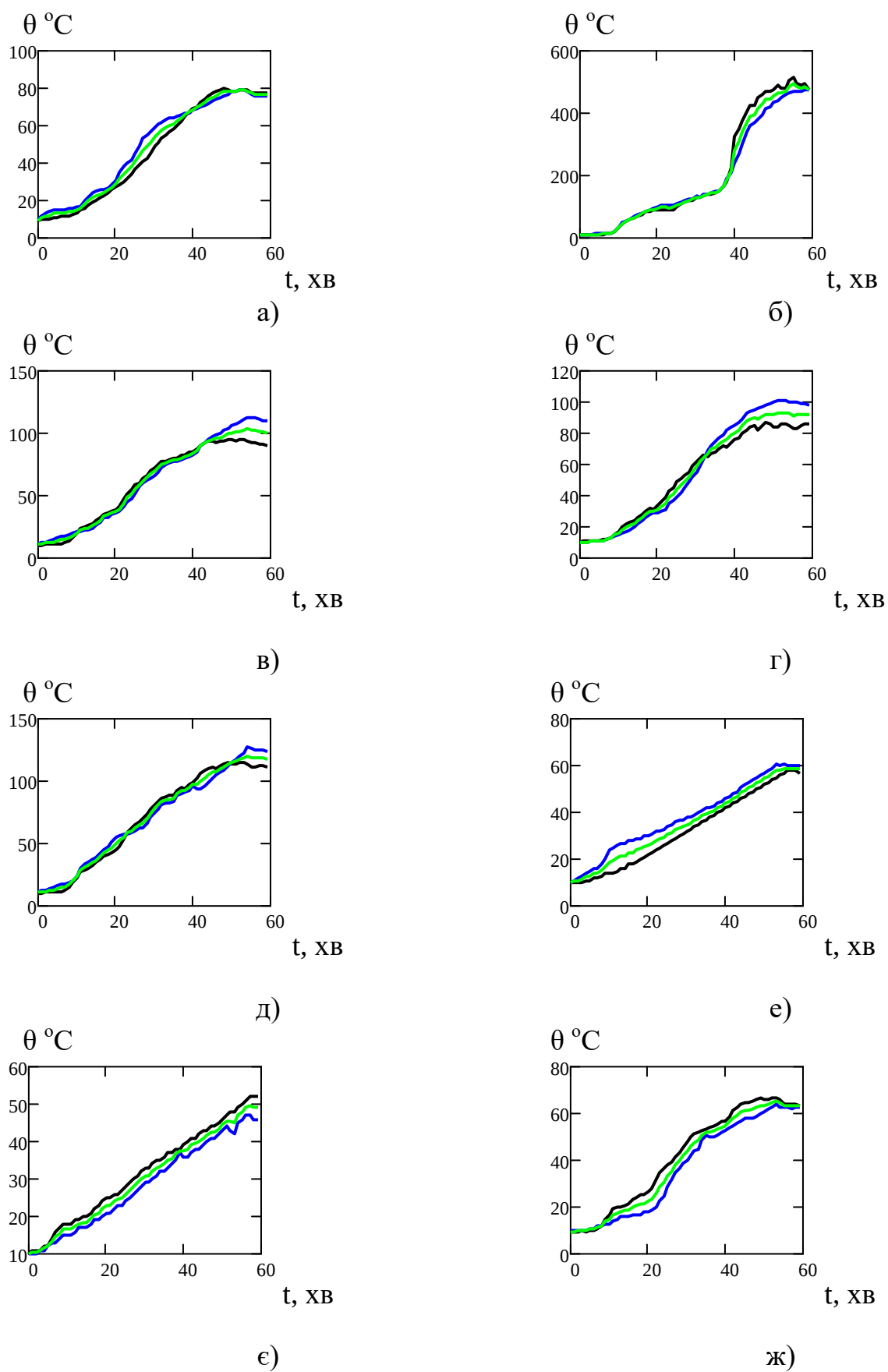


Рисунок. 5.41 – Температурні показники термопар T1 – T8 встановлених в досліджуваних зразках: а) T1, б) T2, в) T3, г) T4, д) T5, е) T6, є) T7, ж) T8, 1, 2 – дані окремого експерименту, 3 – усереднені дані

Дані експериментального дослідження свідчать, що продовж 60 хвилинного впливу джерела теплового випромінювання через віконний проріз та фасад будинку, що випромінює тепло на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка зростає по експоненційному розподілу та досягає максимальних значень: для T1 – 80 °C, для T2 – 540 °C, для T3 – 95 °C, для T4 – 77 °C, для T5 – 116 °C, для T6 – 63 °C, для T7 – 48 °C, для T8 – 66 °C, для T9 – 889 °C, що досягнуті приблизно на 55-й хвилині дослідження.

Максимальні абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення значень температури, визначені для всієї тривалості теплового впливу, представлені у таблиці 5.16.

Таблиця 5.16

Максимальні абсолютні, відносні та середньоквадратичні відхилення значень температур

| Номер досліджуваного зразка | Абсолютні відхилення, °C | Відносні відхилення, % | Середньоквадратичні відхилення, °C | Критерій Фішера |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------|
| T1                          | 4.853                    | 18.581                 | 2,88                               | 0.289           |
| T2                          | 12,6                     | 19,8                   | 7,4                                | -               |
| T3                          | 4.863                    | 10.004                 | 3,1                                | 0.406           |
| T4                          | 6.468                    | 12.932                 | 3,8                                | 0.488           |
| T5                          | 3.738                    | 8.431                  | 3,9                                | 0.388           |
| T6                          | 4.00                     | 13.744                 | 2,1                                | 0.374           |
| T7                          | 4.533                    | 14.641                 | 2,5                                | 0.302           |
| T8                          | 3.154                    | 9.589                  | 2,4                                | 0.210           |

Із аналізу отриманих розрахункових даних випливає, що абсолютні відхилення експериментальних даних кожного експерименту від усереднених значень не перевищують 12,6°C, що у відсоткових показниках становить 19,8 %, а максимальне середньоквадратичне відхилення становить 7,4 °C, що вказує на задовільну збіжність отриманих експериментальних даних.

З метою перевірки належності даних, отриманих в кожному експерименті, до однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера

визначені дисперсії температур ( $S$ ) експериментальних даних від середнього значення за такою формулою (5.9).

Дисперсії відхилень по значенням відповідних термопар наведені на рисунку 5.42.

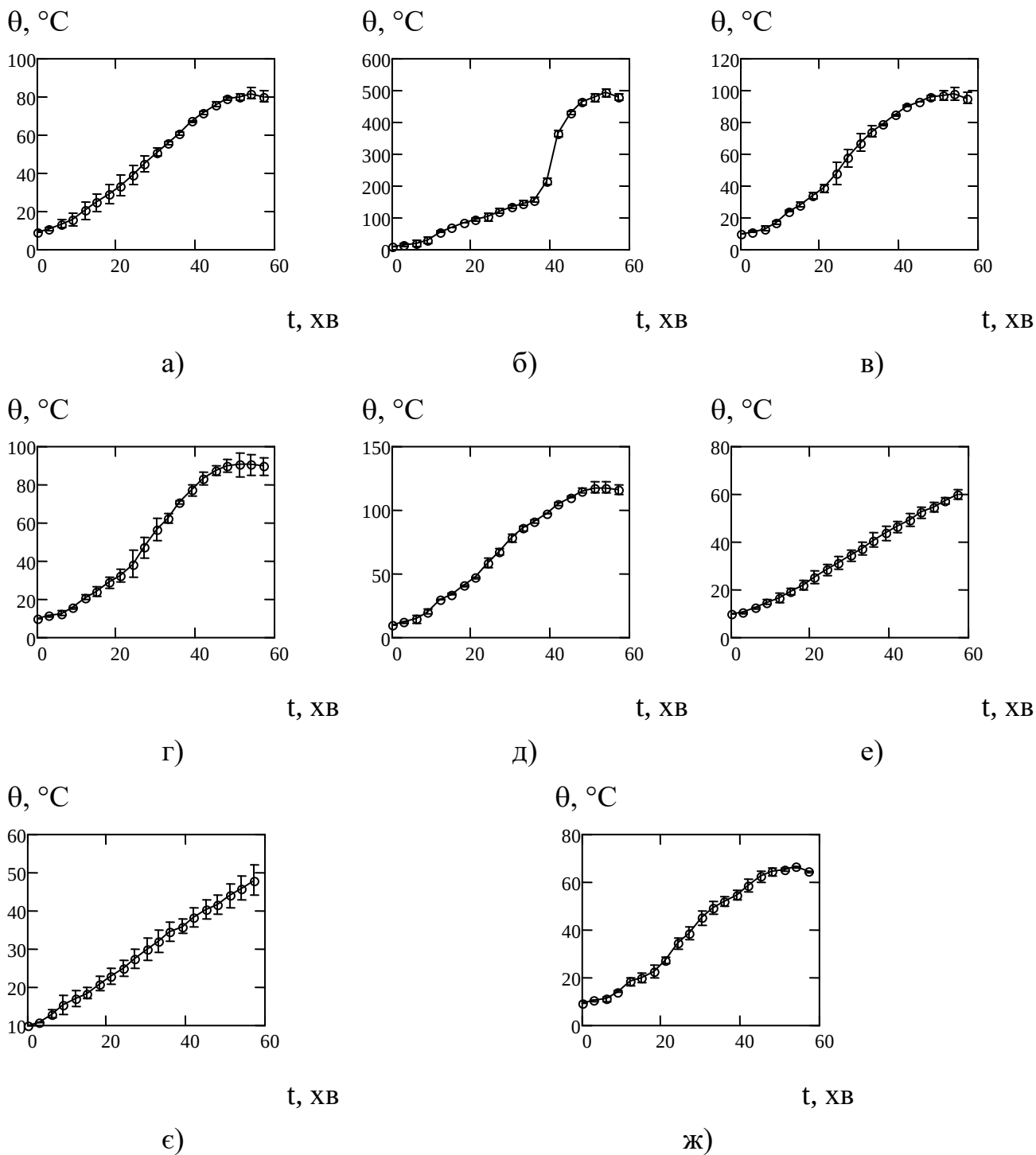


Рисунок 5.42 – Дисперсії відхилень по значенням відповідних термопар, а саме: а) T1-T8

На рисунку 5.43 наведено дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваного зразка Т2.

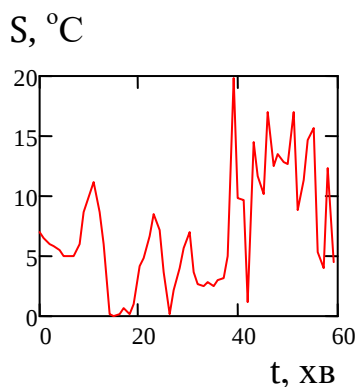


Рисунок 5.43 – Дисперсії температур від тривалості теплового впливу для досліджуваного зразка Т2

Дані рисунку 5.43 свідчать, що дисперсія температур різних експериментів не перевищує 20 °С, що по відношенню до загального діапазону температур отриманих під час експериментальних досліджень не перевищує 3,5 % зазначене дозволяє стверджувати, що отримані дані температур 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.

З урахуванням вищенаведеного, для подальшого оброблення експериментальних даних застосовували середні значення температури за певної тривалості теплового впливу, які наведено в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17

Дані щодо температури на поверхні досліджуваних зразків залежно від відстані їх розташування від осередку горіння та тривалості теплового впливу

| Відстань від осередку горіння L, м | Тривалість теплового впливу t, хв |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|
|                                    | 1                                 | 6     | 12    | 18    | 24    | 30    | 36    | 42    | 48     | 54     | 60    |
| 0*                                 | 9,6                               | 332,6 | 617,1 | 659,3 | 710,6 | 755,5 | 821,1 | 831,4 | 854,3  | 664,1  | 552,9 |
| 2,0                                | 10,6                              | 12,5  | 47,2  | 85,2  | 96    | 124,7 | 146,0 | 309,7 | 428,05 | 469,9  | 454,5 |
| 4,0                                | 11                                | 13,7  | 29    | 42,7  | 58,2  | 74,1  | 86,6  | 98,05 | 109,55 | 119,25 | 117,7 |
| 6,8                                | 9,5                               | 10,4  | 16,5  | 20,5  | 28,9  | 42,3  | 52,1  | 56,4  | 61,8   | 65,45  | 63,25 |

Примітка: \* Наведені значення температури для  $L = 0$  відповідають даними вимірювання температури полум'я на поверхні фасаду, що виконаний із дерев'яних матеріалів

Проведено апроксимацію зазначених в таблиці 5.17 даних щодо температури поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) із застосуванням рівняння числової регресії (5.10), яке встановлює співвідношення між температурою поверхні досліджуваних зразків ( $\Theta$ ) та тривалістю теплового впливу ( $t$ ) і відстанню від осередку горіння ( $L$ ) та визначено значення п'яти констант цього рівняння, які надано у таблиці 5.18.

Таблиця 5.18

Результати визначення констант рівняння числової регресії

| Значення констант рівняння числової регресії |        |       |       |       |       |
|----------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $a_0$                                        | $a_1$  | $a_2$ | $a_3$ | $a_4$ | $a_5$ |
| -36,6                                        | 448,05 | 1,79  | -12,8 | 55    | 1077  |

За цією формулою побудовано розрахункові залежності температури від тривалості теплового впливу для значень відстані 2 м, 4 м та 6,8 м, які наведено на рисунку 5.44. На цьому ж рисунку наведено (позначені кружками) експериментальні дані (таблиця 5.17). Із порівняння розрахункових і експериментальних даних випливає, що найбільше відхилення розрахункових значень температури від експериментальних має

місце для зразка, розташованого на відстані  $L$ , яка становить 2 м, найменше – для зразка, розташованого на відстані  $L = 6,8$  м. При цьому максимальне відхилення дорівнює 20,8 %.

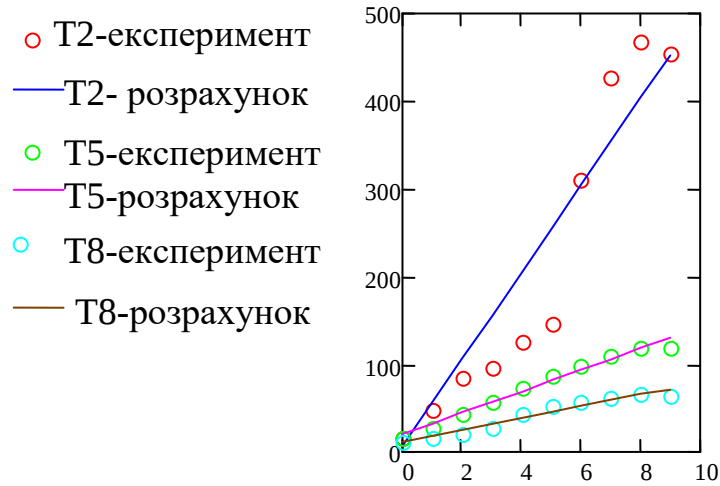


Рисунок 5.44 – Залежність температури на поверхні фасаду будівлі від тривалості теплового впливу, що отримані експериментальним та розрахунковим шляхом для дослідних зразків T2, T5, T8

На рисунку 5.45 наведено розрахункові залежності (отримані за формулою (5.9)) температури на поверхні фасаду будівлі від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу (20 хв, 40 хв та 60 хв).

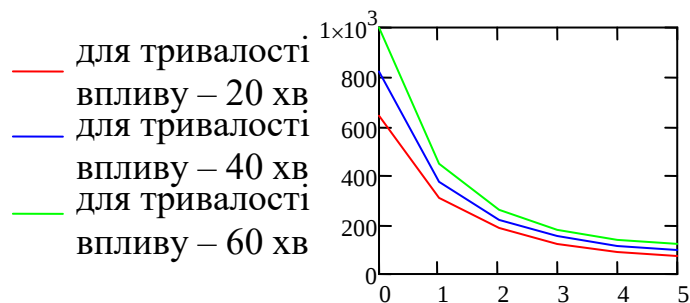


Рисунок 5.45 – Розрахункові залежності (отримані за формулою (5.10)) температури на поверхні фасаду будівлі від відстані до осередку горіння для різної тривалості теплового впливу (20 хв, 40 хв та 60 хв)

В таблиці 5.19 наведені дані максимальних значень температур на поверхні досліджуваних зразків, що отримані під час експерименту залежно від відстані, на якій розташовувалися дослідні зразки.

Таблиця 5.19

Максимальні значення температур на поверхні досліджуваного зразка, залежно від відстані, на якій зразок розташовується від осередку горіння

| Відстань від осередку горіння до зразка, м | Температура, °C |
|--------------------------------------------|-----------------|
| 0                                          | 589             |
| 2                                          | 540             |
| 4                                          | 116             |
| 6,7                                        | 66              |

На рисунку 5.46 наведено залежність зміни максимальної температури на поверхні досліджуваних зразків, що отримані під час експерименту залежно від відстані, на якій розташовувалися дослідні зразки.

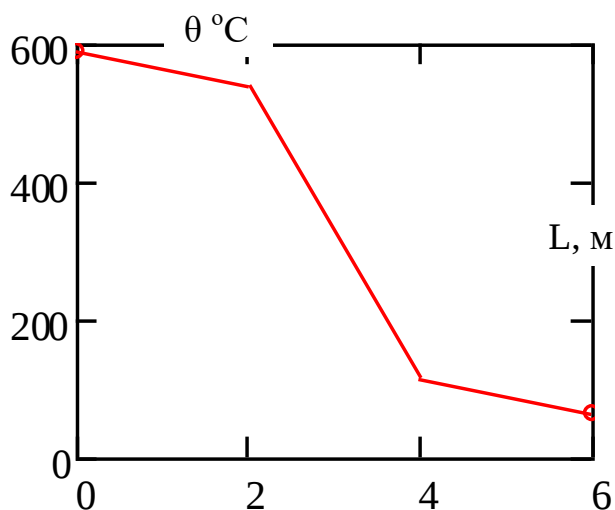


Рисунок 5.46 – Зміна температур залежно від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння

Зазначену залежність апроксимовано у вигляді поліномів, що описуються залежністю типу  $\Theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$ , коефіцієнти регресії, яких наведено в таблиці 5.20.

Таблиця 5.20

## Параметри регресійних залежностей

| Коефіцієнти регресії                       | $a_0$ ,<br>мм | $a_1$ ,<br>мм/хв <sup>-1</sup> | $a_2$ ,<br>мм/хв <sup>-2</sup> | $a_3$ ,<br>мм/хв <sup>-3</sup> |
|--------------------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| $d(\Theta) = a_0 + a_1d + a_2d^2 + a_3d^3$ | 589           | 194,083                        | -140,5                         | 15,604                         |

На рисунку 5.47 зображено залежність зміни температури від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння, що віддалені відповідно в повздовжньому, і в поперечному напрямках.

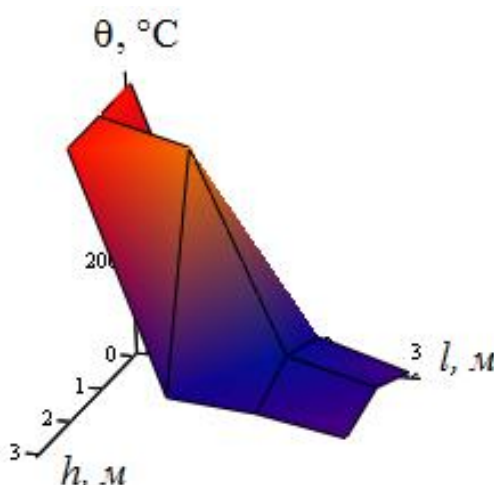


Рисунок 5.47 – Залежність зміни температури від відстані, на якій розташовуються досліджувані зразки від осередку горіння, що віддалені відповідно в повздовжньому і в поперечному напрямках

За максимальними даними термопар Т1-Т8 використовуючи залежність 5.10 визначаємо значення кутового коефіцієнту випромінювання та його зміну залежно від віддалення від джерела випромінювання. Отримані результати наведені в таблиці 5.21.

Таблиця 5.21

## Результати розрахунку кутового коефіцієнту випромінювання

| Відстань від джерела теплового випромінювання до дослідних зразків | 2 м   |      | 4 м  |      | 6,8 м |
|--------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|-------|
| Точка для якої визначається значення, $\varphi$                    | T1    | T3   | T4   | T6   | T7    |
| Значення, $\varphi$                                                | 0,15  | 0,18 | 0,54 | 0,66 | 0,72  |
| Середнє значення, $\varphi$                                        | 0,165 |      | 0,6  |      | 0,72  |

Зміна значення кутового коефіцієнту випромінювання залежно від віддалення від джерела теплового випромінювання наведено на рисунку 5.48.

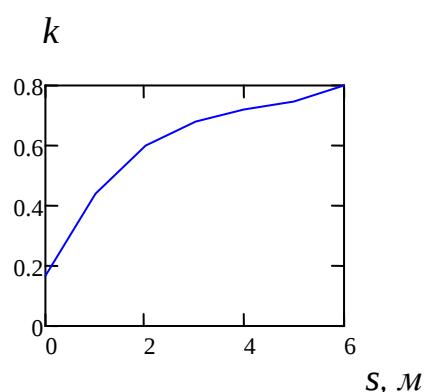


Рисунок 5.48 – Зміна значення кутового коефіцієнту випромінювання залежно від віддалення від джерела теплового випромінювання

Таким чином під час експериментальних досліджень температурного впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа фасаду будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур (потужності теплового потоку) на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання через віконний проріз будинку описується залежністю типу  $\Theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур;

- із збільшенням відстані від джерела теплового випромінювання значення коефіцієнта випромінювання втрачає свій вплив та наближається до одиниці.

#### 5.4 Висновки за розділом

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Під час експериментальних досліджень температурного впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в промисловій споруді, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- що продовж 10 хвилинного впливу джерела теплового потоку модельного вогнища пожежі класу 55В на досліджуваний зразок на висоті установки термопар 1 м, температура на його поверхні зростає по експоненційному розподілу та досягає на відстані 2 м – 110 °С, 4 м – 58 °С, 6 м – 48 °С.;

- за допомогою статистичного аналізу показано, що абсолютні відхилення усереднених експериментальних досліджень не перевищують 10 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 15 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 1,3÷6,6 °С, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки, результати термопар Т1-Т18 не мітять викидів та квазівикидів за критерієм Граббса, дані, що отримані за результатами експериментальних досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження;

- вперше встановлено, що залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання описується залежністю типу

$\theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур на висоті відносно землі 1 м, 2 м та 3 м;

- отримані експериментальні дані дають можливість провести верифікацію математичних моделей теплообміну між спорудами під час пожежі, котрі ляжуть в основу методології визначення протипожежних відстаней.

2. Встановлено, що значення параметру теплового потоку біля елементів будинку, який суміжний із будинком, що горить є не стабільним та змінним в часі, що пояснюється впливом зовнішніх умов, зокрема повітряних потоків. В свою чергу зазначене не дозволяє порівняти значення теплового потоку із відповідними характеристиками матеріалів, які використовуються у суміжному будинку, що опромінюється від пожежі, зазначене означає, що критерій тепловий потік не можна використовувати під час оцінювання протипожежної відстані.

3. Під час експериментальних досліджень температурного впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа в будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- що продовж 30 хвилинного впливу джерела теплового потоку через віконний проріз на досліджуваний зразок температура на поверхні зразка зростає по експоненційному розподілу та досягає максимальних значень 161 °С, 94 °С та 55°С відповідно для відстаней від осередку горіння 2 м, 4 м та 6,8 м;

- статистика досліджень свідчить, що абсолютні відхилення експериментальних досліджень не перевищують 11 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 16 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах  $2\div 9,9$  °С, що вказує на те, що дані точок кожного експериментального дослідження скупчені ближче до середнього значення (математичного сподівання) вибірки, результати термопар Т1-Т8 не мітять

викидів та квазівикидів за критерієм Граббса, дані, що отримані за результатами експериментальних досліджень є вибірками з однієї генеральної сукупності за критерієм Фішера, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого експериментального дослідження;

- вперше встановлено, що залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання через віконний проріз будинку описується залежністю типу  $\theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур.

4. Під час експериментальних досліджень температурного впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути пожежа фасаду будинку, на сусідні будинки та споруди в залежності від часу температурного впливу, а також визначення зміни значення температур на поверхні досліджуваних зразків встановлено:

- залежність зміни температури від відстані до осередку теплового випромінювання через віконний проріз будинку описується залежністю типу  $\theta(d)=a_0+a_1d+a_2d^2+a_3d^3$  та визначені коефіцієнти даної регресії для значень температур;

- із збільшенням відстані від джерела теплового випромінювання значення коефіцієнта випромінювання втрачає свій вплив та наближається до одиниці.

5. Виявлена залежність зміни кутового коефіцієнту опромінювання залежно від віддалення до джерела теплового впливу, що має нелінійний характер.

## РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

### 6.1 Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу В

З метою розрахунку теплового впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути модельне вогнище пожежі класу В на сусідні конструктивні елементи будинків та споруд в залежності від часу температурного впливу, розроблено відповідну математичну модель.

Математичну модель розроблено в програмному комплексі Fire Dynamics Simulator [242, 294 – 296] з врахуванням положень вітчизняних вимог [266]. Під час розроблення математичної моделі використані вихідні дані згідно із методикою [269].

На всіх твердих поверхнях задавалися граничні умови, а також дані про горючість матеріалу. Тепловий і масовий перенос із поверхні й назад розраховувався за допомогою емпіричних співвідношень.

Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використано спеціальна програма SmokeView (смоук-вью) [297].

Основним початковим завданням під час моделювання є максимальне наближення параметрів моделі до умов, що визначені методикою експериментальних досліджень та взаємозв'язків об'єктів, а саме: суміжних відстаней, дотримання масштабів об'єктів, матеріалу об'єктів, в тому числі багатошарового, параметрів навколишнього середовища, пожежного навантаження об'єктів та їх реакції горіння, вибір сценарію виникнення та продовження горіння. Що стосується теплофізичних властивостей матеріалів (густина, агрегатний стан, питома теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт поглинання та випромінювання, температура самозаймання) то це завдання покладене на математичний комплекс програми FDS, і може лише корегуватися на етапі введення вихідних даних [298].

На першому етапі моделювання, створено графічну основу, яка відображає ситуативне розташування об'єктів, які досліджуються, на площині. Дана основа може бути, як у вигляді примітивної схеми з умовними позначеннями об'єктів у форматі «JPEG», так і у високоточному форматі із застосуванням сучасних систем автоматизованого проектування і креслення, наприклад у форматі «DWG» на базі платформи AutoCAD із деталізованим кресленням.

Основа експортується у Viewport (в'юпорт) програмного комплексу FDS в якості площини на відмітці 0,000 м. На площині основи задається опорна точка, до якої прив'язується системи координат ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  – ширина, довжина, висота) для будь якого об'єкту, що буде в майбутньому створюватись в межах площини, або навіть поза нею.

Також важливим є завдання масштабу, який буде використовуватись в рамках в'юпорту відносно площини та об'єктів, які на ній створюватимуться. Для цього програма потребує введення відстані від будь якої точки А і до точки В на площині основи із введенням відповідної відстані в метрах.

Призначення основи полягає у точному відтворенні схеми улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів – об'єктів моделювання. На рисунку 5.1 наведено схема улаштування випробувальних зразків та вимірювальних приладів в рамках методики [269] та створена основа для моделювання.

Наступним етапом створення математичної моделі є створення розрахункової сітки в системі якої проводитимуться розрахунки.

Одним із недоліків програми FDS є геометрія сприйняття об'єктів. FDS вирішує основні рівняння тепло переносу виключно на прямокутній сітці. Перешкоди, об'єкти або сукупність об'єктів обов'язково повинні бути прямокутними або складатися з численних прямокутників, щоб задовольняти параметри сітки. Мінімальне геометричне значення прямокутників із яких складається об'єкт залежить від заданої величини комірок сітки. Величина комірок сітки прямо пропорційно впливає на точність розрахунків.

Тобто, створюючи певний об'єм сітки для моделювання, наприклад розміром в  $1 \text{ м}^3$  із величиною комірок сітки в  $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  ми отримаємо 100 комірок де проходитиме обчислення термодинамічних процесів між об'єктами та в просторі навколо них. Розмістивши один об'єкт, наприклад, дерев'яний брус розмірами  $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  в одному кінці куба сітки і 1 дм бензину, що горить в протилежній частині куба сітки, їх розділятиме по горизонталі 8 кубів простору, який враховуватиметься під час розрахунків теплопередачі. В разі створення об'єму сітки розміром в  $1 \text{ м}^3$  із величиною комірок сітки  $25 \text{ см} \times 25 \text{ см}$ , кількість комірок зменшиться до 40, а кількість кубів простору між брусом та бензином вже становитиме 2, що значно гірше вплине на якість точності отриманих результатів.

Згідно із досліджень [233], одним із оптимальних значень розмірів комірок сітки для моделювання натурних випробувань є розмір  $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  та  $25 \text{ см} \times 25 \text{ см}$ . Для об'єктів лабораторного дослідження, ці значення сітки доцільно зменшувати до 1 см.

Технічна настанова використання програми FDS [234] регламентує, що критерій точності розширення сітки визначається за допомогою безмірного рівняння [234]:

$$D^*/\delta x, \quad (6.1)$$

де  $D^*$  - умовний діаметр полум'я, який визначається за формулою [234]:

$$D^* = \left( \frac{Q}{p_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (6.2)$$

$\delta x$  – номінальний розмір комірки сітки 1.

Величина  $D^*/\delta x$  може бути прийнята, як кількість обчислювальних комірок, що охоплюють характеристичний (не обов'язково фізичний) діаметр полум'я. Чим більше комірок охоплює полум'я, тим якісніша точність моделі [234]:

$$Q^* = \left(\frac{D^*}{D}\right)^{5/2}, \quad (6.3)$$

де  $D$  – фізичний діаметр полум'я.

Під час прийняття рішення, щодо вибору величини комірок також доцільно керуватися наявними геометричними параметрами об'єктів, що моделюються. Якщо значення геометричних параметрів об'єктів мають відносно рівні значення в метрах (наприклад 1.0; 1.5; 5.0; 10.0 і т.д.), їх доцільно округлювати до 25 см (0,25 м), а в окремих великомасштабних моделях можливо приймати навіть до 50 см. В разі наявності різних геометричних значень форми об'єктів, які важко округлити до однакового числа, доцільно зменшувати величину комірок до 10 см (0,1 м) навіть для великомасштабних моделей.

Окремо слід звернути увагу на геометрію самої комірки. Для нормального функціонування програми FDS, комірки повинні мати правильну, рівнопропорційну кубічну форму. В разі застосування сітки з непропорційними параметрами комірки, розрахунок виконуватиметься, проте час обрахунку може збільшуватись у декілька разів. В рамках моделювання, враховуючи геометричні параметри об'єктів, а також для збільшення точності обчислень, приймаємо розмір комірки сітки 10 см×10 см. Оптимальність обраної сітки підтверджено застосуванням методу 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.

В якості експериментальної опорної моделі для обґрунтування розміру комірки сітки методом дихотомії, обрано вогнище пожежі класу В із вільним горінням відкритої поверхні площею 2,25 м<sup>2</sup>. На висоті 1 м над поверхнею запрограмованої моделі вогнища влаштовано 5 датчиків, один по центру та інші чотири на відстанях від центра вогнища 1 та 2 м відповідно. Схема розміщення моделі вогнища та датчиків наведено на рисунку 6.1.

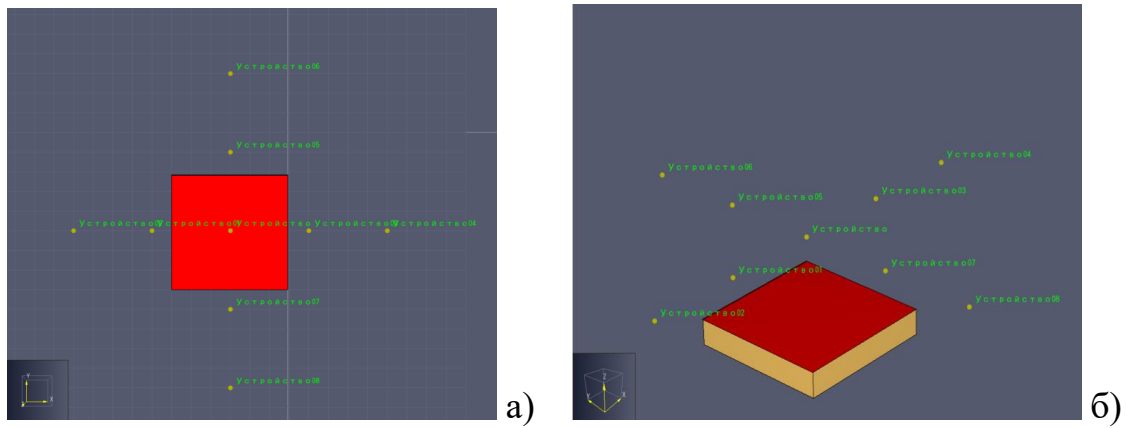


Рисунок 6.1 – Схема розміщення моделі вогнища та датчиків під час обґрунтування розмірів комірок сітки, а – проекція зверху; б – фронтальна проекція

Застосування методу дихотомії виконувалось шляхом проведення експериментального розрахунку значення температури під час вільного горіння моделі вогнища В та порівняння отриманих даних для кожного типу сітки з комірками 50 см×50 см, 25 см×25 см, 10 см×10 см та 5 см×5 см.

Зразки досліджуваних сіток моделей наведено на рисунку 6.2.

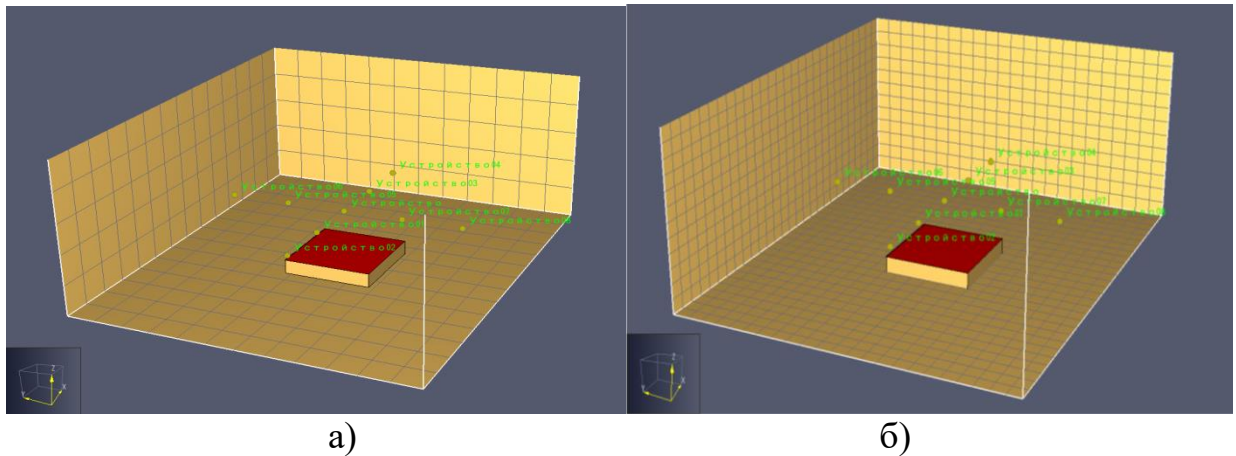


Рисунок 6.2 – аркуш 1. Моделі сіток із величинами комірок:  
а) – 50 см × 50 см; б) – 25 см×25 см

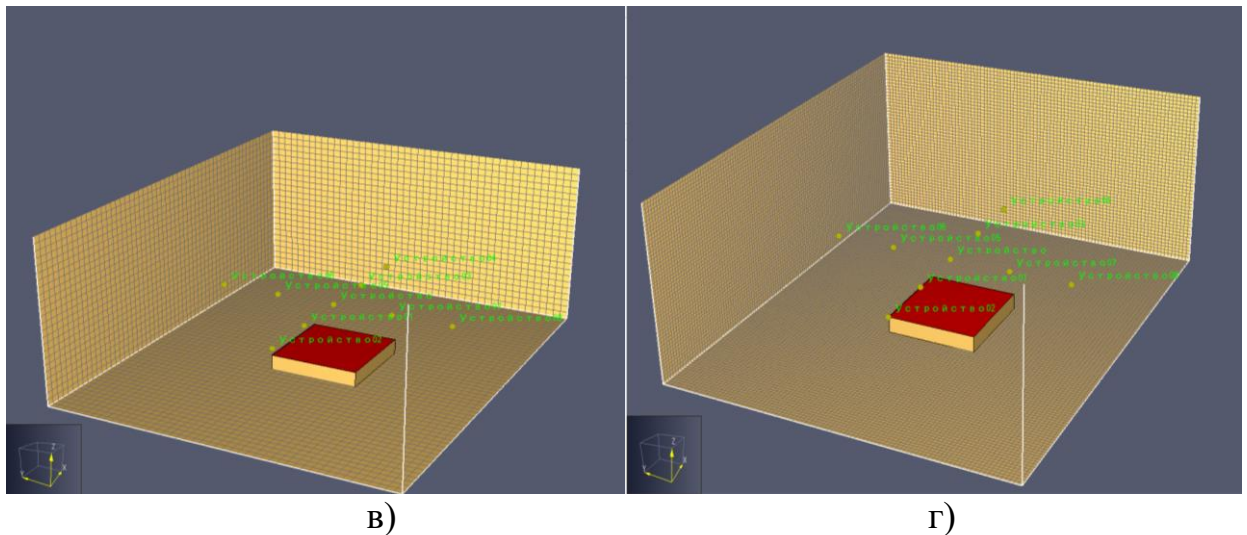


Рисунок 6.2 – аркуш 2. Моделі сіток із величинами комірок:  
в) – 10 см×10 см; г) – 5 см × 5 см

За результатом серії моделювання визначено, що різниця значень температури для моделі із кроком комірки приймаємо розмір комірки сітки для подальших розрахунків 10 см × 10 см мають різницю значень моделі із кроком комірки 5 см×5 см в межах 1,0 %, що є прийнятним для подальшого розрахунку. Таким чином для подальшого розрахунку приймаємо розмір комірки сітки розміром 10 см×10 см.

Наступним етапом моделювання є створення об'єктів у відповідному масштабі. Основним із найскладніших завдань під час моделювання є максимальне наближення параметрів моделі до реальних умов та відтворення взаємозв'язків об'єктів, а саме: суміжних відстаней, дотримання масштабів об'єктів, вибір матеріалу об'єктів, в тому числі багатошарового, задавання параметрів навколишнього середовища, пожежного навантаження в об'ємі об'єктів та їх реакції горіння, а також вибір сценарію виникнення та поширення горіння.

До складу об'єктів під час розрахунку теплового впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути модельне вогнище пожежі класу В на сусідні конструктивні елементи будинків та споруд входять наступні елементи:

1) Модельне вогнище пожежі класу 55В що представляє собою металеве деко діаметром  $1480 \pm 15$  мм, висотою борта  $150 \pm 5$  мм та товщиною стінки борта  $2,5 \pm 0,5$  мм, у яке заливають 18 л води та 37 л дизельного палива;

2) досліджуваний дерев'яний зразок із суцільного соснового бруса розмірами  $50 \times 50 \times 4000$  мм;

3) дизельне паливо.

Відтворення моделі металевого дека базується на створенні численних прямокутних фрагментів з'єднаних колом необхідного діаметру. В якості матеріалу дека обрано сталь, з наступними фізичними параметрами:

- густина матеріалу  $7850 \text{ кг/м}^3$ ;
- теплопровідність  $45,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
- коефіцієнт випромінювання (для старої окисленої сталі) 0,82.

Відповідно до [269], деко наповнюється водою в кількості 18 л для вирівнювання дзеркала поверхні нижнього шару горючої рідини, яка знаходиться на дні дека. Дана вимога пов'язана із тим, що дно дека має певні нерівності, які під час завершення вигорання палива створюють «островки» непокритого паливом металу та впливають на рівномірність моделі горіння в останні хвилини експерименту. У зв'язку з тим, що програма FDS забезпечує абсолютне значення відмітки дна дека, створення шару води є не обов'язковим і під час моделювання не створюється.

Дизельне паливо, яким наповнюють деко має наступні фізичні параметри:

- густина матеріалу  $850 \text{ кг/м}^3$ ;
- коефіцієнт випромінювання 0,9;
- питома тепловиділення  $5800 \text{ кВт/м}^2$ ;

Таким чином створено математичну модель металевого дека, що відповідає параметрам дека модельного вогнища пожежі класу 55В, а також шар дизелю в 24 мм, який відповідає заповненому об'єму в 37л. На рисунку 6.3 наведено вигляд математичної моделі металевого дека модельного вогнища пожежі класу 55 В.

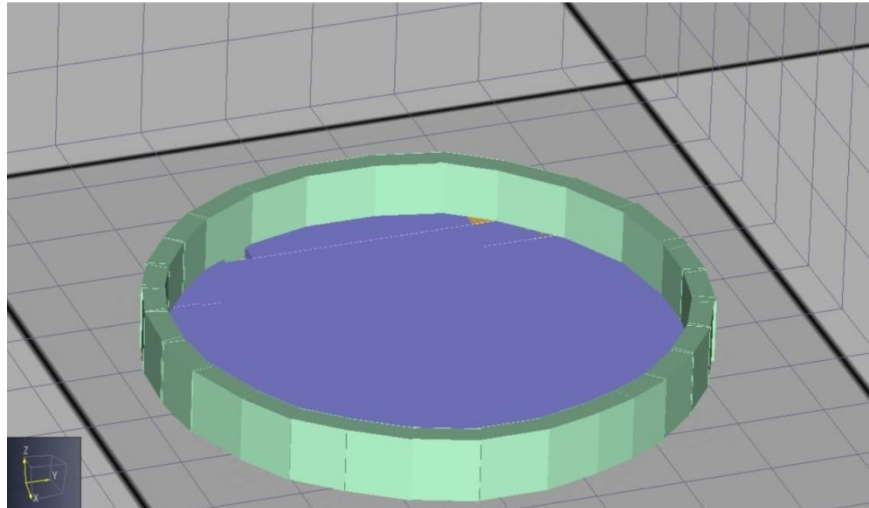


Рисунок 6.3 – Математична модель металевого дека модельного вогнища пожежі класу 55 В

Наступним об'єктом моделювання є досліджуваний дерев'яний зразок із суцільного соснового бруса розмірами  $50 \times 50 \times 4000$  мм.

В якості характеристики матеріалу об'єкту, для сосни застосовуємо дані [299], яка має наступні фізичні параметри:

- густина матеріалу  $520 \text{ кг/м}^3$ ;
- коефіцієнт випромінювання 0,9;
- питома тепловиділення  $290 \text{ кВт/м}^2$ ;

На рисунку 6.4 наведено загальний вигляд математичної моделі [300].

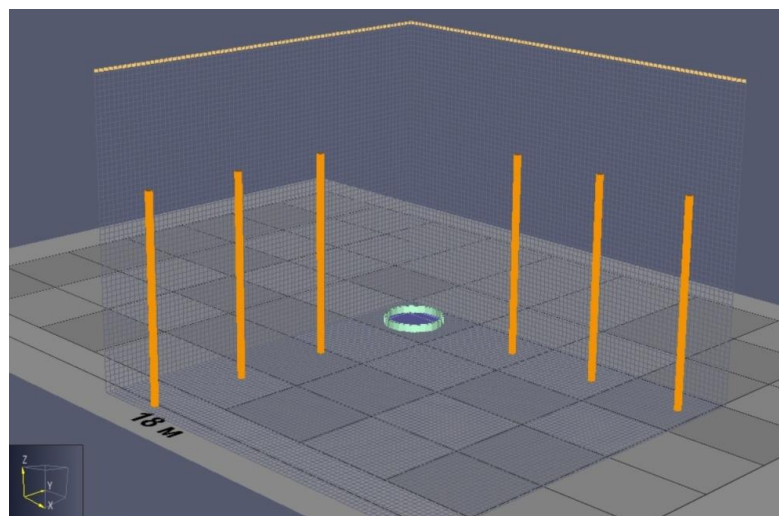


Рисунок 6.4 – Загальний вигляд математичної моделі

Наступним етапом розрахунку є створення початкової реакції горіння, визначення поверхні горіння та параметри надходження повітря, як невід'ємної частини процесу горіння.

В даному випадку моделі, розглядається горіння єдиної речовини, а саме дизелю, а тому реакція горіння не передбачає введення інших речовин або моделювання багатошарового об'єкту.

В якості початкової точки горіння, обрано центр дека, де самовільно, в результаті активації «уявного» пальника (джерела пожежі) відбувається процес підпалу горючої рідини із подальшим поширенням полум'я зі швидкістю 0,3 м/с згідно з [301, 302].

Швидкість місцевої втрати маси палива має наступний математичний вигляд [301]:

$$m_n^n(t) = m_{f,0}^n(t) e^{-\int k(t) dt} \quad (6.4)$$

де  $m_{f,0}^n$  - масова швидкість вигорання на одиницю площі, яка задається користувачем за довідковими даними та за умови, що вода для гасіння не подається;

$k$  – функція витрати води на одиницю площі, в нашому випадку  $k=0$ .

Експериментальні дослідження проводяться на відкритій ділянці з безперешкодним доступом повітря із атмосферного середовища. Таким чином, під час моделювання кожна сторона розрахункової сітки, окрім підлоги, задається як відкритий простір із вільним доступом кисню та вільним відведенням продуктів згоряння.

На рисунку 6.5 наведено візуалізацію розрахункової сітки та її кордонів, а також синім кольором виділено одну із сторін яка має параметри відкритого з атмосферою середовища.

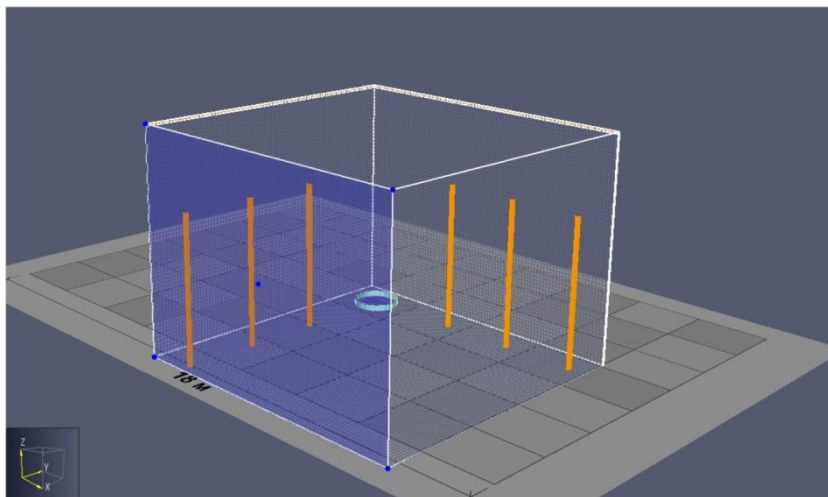


Рисунок 6.5 – Візуалізація розрахункової сітки

Важливою частиною математичної моделі є датчики або вимірювачі в газовій фазі. Для отримання кожного виду інформації або даних, що розраховуються необхідно встановити відповідний датчик. Відповідно до [269], в досліджуваних дерев'яних зразках із суцільного соснового бруса влаштовуються термопари, для визначення температурного впливу джерела пожежі на досліджувані зразки деревини. Таким чином, за результатом моделювання встановлено датчики (термопари) у соснові бруси. На рисунку 6.6 жовтим кольором наведено місця влаштування термопар відповідно до [269].

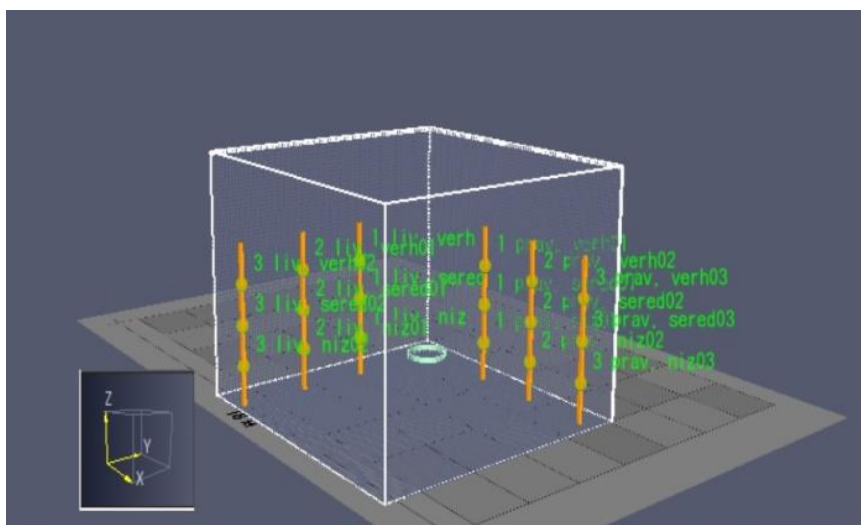


Рисунок 6.6 – Математична модель із встановленими термопарами на об'єктах дослідження

Слід враховувати, що розрахункові дані, які будуть отримані від датчика, стосуватимуться виключно тієї комірки сітки, де вони встановлені. Таким чином, вразі необхідності отримати усереднені дані, наприклад для площини, програма FDS дозволяє створювати розрахункові площини-візуалізатори, які дають дані аналогічні датчикам в межах заданої площини по координатам  $X$ ,  $Y$  або  $Z$  з візуалізацією результатів в часі. На рисунку 6.7 наведено розрахункові площини візуалізатори температури по осям  $X$  та  $Y$ .

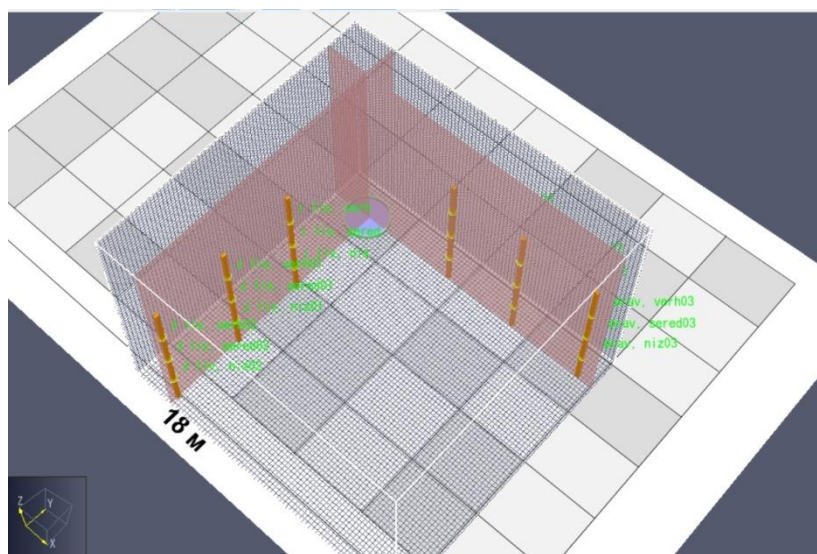


Рисунок 6.7 – Місця влаштування площин-візуалізаторів температури

Заключним етапом розрахунку є програмування загальних параметрів, а саме необхідну тривалість моделювання, параметри навколишнього середовища, визначення граничних величин, які необхідно додатково визначити під час розрахунку.

Відповідно до [269], тривалість експериментальних досліджень складає 10 хвилин. Таким чином загальний час моделювання задано 600 секунд.

За результатом розрахунку отримано наступні результати:

Загальна візуалізація температури із відображенням температурних полів в площинах наведена на рисунках 6.8 – 6.10.

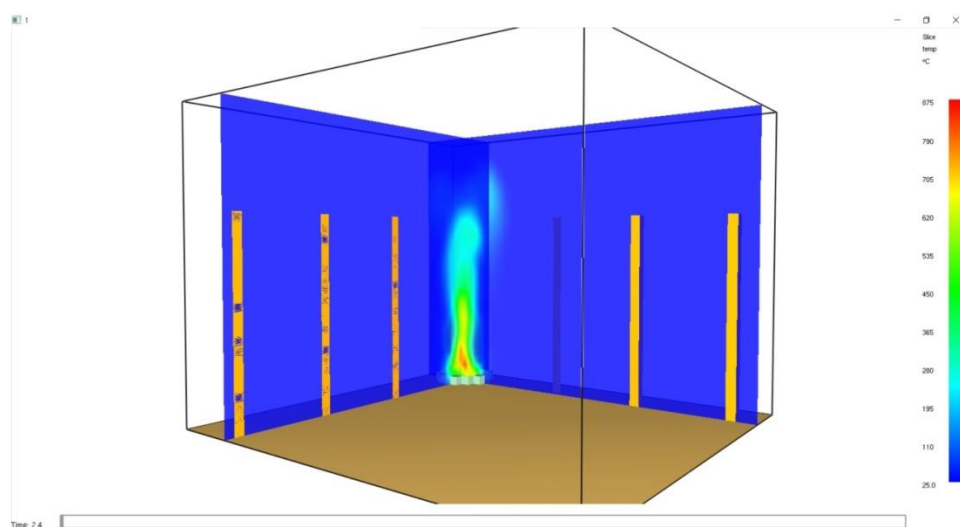


Рисунок 6.8 – Візуалізація температурних розподілів під час горіння модельного вогнища пожежі класу 55В на 2 секунді

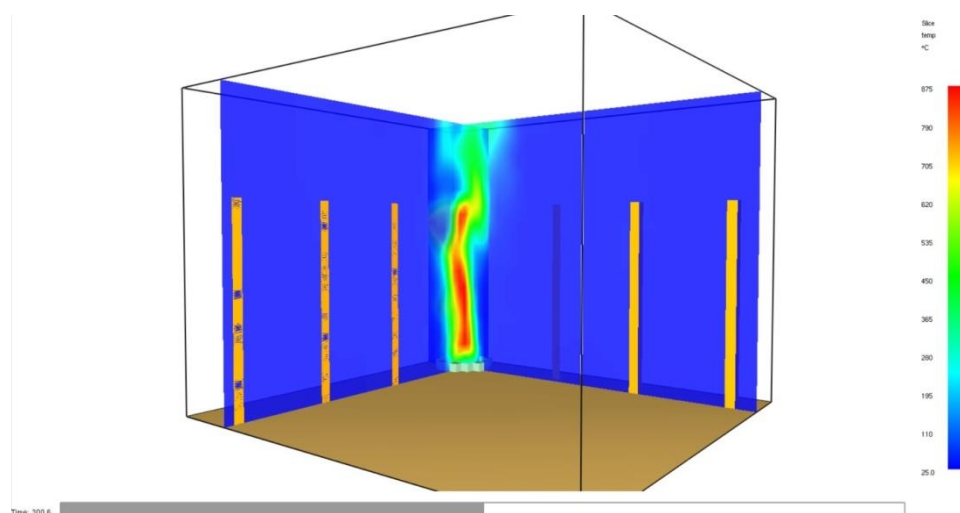


Рисунок 6.9 – Візуалізація температурних розподілів під час горіння модельного вогнища пожежі класу 55В на 300 секунді

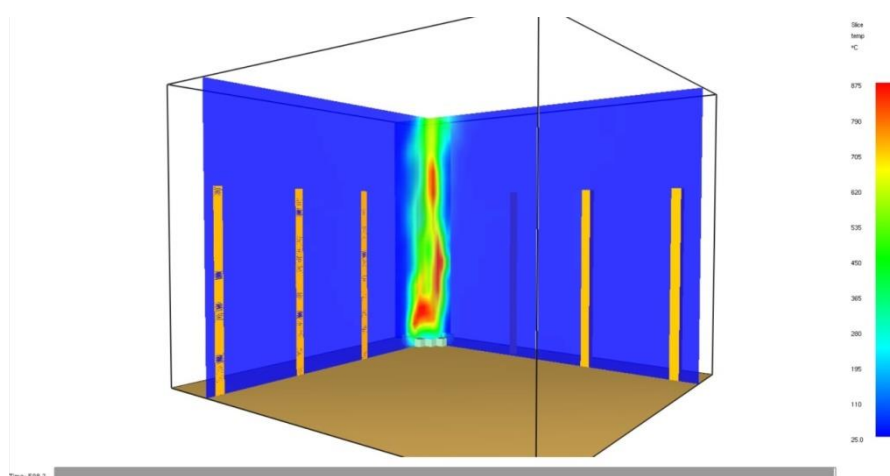


Рисунок 6.10 – Візуалізація температурних розподілів під час горіння модельного вогнища пожежі класу 55В на 600 секунді

Схема розташування термопар (ліва і права сторона ряду брусів, а також верх, середина та низ на кожному брусі, що відповідає висоті влаштування термопар – 1, 2 та 3 м) наведено на рисунку 6.11.

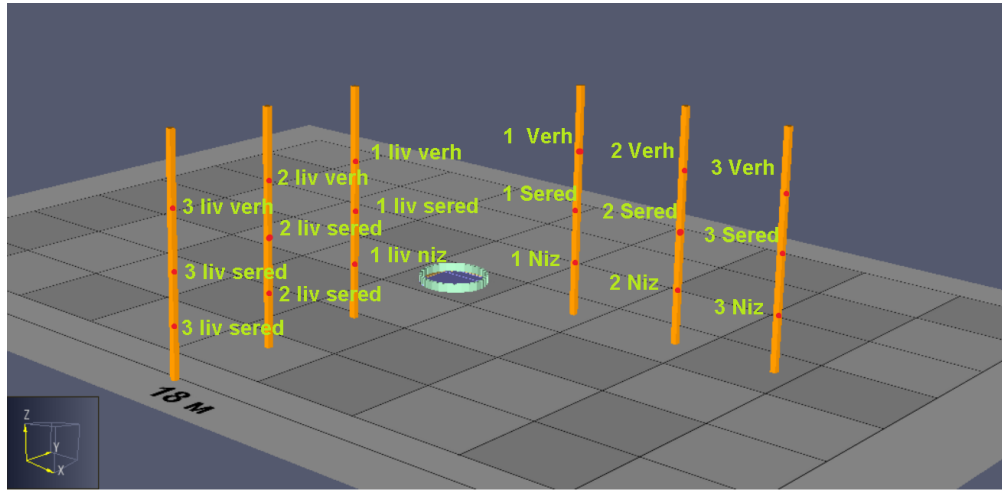


Рисунок 6.11 – Схема розташування термопар

Дані термопар за результатом моделювання наведено на рисунках 6.12 – 6.17.

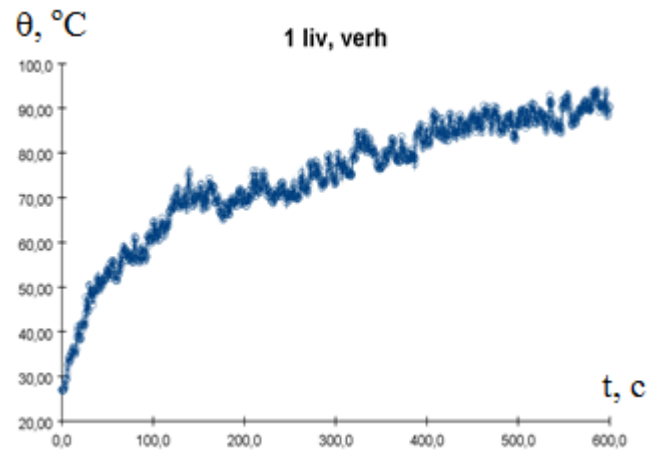
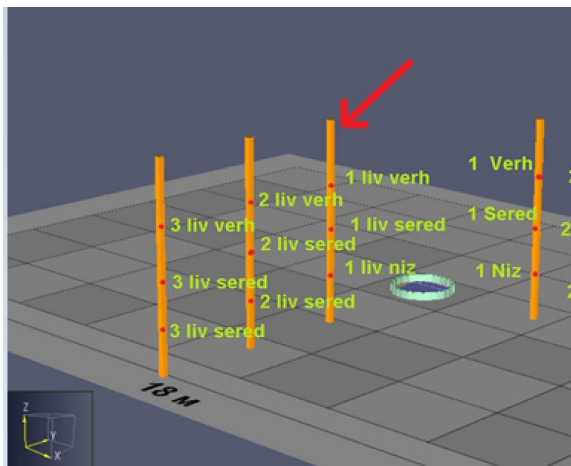


Рисунок 6.12 – аркуш 1. Дані термопар першого бруса лівої сторони

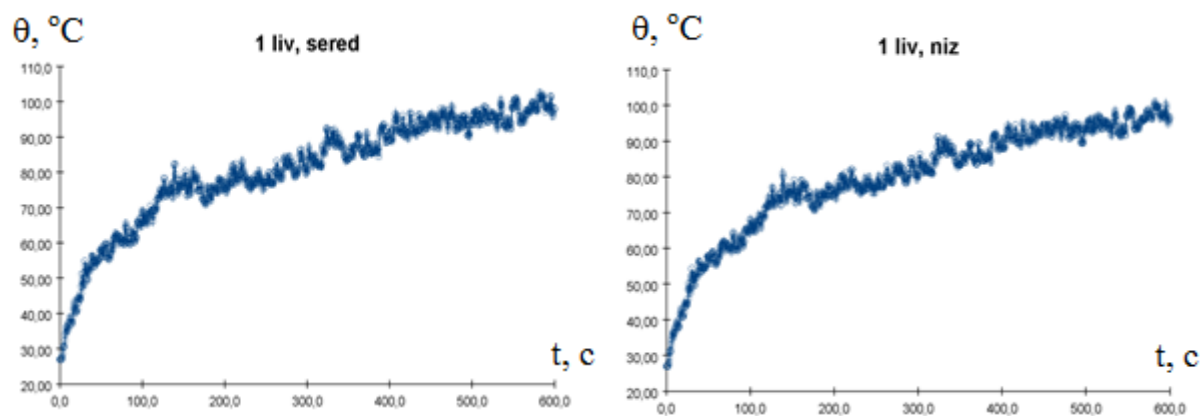


Рисунок 6.12 – аркуш 2. Дані термопар першого бруса лівої сторони

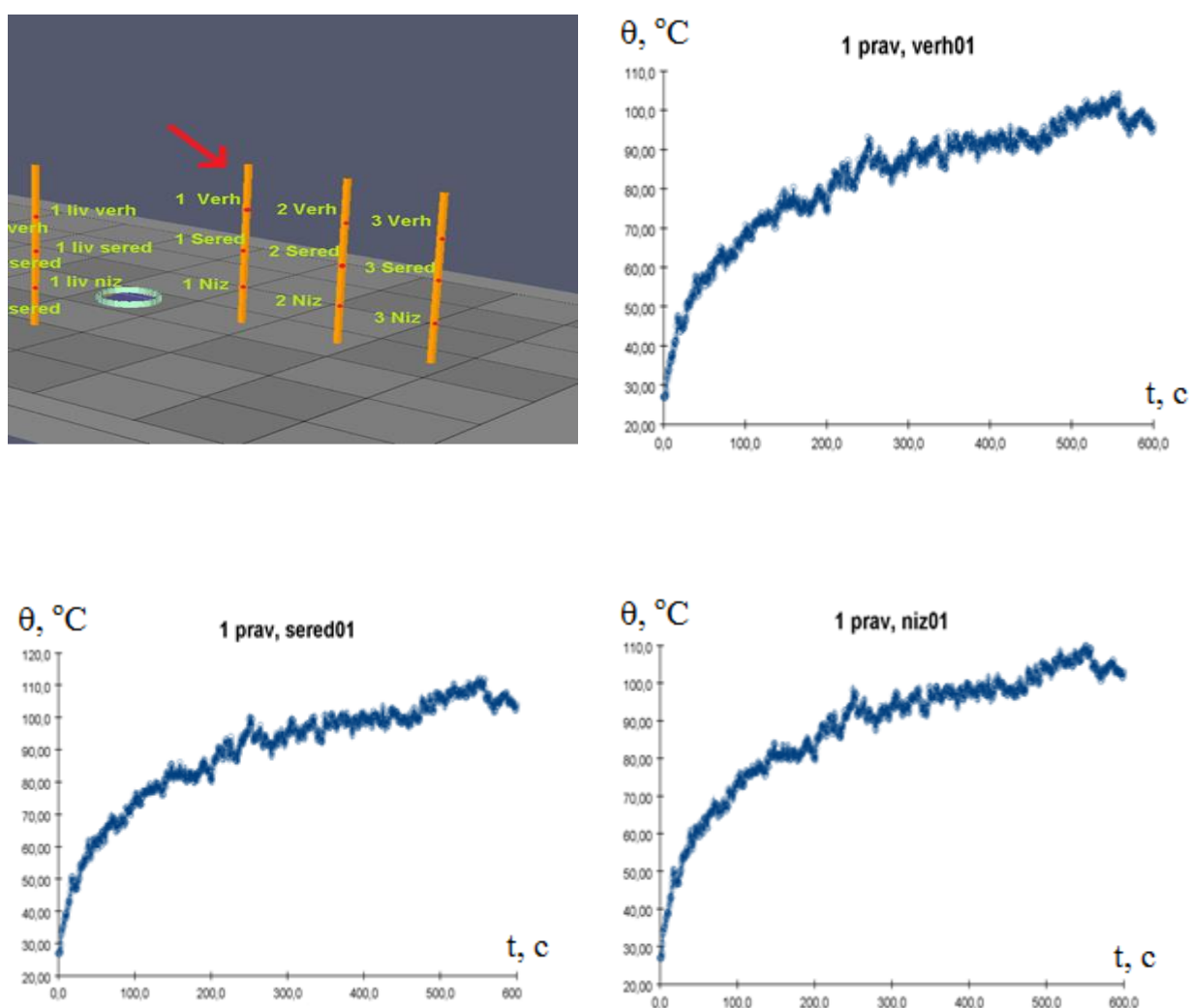


Рисунок 6.13 – Дані термопар першого бруса правої сторони

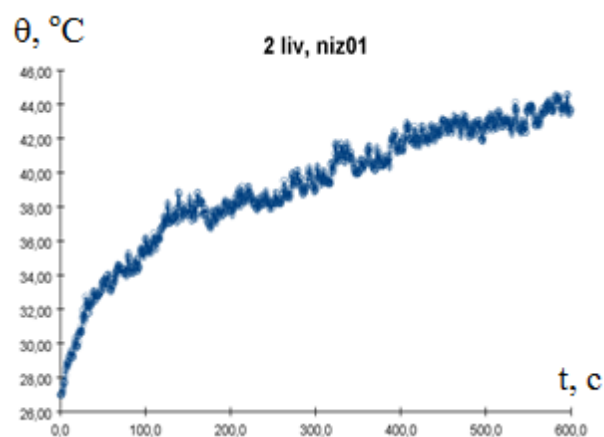
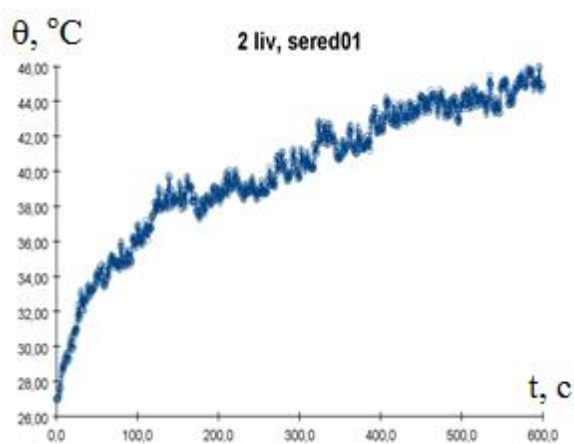
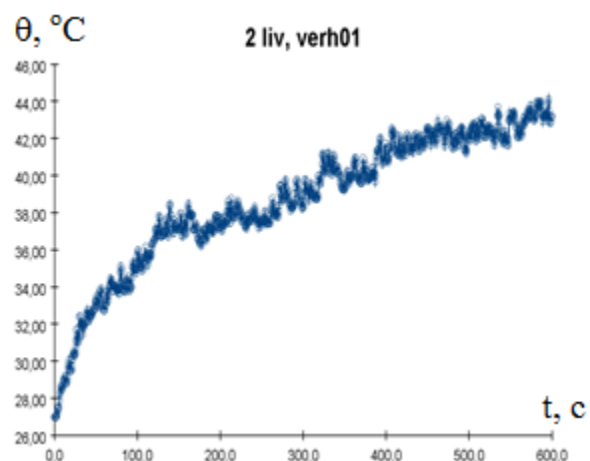
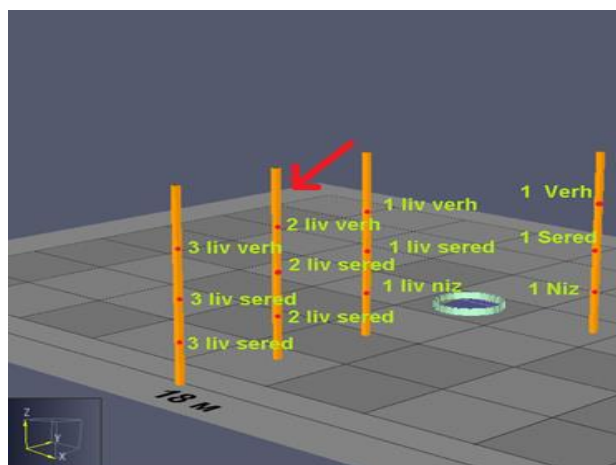


Рисунок 6.14 – Дані термопар другого бруса лівої сторони

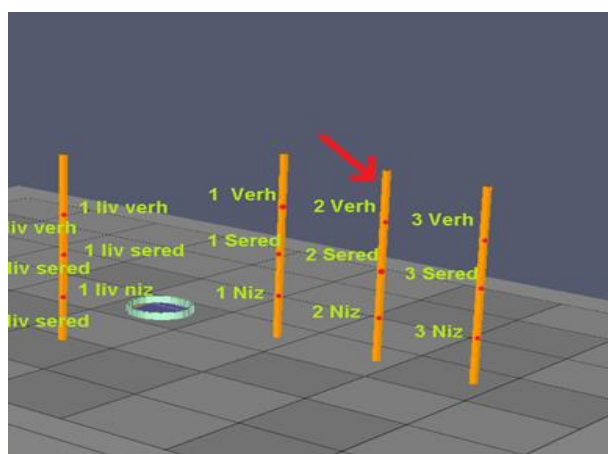


Рисунок 6.15 – аркуш 1. Дані термопар другого бруса правої сторони

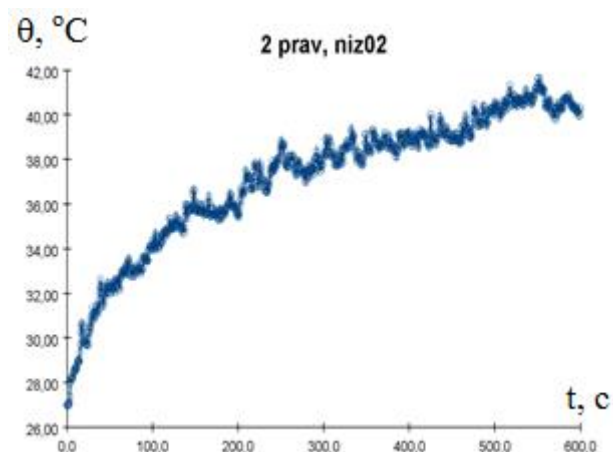
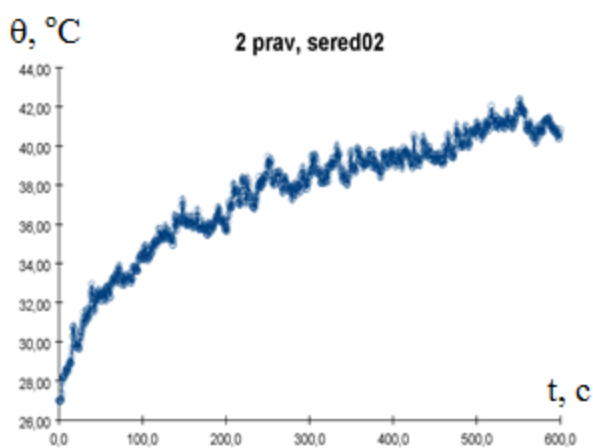


Рисунок 6.15 – аркуш 2. Дані термопар другого бруса правої сторони

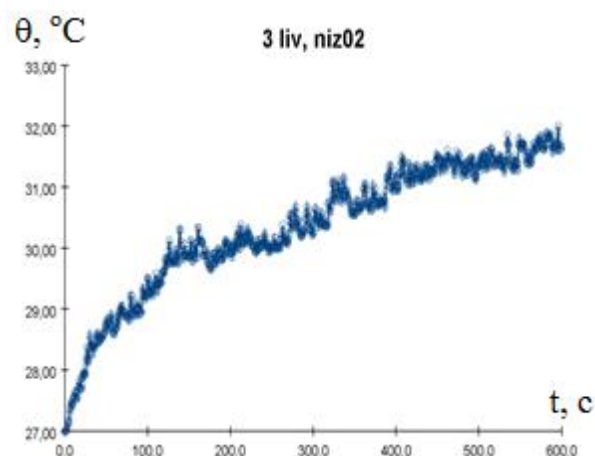
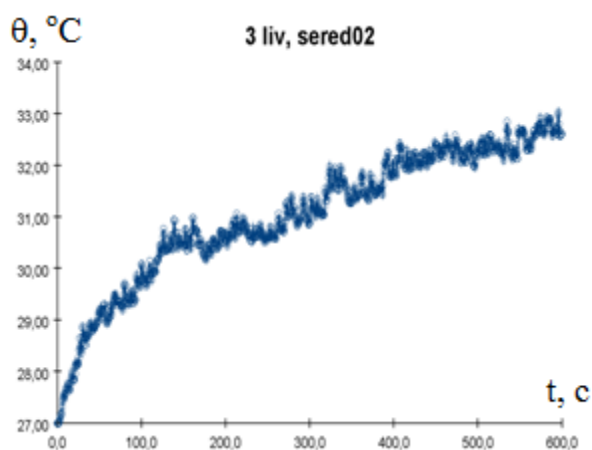
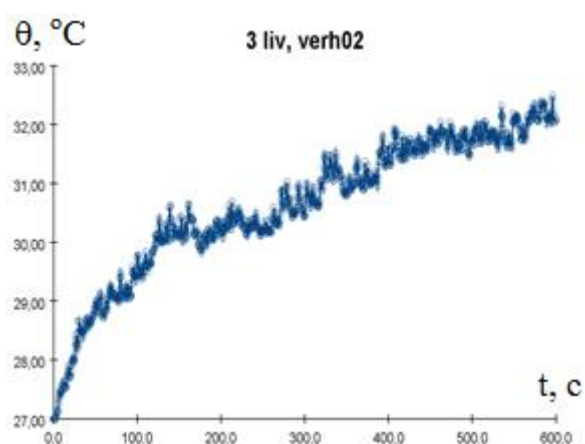
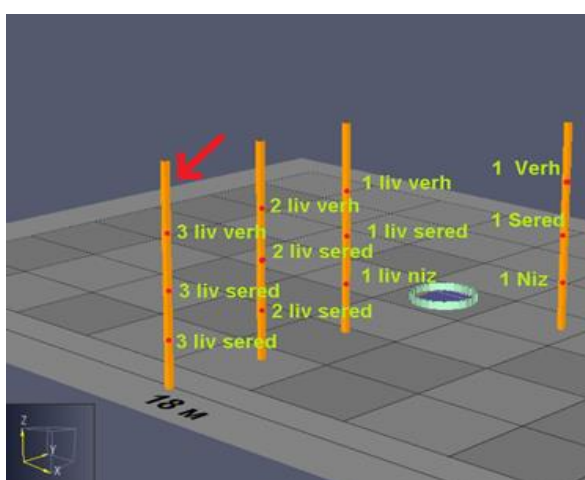


Рисунок 6.16 – Дані термопар третього бруса лівої сторони

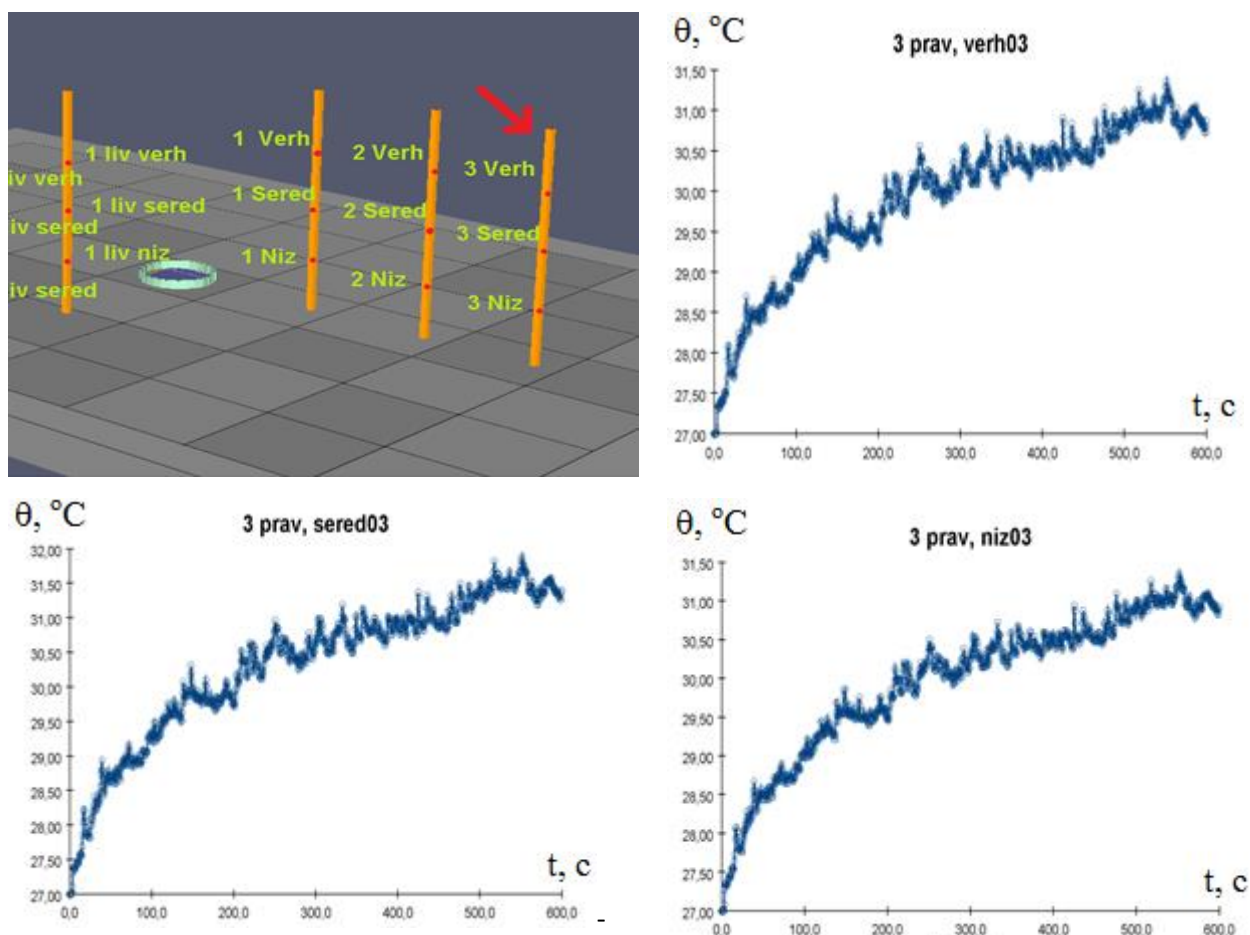


Рисунок 6.17 – Дані термопар третього бруса правої сторони

На рисунку 6.18 зображені результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень.

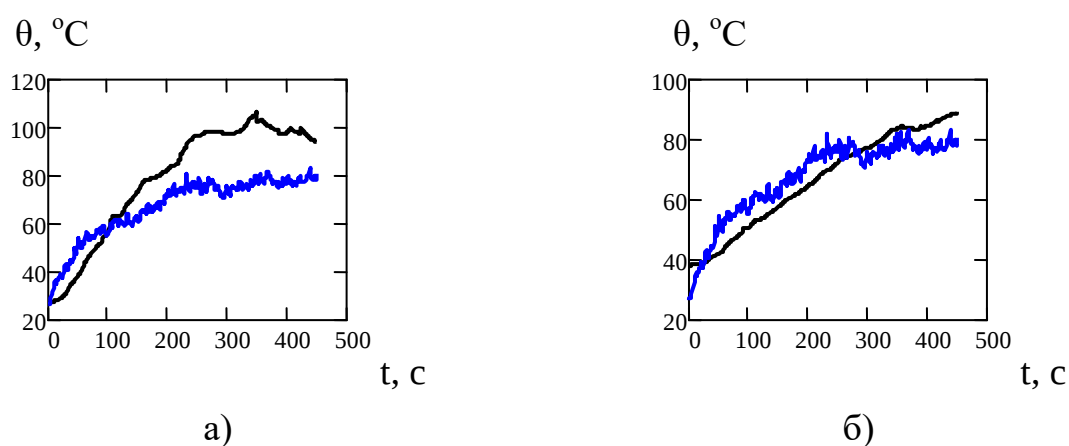


Рисунок 6.18 – аркуш 1. Результати математичного моделювання (синя залежність) у порівнянні із результатами експериментальних досліджень (чорна залежність)

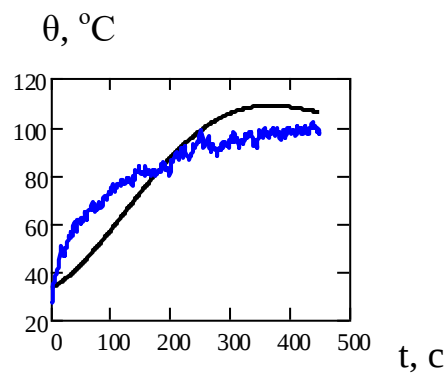
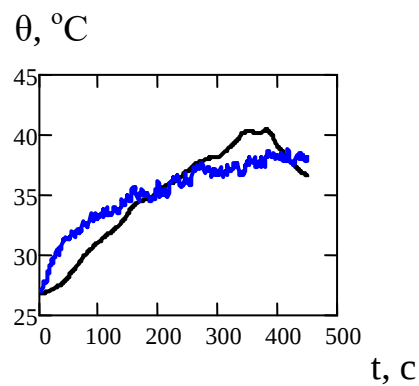
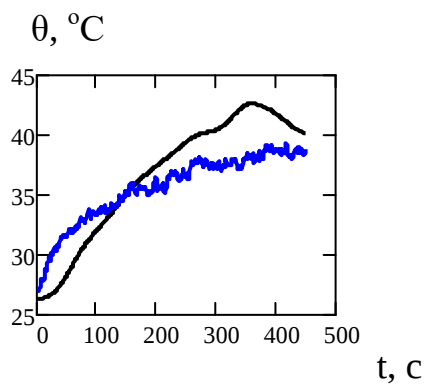
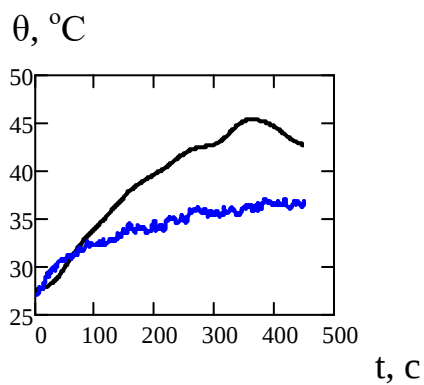
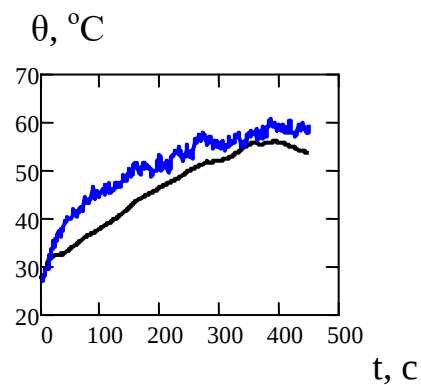
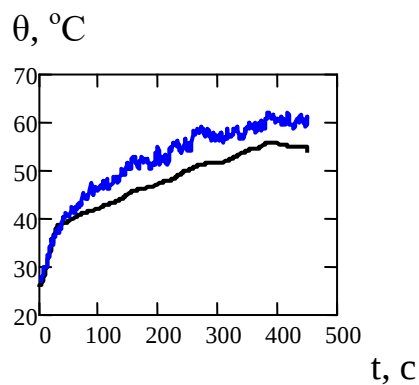
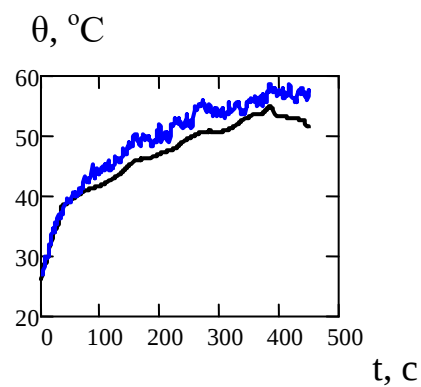
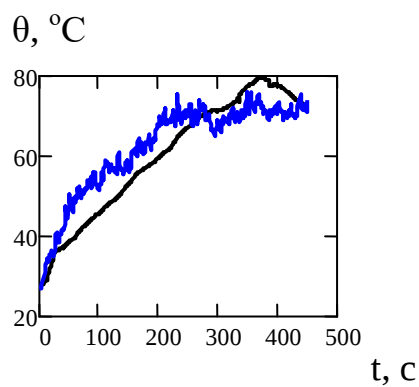


Рисунок 6.18 – аркуш 2. Результати математичного моделювання (синя залежність) у порівнянні із результатами експериментальних досліджень (чорна залежність)

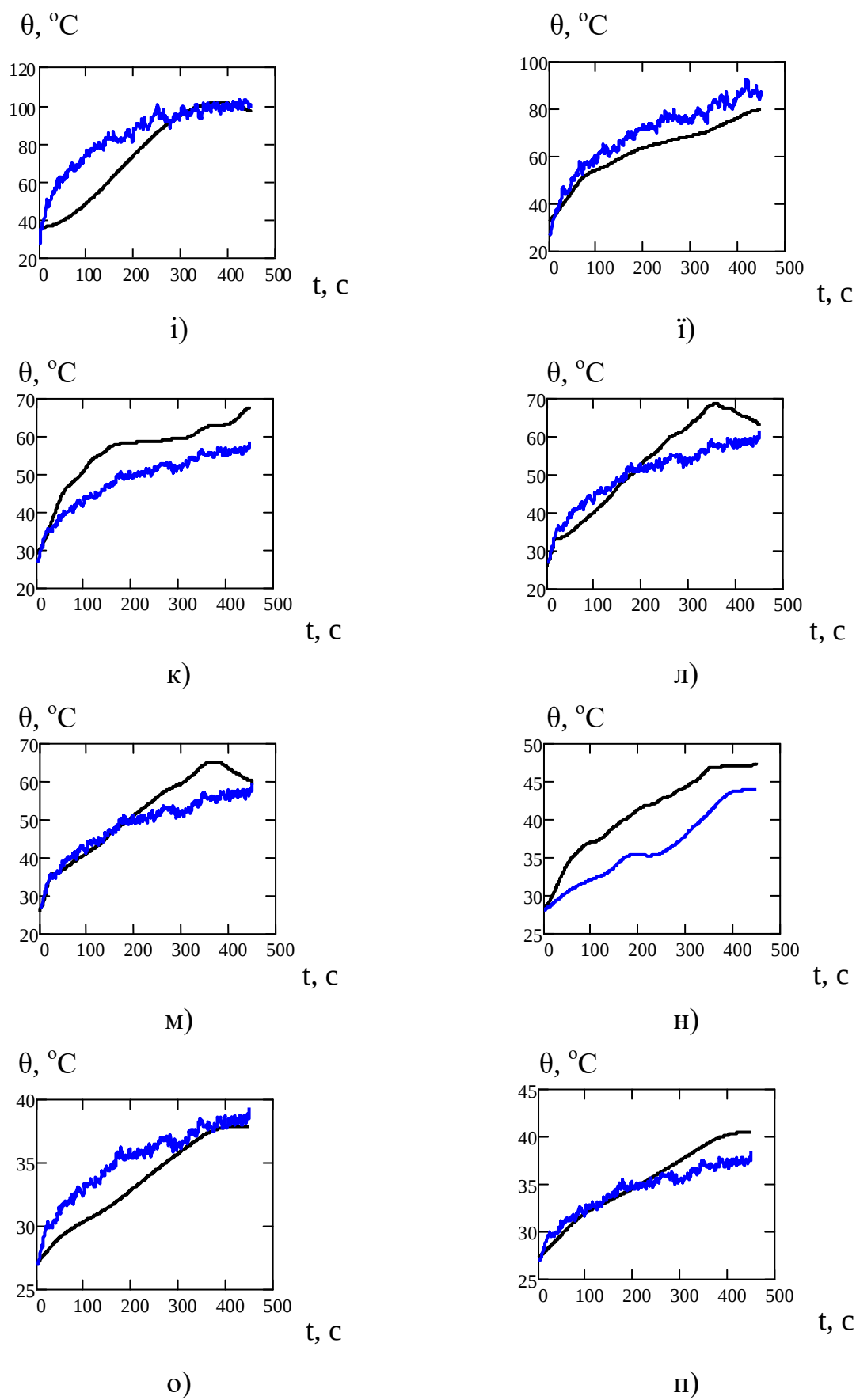


Рисунок 6.18 – аркуш 3. Результати математичного моделювання (синя залежність) у порівнянні із результатами експериментальних досліджень (чорна залежність)

Перевірку адекватності проводили за такими критеріями: абсолютні відхилення, відносні відхилення, середньоквадратичні відхилення та критерієм Фішера. Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1.

Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

| № п/п | № термопари | Абсолютне відхилення | Відносне відхилення | Середнє квадратичне відхилення | Значення критерію Фішера |
|-------|-------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1.    | T1          | 15,2                 | 19                  | 17                             | 1,9                      |
| 2.    | T2          | 6.027                | 9.755               | 6.626                          | 3                        |
| 3.    | T3          | 5.566                | 10.183              | 6.24                           | 4.63                     |
| 4.    | T4          | 3.09                 | 6.592               | 3.497                          | 2.14                     |
| 5.    | T5          | 4.868                | 10.154              | 5.175                          | 1.69                     |
| 6.    | T6          | 4.619                | 10.688              | 5.02                           | 1.42                     |
| 7.    | T7          | 7.908                | 18.046              | 8.572                          | 1.596                    |
| 8.    | T8          | 6.097                | 14.083              | 6.59                           | 1.306                    |
| 9.    | T9          | 5.802                | 13.91               | 6.065                          | 1.18                     |
| 10.   | T10         | 10,1                 | 15                  | 11                             | 1,4                      |
| 11.   | T11         | 13.244               | 14.966              | 15.815                         | 1.2                      |
| 12.   | T12         | 6.984                | 10.874              | 7.51                           | 1.1                      |
| 13.   | T13         | 9.188                | 15.597              | 9.583                          | 1.66                     |
| 14.   | T14         | 5.34                 | 9.685               | 6.219                          | 2.66                     |
| 15.   | T15         | 4.145                | 7.432               | 5.197                          | 2.97                     |
| 16.   | T16         | 4.84                 | 11.683              | 5.128                          | 2.29                     |
| 17.   | T17         | 1.64                 | 5.094               | 1.95                           | 2.34                     |
| 18.   | T18         | 1.482                | 4.16                | 1.903                          | 1.57                     |

Таким чином абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 16 °С, що відсоткових показниках не перевищує 20 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 2÷17 °С, що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту. Максимальне значення критерію Фішера становить 4,63. Для рівня статистичної значущості 5% та для кількості ступенів свободи  $k_1=4$  та  $k_2=6$  табличне значення критерію Фішера становить 9,15 [44]. Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за

табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 дані не заперечують нуль гіпотезі, тобто розбіжність між дисперсіями експериментальних досліджень та математичного моделювання можна вважати не суттєвою.

## **6.2 Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу А в споруді з негорючим фасадом**

З метою розрахунку теплового впливу від джерела теплового випромінювання, яким може бути модельне вогнище пожежі класу А на сусідні конструктивні елементи будинків та споруд в залежності від часу температурного впливу, розроблено відповідну математичну модель. При цьому, в такій моделі задана така умова, що пожежа, яка є осередком теплового випромінювання, обмежена негорючими будівельними конструкціями, а опромінювання сусіднього будинку відбувається через віконний проріз.

Під час розроблення математичної моделі використані вихідні дані згідно із методикою [292].

На першому етапі моделювання, створено графічну основу, яка відображає ситуативне розташування об'єктів, які досліджуються, на площині. Математична модель максимально наближена до фрагменту будинку [292], який являє собою двоповерхову споруду (рисунок 6.19) розмірами в плані 4,5 м х 4,5 м х 5,6 м. Приміщення першого поверху є вогневою камерою і призначене для імітування у ньому пожежної навантаги, що створює у вогневій камері продовж 30 хв температурний режим близький до стандартного температурного режиму. Відстань між підлогами першого та другого поверху складає 2,8 м. Підлогою першого поверху є залізобетонна плита завтовшки 0,3 м. Перекриттям першого поверху та покриттям покрівлі є залізобетонні плити завтовшки 0,2 м. Приміщення першого поверху має віконний проріз розміром 1,2 м × 2,4 м. Стіни фрагменту будинку виконуються з пустотілих бетонних блоків завтовшки 0,2 м.

Приміщення мають дверні прорізи. Дверний проріз другого поверху має бути відкритим. Дверний проріз першого поверху до початку досліджень закривають.

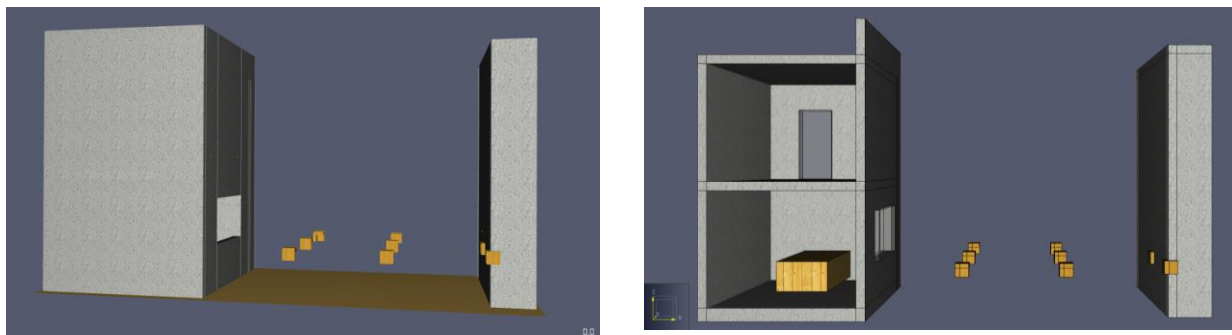


Рисунок 6.19 – Загальний вигляд математичної моделі

На рисунку 6.20 зображена математична модель дослідного зразка [303].



Рисунок 6.20 – Математична модель дослідного зразка

Для вимірювання на поверхні моделі зразка температури, встановлено вимірювач у твердій фазі, що забезпечує визначення найбільш точних даних температурного прогріву поверхні досліджуваного зразка. Для запобігання втрати тепла в наслідок теплопровідності через матеріал у властивостях поверхні задано ізольовану задню поверхню. На рисунку 6.21 наведено математичну модель із розташуванням дослідних зразків [303].

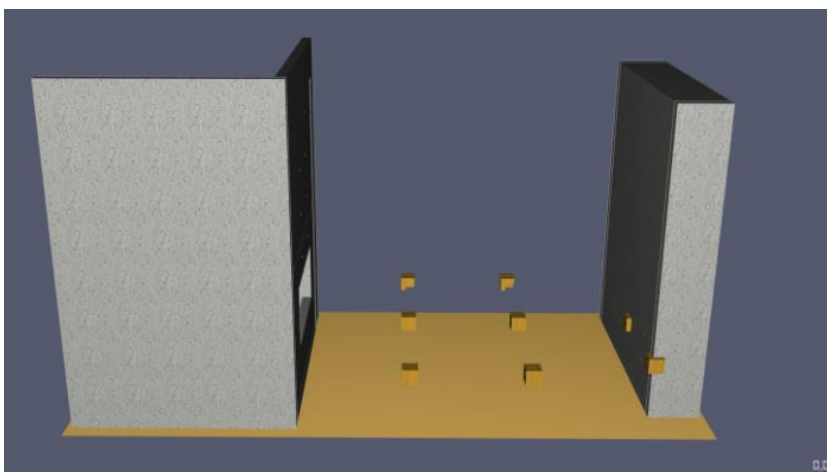


Рисунок 6.21 – Математична модель із розташуванням дослідних зразків

Наступним етапом створення математичної моделі є створення розрахункової сітки в системі якої проводитимуться розрахунки. Для досягнення оптимальної точності розрахунку прийнято використовувати комірки з кроком в 0,1 м та з одним розміром по всім трьом напрямкам (x, y, z).

FDS використовує вирішувач Пуасона, який створено на швидкому перетворенні Фур'є. Побічний ефект цього в тому, що оптимальна кількість комірок розрахункової сітки в кожному напрямку повинно мати вигляд  $2^u 3^v 5^w$  де u, v, w – цілі числа. Для можливості запуску паралельного розрахунку FDS з використанням MPI, було використано «Множинні сітки» - це означає, що розрахунковий домен складається з декількох, а саме чотирьох прямокутних сіток (рисунок 6.22). Крім того, під час вибору розміру розрахункових сіток керувалися такими критеріями як: роздільна здатність поля потоку, роздільна здатність геометрії. Загальна кількість комірок «множинних сіток» складає 485112.

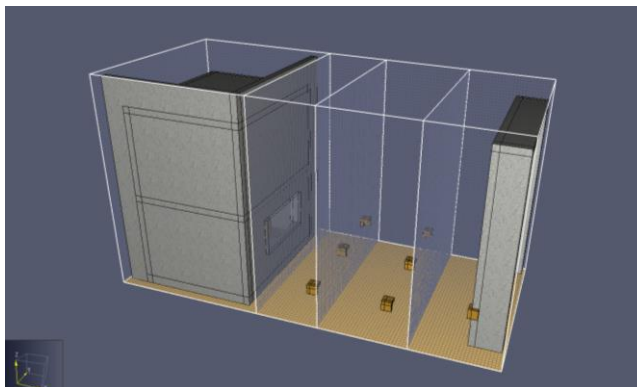


Рисунок 6.22 – Вигляд розрахункової сітки математичної моделі

Наступним етапом моделювання є створення об'єктів у відповідному масштабі. Основою всієї геометрії в FDS є перешкоди. Перешкодами є всі конструктивні елементи моделі, які створюються: стіни, підлога, перекриття, меблі тощо. Вони є прямокутними розташованими на протязі осей твердими об'єктами, що задаються точками. Кожній грані перешкоди присвоюється поверхня. В моделі використовувалися лише «Тверді перешкоди» - ті які мають хоча б одну комірку товщини сітки в кожному напрямку, так як теплопередачу FDS розраховує лише таких перешкод. Для кожного об'єкту в моделі присвоєно необхідну для нього поверхню. Дверні та віконні прорізи являють собою від'ємні області в перешкодах.

Моделювання горіння створювалось в три етапи: створення реакції горіння в газовій фазі, створення поверхні типу «пальник», створення об'єкту з присвоюванням йому створеної поверхні.

Для створення пожежного навантаження у вогневій камері встановлено вогневе навантаження у вигляді штабеля брусків із деревини. Зовнішні розміри штабелю складають: 1,2 м завширшки, 2,5 м завдовжки та 0,7 м заввишки. Штабель розташовано симетрично відносно центру прорізу вікна та зміщений у бік вікна. Штабель встановлено на висоті 0,2 м над рівнем підлоги. Для моделювання пожежного навантаження у вигляді штабелю брусків деревини використовувалась тверда перешкода з поверхнею «Штабель деревини; хвойний і листяний ліс» з типом поверхні «багатошаровий».

Параметри пожежного навантаження «Штабель деревини; хвойний і листяний ліс»:

- питоме тепловиділення складає  $200 \text{ кВт/м}^2$ ;
- нижня теплота згоряння  $13800,0 \text{ кДж/кг}$ ;
- лінійна швидкість полум'я  $0,0585 \text{ м/с}$ ;
- питома масова швидкість вигорання  $0,01450 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ;
- димоутворювальна здатність  $57,00 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ ;
- споживання кисню ( $\text{O}_2$ )  $-1,1500 \text{ кг/кг}$ ;
- температура займання  $250^\circ\text{C}$ .

Виділення газу:

- вуглекислий ( $\text{CO}_2$ )  $1,57000 \text{ кг/кг}$ ;
- чадний ( $\text{CO}$ )  $0,02400 \text{ кг/кг}$ ;
- хлористий водень ( $\text{HCl}$ )  $0,00000$ .

Для підпалювання штабелю застосовуються два дека з дизельним паливом розміром  $(1800 \pm 20 \text{ мм}) \times (160 \pm 5 \text{ мм}) \times (60 \pm 5 \text{ мм})$ , які розташовуються під штабелем.

Для моделювання дек використовувалась тверда перешкода і на її межі задавалася гранична умова VENT з поверхнею «Дизельне паливо, солярка» і типом поверхні «пальник».

Параметри джерела пожежі «Дизельне паливо, солярка»:

- питоме тепловиділення складає  $1907 \text{ кВт/м}^2$ ;
- нижня теплота згоряння  $45400,0 \text{ кДж/кг}$ ;
- лінійна швидкість полум'я  $0,4 \text{ м/с}$ ;
- питома масова швидкість вигорання  $0,042 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ;
- димоутворювальна здатність  $620,10 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ ;
- споживання кисню ( $\text{O}_2$ )  $-3,3680 \text{ кг/кг}$ .

Виділення газу:

- вуглекислий ( $\text{CO}_2$ )  $3,16300 \text{ кг/кг}$ ;
- чадний ( $\text{CO}$ )  $0,12200 \text{ кг/кг}$ ;
- хлористий водень ( $\text{HCl}$ )  $0,00000$ .

На рисунку 6.23 [303] наведено вигляд математичної моделі із пожежним навантаженням

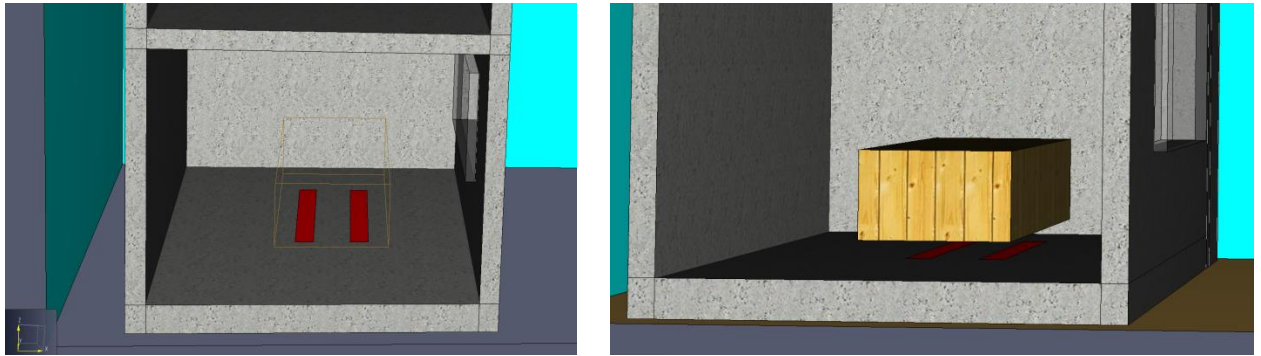


Рисунок 6.23 – Вигляд математичної моделі із пожежним навантаженням

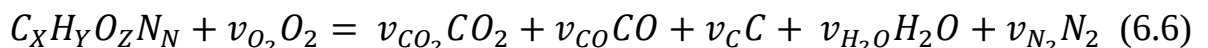
Максимальна питома швидкість тепловиділення, яка задавалась в поверхнях «Дизельне паливо, солярка» та «Штабель деревини; хвойний і листяний ліс» визначається за формулою:

$$HRRPUA = H_f \Psi_{\text{пит}} \quad (6.5)$$

де  $H_f$  - нижня теплота згоряння;

$\Psi_{\text{пит}}$  - питома масова швидкість вигорання.

В моделюванні використовувалась реакція з простою стехіометрією, яка має наступний вигляд:



В програмі необхідно задати значення  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $N$ , а також  $Y_{CO}$  та  $Y_S$  - доля пального, яка йде на утворення, відповідно, чадного газу та сажі.

Приймаємо, що дим повністю складається з вуглецю. В українських джерелах дані по виділенню азоту та його похідних відсутні, тому приймаємо, що вміст азоту в пальному дорівнює нулю,  $N=0$ .

Параметр  $Y_{CO}$  - доля палива, яке йде на утворення чадного газу аналогічна за змістом  $L_{CO}$ ,  $Y_{CO} = L_{CO}$ . Параметр  $Y_S$  отримується з димоутворювальної здатності матеріалу за формулою [233]:

$$Y_S = \frac{D_m}{K_m} = L_C \quad (6.7)$$

де  $K_m$  - коефіцієнт світлового поглинання, дорівнює  $8700 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,

$D_m$  - середньозважена димоутворювальна здатність пожежного навантаження, дорівнює  $620 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ .

Параметри  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  отримано наступним чином з рівнянь реакції (6.8) [233]:

$$\begin{aligned} L_{H_2O} &= 1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C \\ X &= v_{CO_2} + v_{CO} + v_C = \left( \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{L_C}{M_C} \right) M_f \\ &= \left( \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{D_m}{K_m * M_C} \right) M_f \\ Y &= 2v_{H_2O} = 2 \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C) M_f}{M_{H_2O}} \\ Z &= 2v_{CO_2} + v_{H_2O} + v_{CO} - 2v_{O_2} = \\ &= \left( 2 \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C)}{M_{H_2O}} - 2 \frac{L_{O_2}}{M_{O_2}} \right) M_f \end{aligned} \quad (6.8)$$

Молярна маса палива становить  $M_f = 203,6 \text{ г/моль}$ .

Виходячи з вище наведеного отримуємо склад реакції:

$X$  (атоми вуглецю)  $16,8 \text{ кг/кг}$ ;

$Y$  (атоми водню)  $22,8 \text{ кг/кг}$ ;

$Z$  (атоми кисню)  $0,0 \text{ кг/кг}$ ;

$N$  (атоми азоту)  $0,0 \text{ кг/кг}$ ;

Виділення  $CO$  ( $Y_{CO}$ )  $0,122 \text{ кг/кг}$ ;

Виділення сажі ( $Y_S$ )  $0,071 \text{ кг/кг}$ ;

Доля водню  $0,0$ .

Для моделювання зв'язку з атмосферою використовувалась гранична умова VENT розташована на зовнішніх межах розрахункових сіток із

заданою поверхнею OPEN, дана поверхня являє собою пасивний отвір в навколишнє середовище.

Для моделювання поверхонь, виконаних з теплопровідного матеріалу або палива, необхідно задати матеріали, що описують теплові властивості та піролітичну поведінку.

Параметри матеріалів які використовувались для моделювання:

Бетон:

Густина 2280,0 кг/м<sup>3</sup>;

Питома теплоємність 1,04 кДж/(кг·К);

Провідність 1,8 Вт/(м·К).

Гіпс:

Густина 930,0 кг/м<sup>3</sup>;

Питома теплоємність 1,09 кДж/(кг·К);

Провідність 0,17 Вт/(м·К).

Деревина (сосна):

Густина 640,0 кг/м<sup>3</sup>;

Питома теплоємність 2,85 кДж/(кг·К);

Провідність 0,14 Вт/(м·К).

Коефіцієнт випромінювання матеріалів приймався відповідно до [50].

Поверхні використовуються для задавання властивостей твердих властивостей твердих об'єктів та вентиляційних отворів в моделі FDS.

Для проведення моделювання створено поверхні для стін та перекриттів, підлоги, пожежного навантаження у вигляді штабелю брусків деревини, дек з дизельним паливом та зразків.

Стіна (багатошаровий тип поверхні):

- товщина 0,2 м;
- складовий матеріал 0,25 гіпс / 0,75 бетон;
- реакція визначається матеріалом;
- властивості поверхні: задня поверхня відкрита;

- початкова внутрішня температура ТМРА (температура навколишнього середовища).

Підлога (багатошаровий тип поверхні):

- товщина 0,3 м;
- складовий матеріал 0,08 гіпс / 0,92 бетон;
- реакція визначається матеріалом;
- властивості поверхні: задня поверхня ізольована;

- початкова внутрішня температура ТМРА (температура навколишнього середовища).

Пожежне навантаження у вигляді штабелю брусків деревини (багатошаровий тип поверхні):

- товщина бруса 0,04 м;
- складовий матеріал 1,0 сосна;
- питоме тепловиділення 200 кВт/м<sup>2</sup>;
- температура займання 250°C;
- властивості поверхні: задня поверхня відкрита;

- початкова внутрішня температура ТМРА (температура навколишнього середовища).

Зразок (багатошаровий тип поверхні):

- товщина 0,05 м;
- складовий матеріал 1,0 сосна;
- реакція визначається матеріалом;
- властивості поверхні: задня поверхня ізольована;

- початкова внутрішня температура ТМРА (температура навколишнього середовища).

Дека з дизельним паливом (тип поверхні «пальник»), властивості даної поверхні відносяться безпосередньо до моделювання пожежі.

Для обліку даних щодо параметрів температури в газовому середовищі (вогнева камера, температура повітря за її межами) встановлені вимірювачі в газовій фазі. Для вимірювання температури безпосередньо на зразках,

використовувались вимірювачі в твердій фазі, їх розташування описано в розділі Топологія моделі (рисунки 6.24 – 6.26) [303].

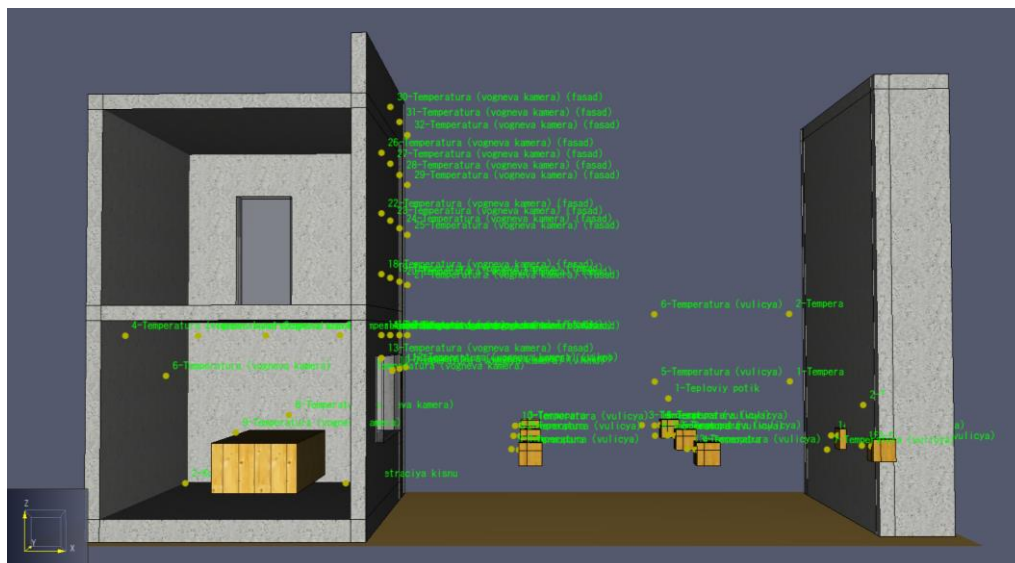


Рисунок 6.24 – Розташування датчиків у математичній моделі

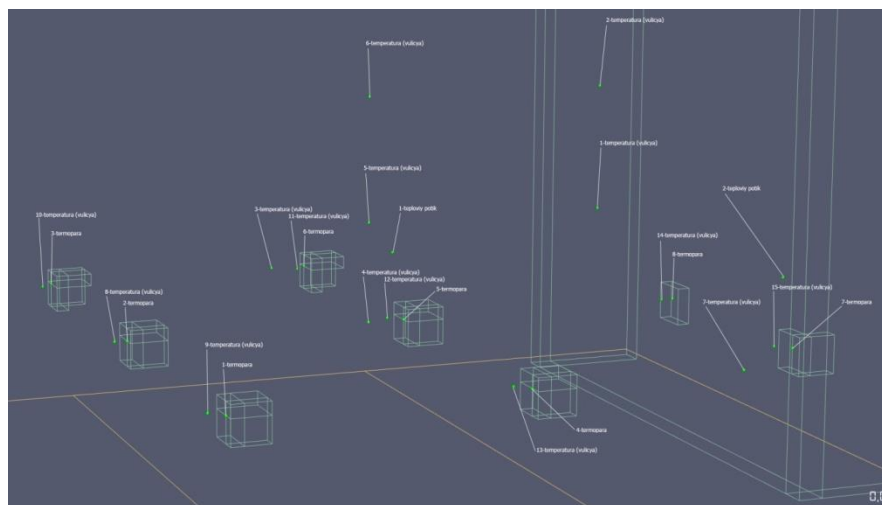


Рисунок 6.25 – Розташування датчиків у математичній моделі досліджуваних зразків

Датчик являє собою контрольну точку вимірювання температури та теплового потоку. Також для більшої інформативності та розширення властивостей датчиків використано статистику середнього значення температури у вогневій камері, ці дані також представлені на графіках разом з даними вимірювачів.

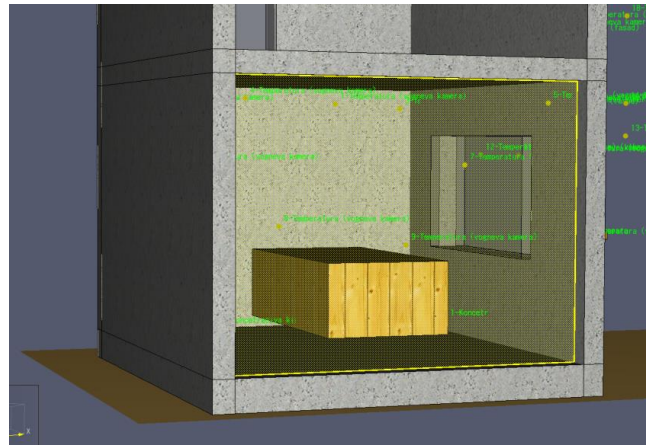


Рисунок 6.26 – Межі вимірювання середніх статистичних даних у вогневій камері

Заключним етапом розрахунку є програмування загальних параметрів, а саме необхідну тривалість моделювання, параметри навколишнього середовища, визначення граничних величин, які необхідно додатково визначити під час розрахунку.

Відповідно до [292], тривалість експериментальних досліджень складає 30 хвилин. Таким чином загальний час моделювання задано 1800 секунд.

За результатом розрахунку отримано наступні результати:

Загальна візуалізація температури із відображенням температурних полів в площинах наведена на рисунках 6.27 – 6.33 [303].

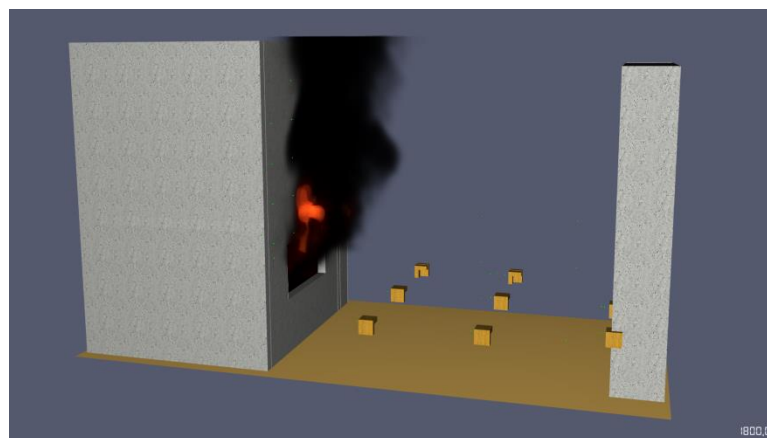


Рисунок 6.27 – Динаміка розвитку пожежі через 1800 с

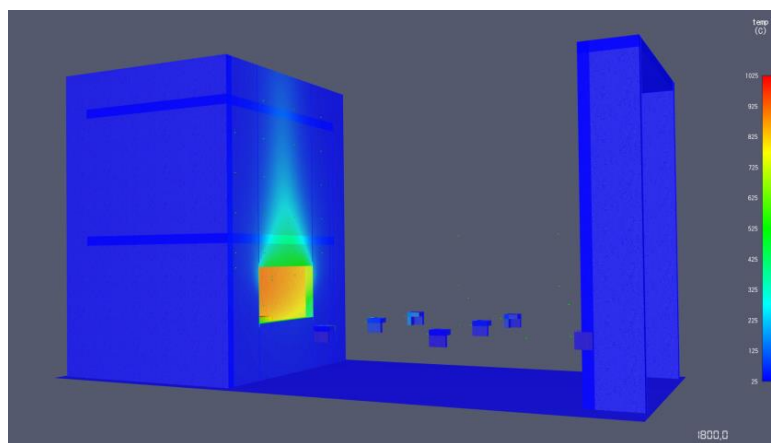


Рисунок 6.28 – Температура конструкції через 600 с

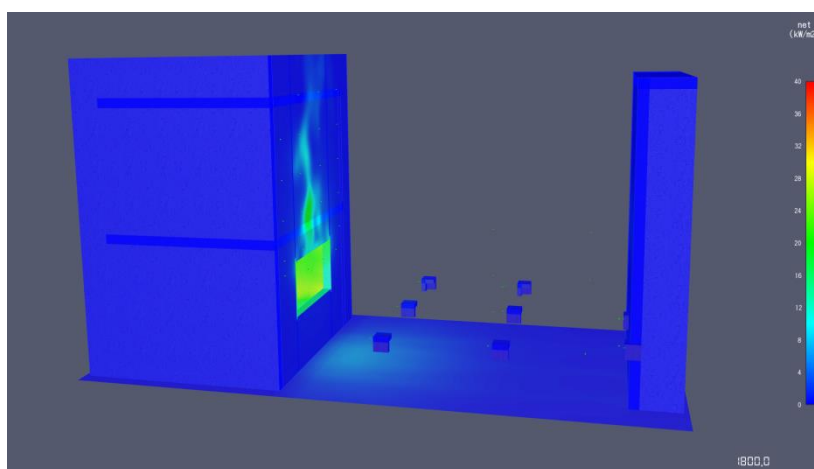


Рисунок 6.29 – Візуалізація теплового потоку через 1200 с

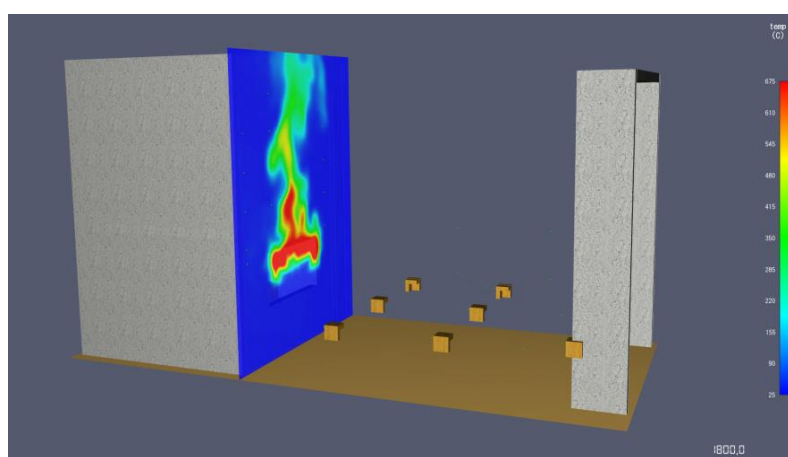


Рисунок 6.30 – Вертикальний розподіл температури повітря через 1800 с

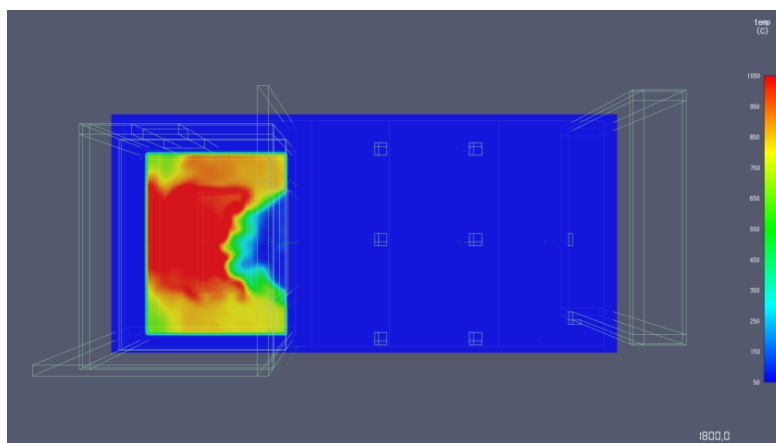


Рисунок 6.31 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 1,2 м через 1800 с

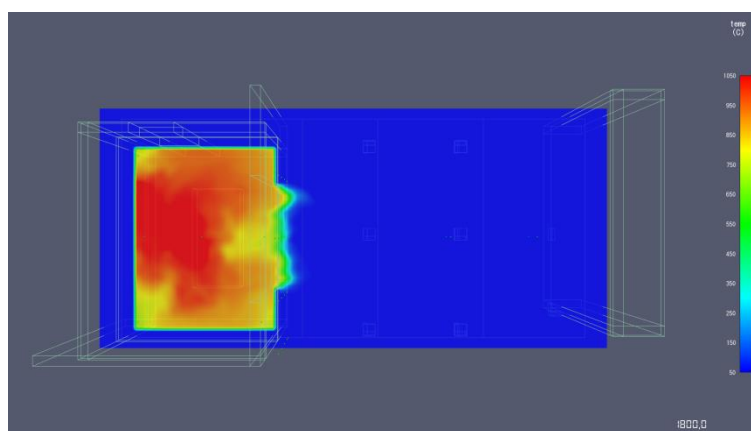


Рисунок 6.32 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 2 м через 1800 с

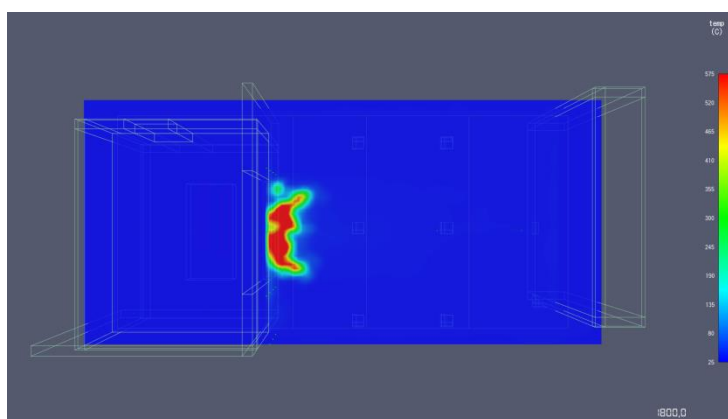


Рисунок 6.33 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 3 м через 1800 с

На рисунку 6.34 показано динаміку тепловиділення пожежі (heat release rate - HRR).

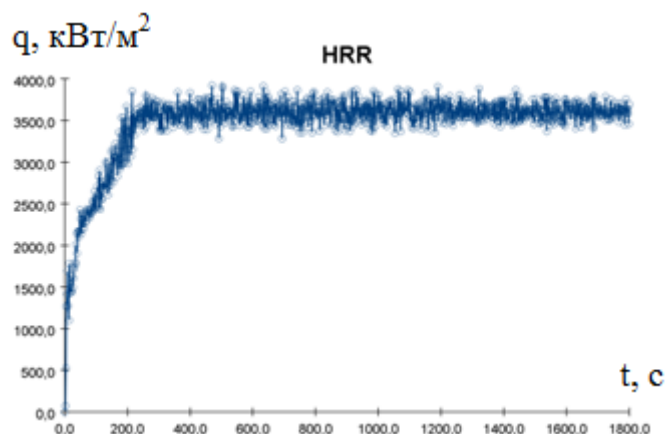


Рисунок 6.34 – Динаміка тепловиділення пожежі

Залежності нижче (рисунок 6.35) показують, параметри температури на вимірювачах продовж часу моделювання [303].

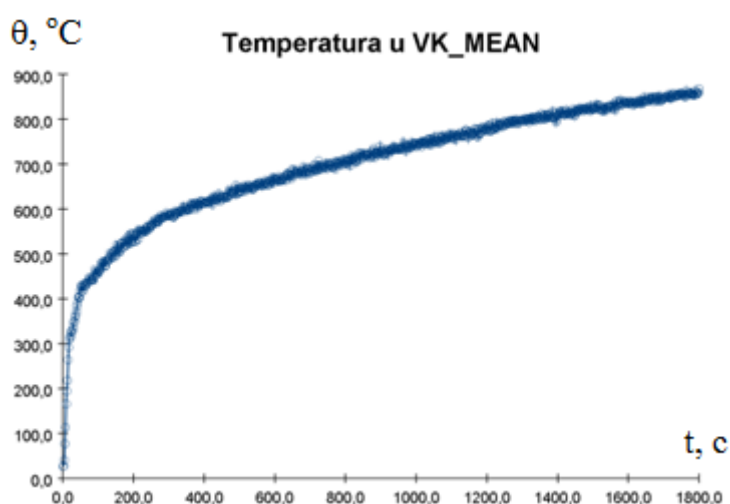


Рисунок 6.35 – Залежність температури повітря від часу в об'ємі вогневої камери

На рисунку 6.36 зображені результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень.

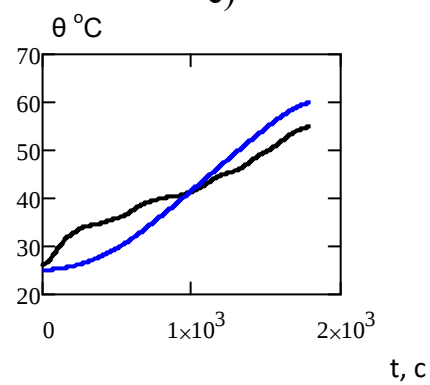
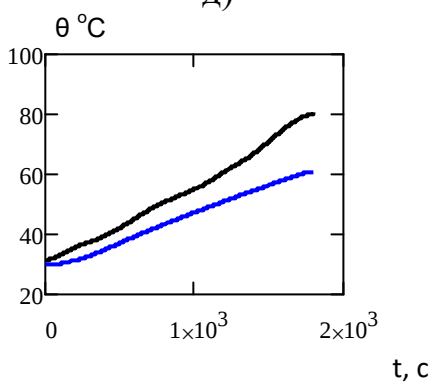
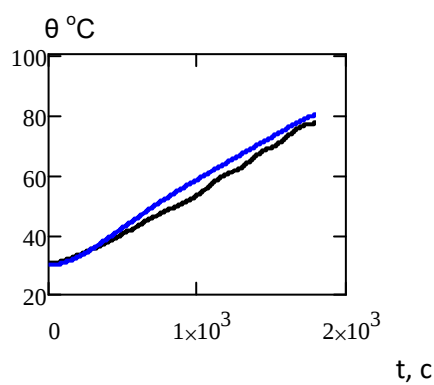
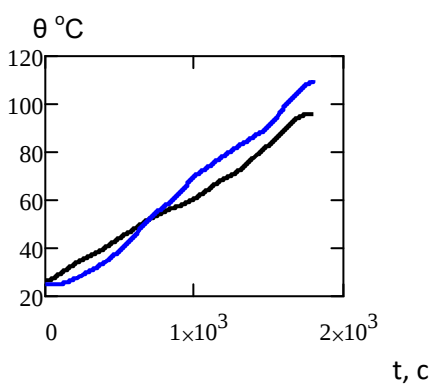
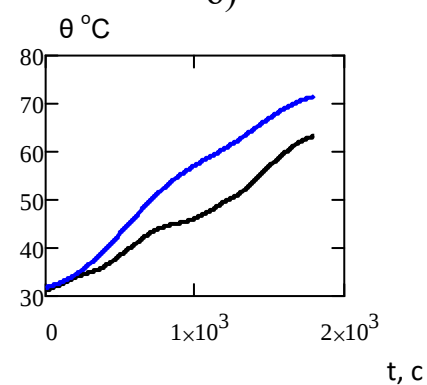
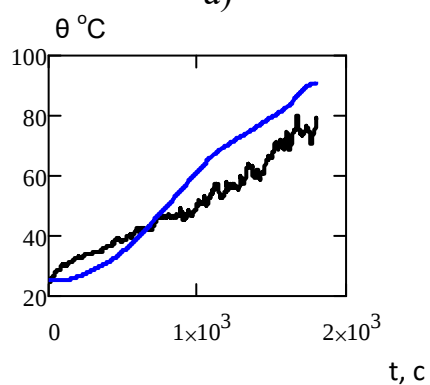
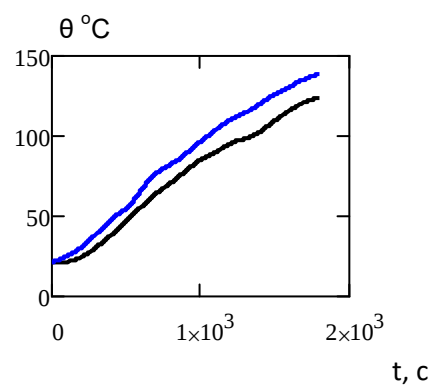
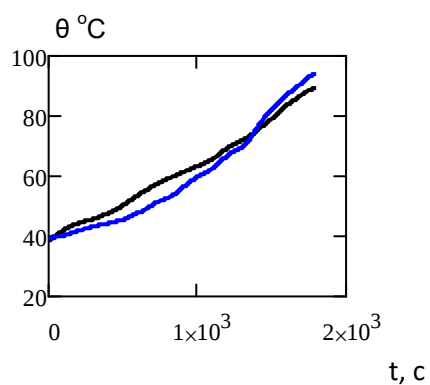


Рисунок 6.36 – Результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень

Перевірку адекватності проводили за такими критеріями: абсолютні відхилення, відносні відхилення, середньоквадратичні відхилення та критерієм Фішера [304]. Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі приведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2.

Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

| № п/п | № термопар | Абсолютне відхилення | Відносне відхилення | Середнє квадратичне відхилення | Значення критерію Фішера |
|-------|------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1     | T1         | 3.608                | 6.03                | 3.945                          | 5.08                     |
| 2     | T2         | 11.516               | 16.854              | 12.238                         | 1.51                     |
| 3     | T3         | 8.703                | 16.712              | 10.081                         | 1.34                     |
| 4.    | T4         | 7.54                 | 15.507              | 8.484                          | 3.37                     |
| 5     | T5         | 6.762                | 11.492              | 7.545                          | 1.77                     |
| 6.    | T6         | 2.871                | 5.382               | 3.284                          | 1.05                     |
| 7.    | T7         | 8.815                | 15.125              | 10.137                         | 2.56                     |
| 8.    | T8         | 4.465                | 11.269              | 4.979                          | 4.63                     |

Таким чином абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 12 °С, що відсоткових показниках не перевищує 17 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах 4÷13 °С, що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту. Максимальне значення критерію Фішера становить 5.08. Для рівня статистичної значущості 5% та для кількості ступенів свободи  $k_1=2$  та  $k_2=4$  табличне значення критерію Фішера становить 6.94 [290]. Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, то із статистичною ймовірністю 0,95 дані не заперечують нуль гіпотезі, тобто розбіжність між дисперсіями експериментальних досліджень та математичного моделювання можна вважати не суттєвою.

### 6.3 Оцінка адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу А в споруді з горючим фасадом

Відповідно до алгоритму дій запропонованого в розділі 6.2 здійснено оцінку адекватності математичної моделі теплообміну під час пожежі класу А в споруді з горючим фасадом.

Під час розроблення математичної моделі вихідні дані використані згідно із методикою [292].

Загальний вид створеної математичної моделі зображено на рисунку 6.37.

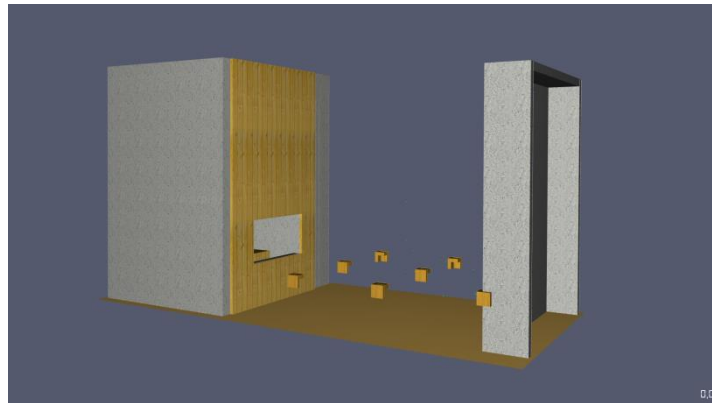


Рисунок 6.37 – Загальний вигляд математичної моделі

Вимірювання температури поверхні моделі зразка здійснено за допомогою встановлених віртуальних датчиків. На рисунку 6.38 наведено математичну модель із розташуванням дослідних зразків.



Рисунок 6.38 – Математична модель із розташуванням дослідних зразків

На наступному етапі створення математичної моделі створено розрахункову сітку в системі якої проводяться розрахунки.

Кількість комірок «множинних сіток», що створено складає 485112 (рисунок 6.39).

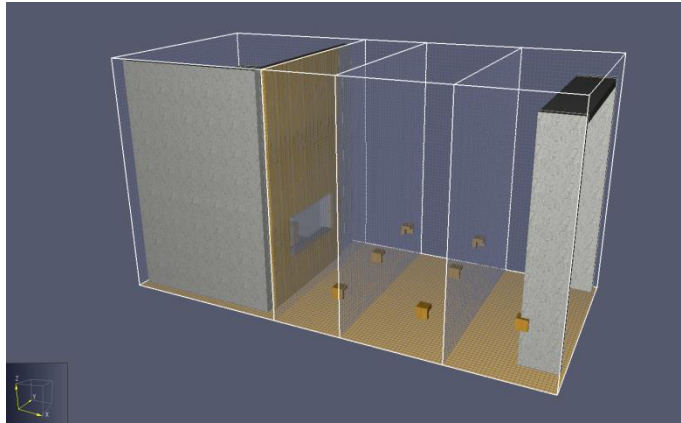


Рисунок 6.39 – Вигляд розрахункової сітки математичної моделі

Створення об'єктів у відповідному масштабі є наступним етапом моделювання.

Пожежне навантаження у вогневій камері взято аналогічне як в розділі 6.2 даної роботи.

Параметри пожежного навантаження «Штабель деревини; хвойний і листяний ліс»:

- питоме тепловиділення складає  $78 \text{ кВт/м}^2$ ;
- нижня теплота згоряння  $13800,0 \text{ кДж/кг}$ ;
- лінійна швидкість полум'я  $0,0585 \text{ м/с}$ ;
- питома масова швидкість вигорання  $0,00630 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$ ;
- димоутворювальна здатність  $61,00 \text{ Нп} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$ ;
- споживання кисню ( $\text{O}_2$ )  $-1,1500 \text{ кг/кг}$ ;
- температура займання  $250^\circ\text{C}$ .

Параметри, що закладалися в математичну модель по дизельному паливу та використаних матеріалів взято аналогічно розділу 6.2 даної роботи.

Кінцевим етапом моделювання є програмування загальних параметрів, а саме необхідну тривалість моделювання, параметри навколишнього середовища [305], визначення граничних величин, які необхідно додатково визначити під час розрахунку.

Загальний час моделювання задано 60 хвилин.

В ході проведених розрахунків отримано такі результати:

Загальна візуалізація температури із відображенням температурних полів в площинах наведена на рисунках 6.40 – 6.46.

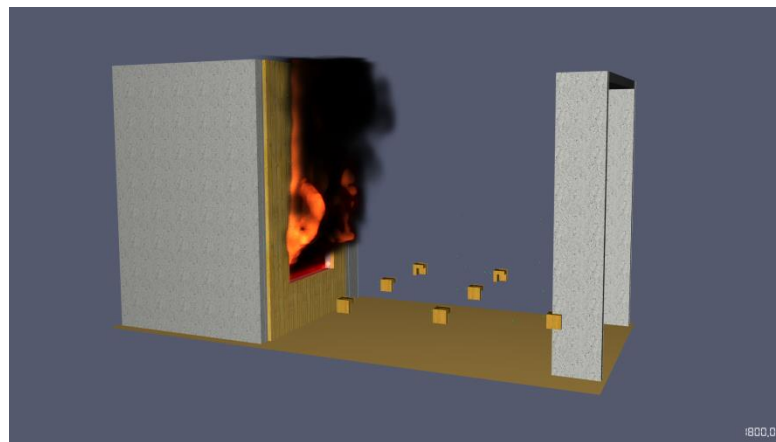


Рисунок 6.40 – Динаміка розвитку пожежі через 60 хв

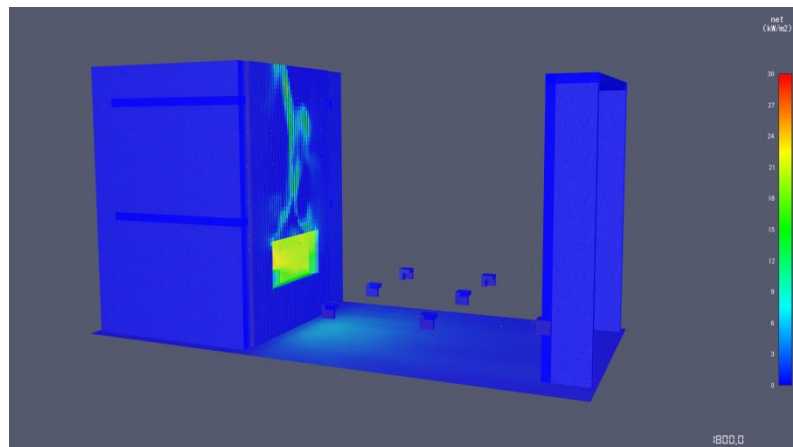


Рисунок 6.41 – Температура конструкції через 10 хв

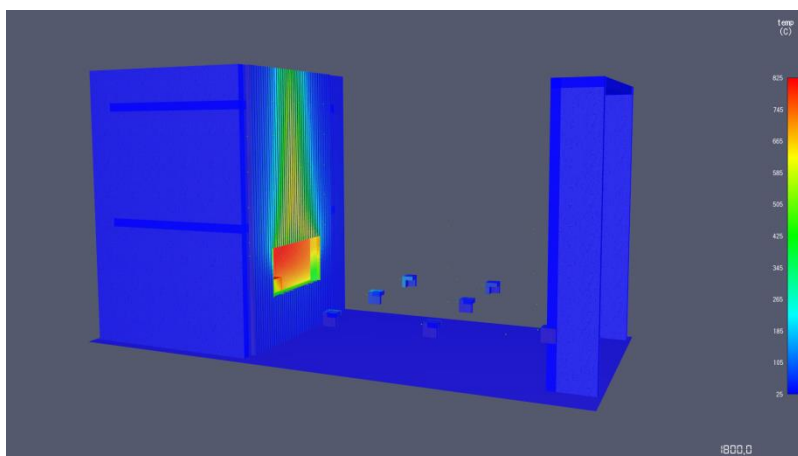


Рисунок 6.42 – Візуалізація теплового потоку через 30 хв

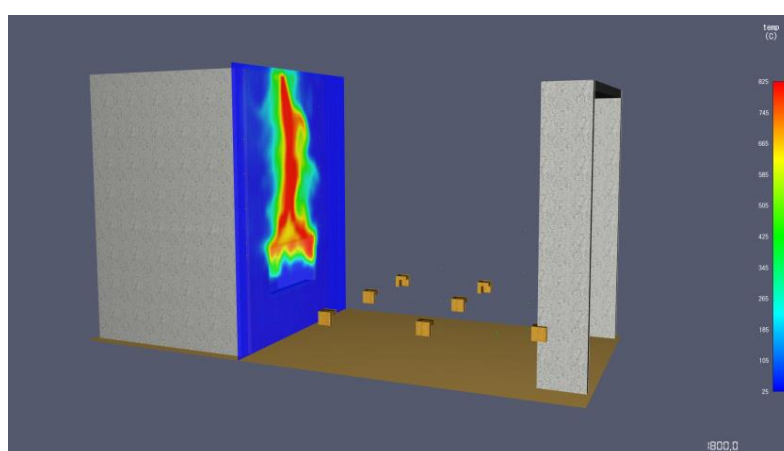


Рисунок 6.43 – Вертикальний розподіл температури повітря через 45 хв

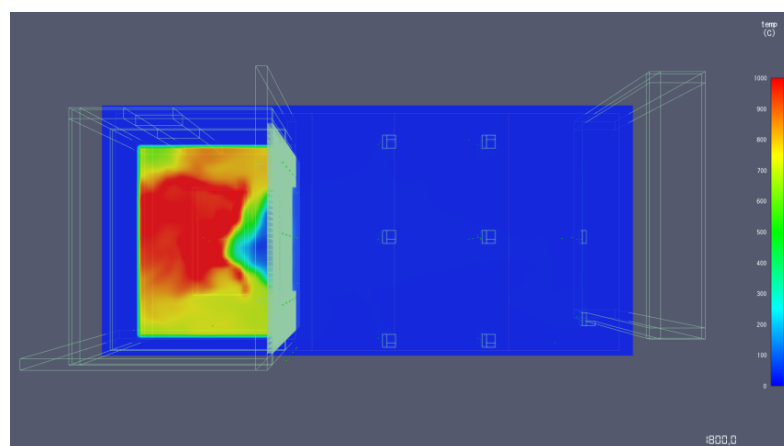


Рисунок 6.44 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 1,2 м через 60 хв

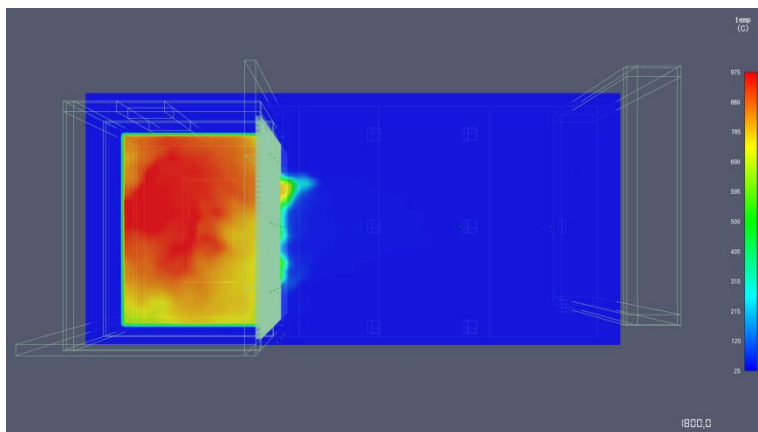


Рисунок 6.45 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 2 м через 60 хв

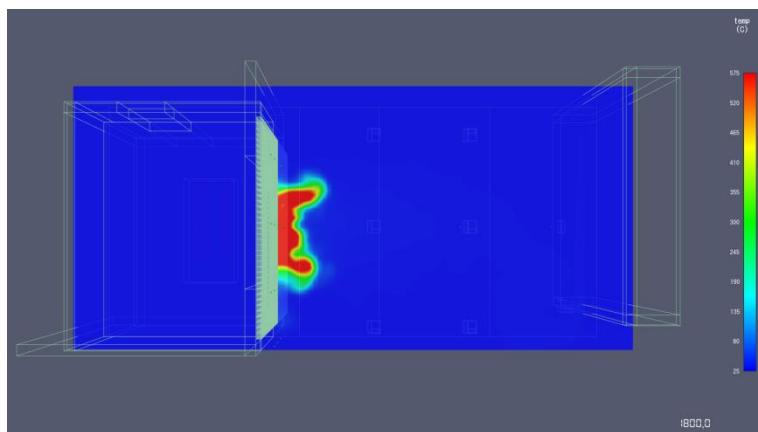


Рисунок 6.46 – Горизонтальний розподіл температури повітря на висоті 3 м через 60 хв

На рисунку 6.47 показано динаміку тепловиділення пожежі.

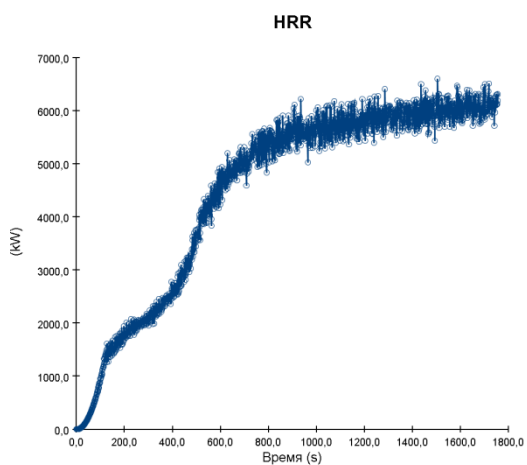


Рисунок 6.47 –Динаміка тепловиділення пожежі

На рисунку 6.48 показано параметри температури на вимірювачах продовж часу моделювання.

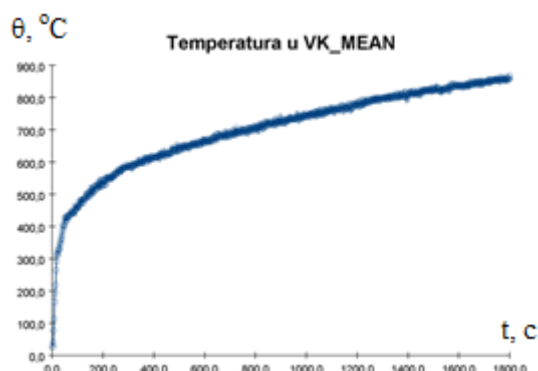


Рисунок 6.48 – Залежність температури повітря від часу в об'ємі вогневої камери

На рисунку 6.49 зображені результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень.

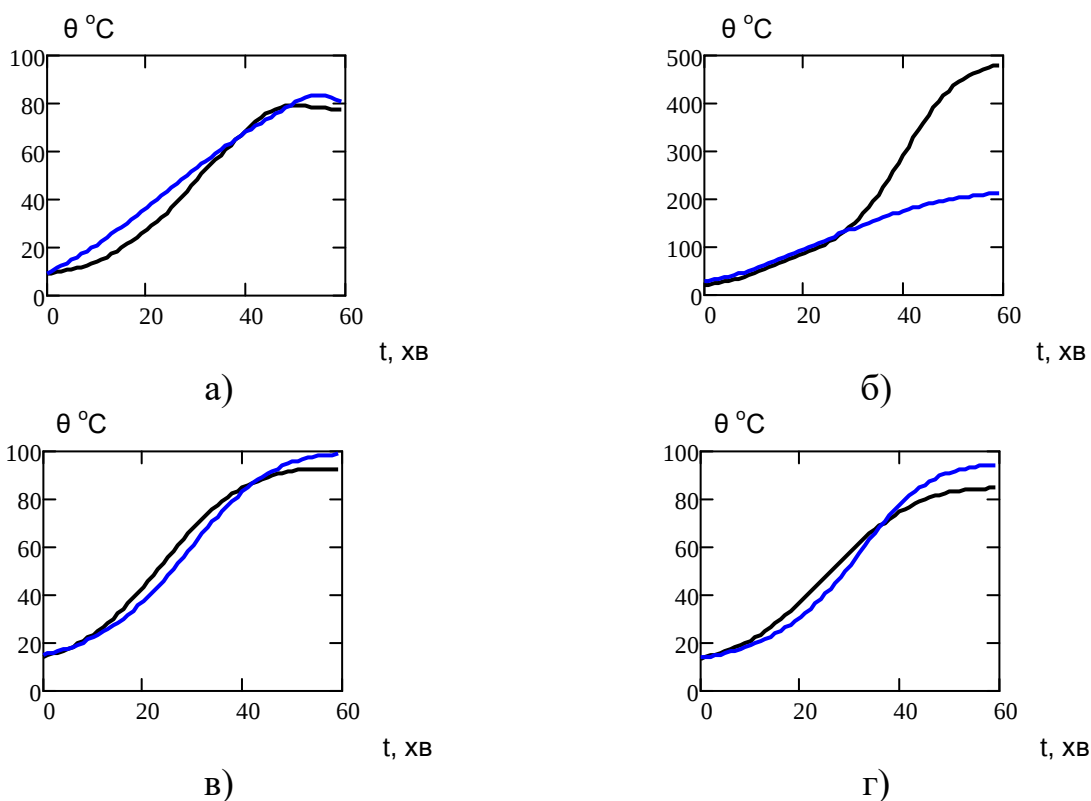
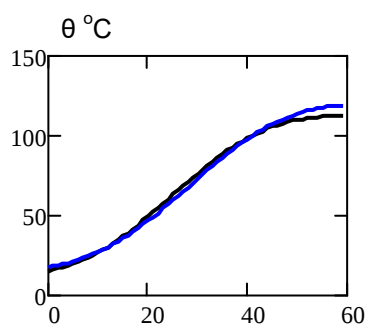
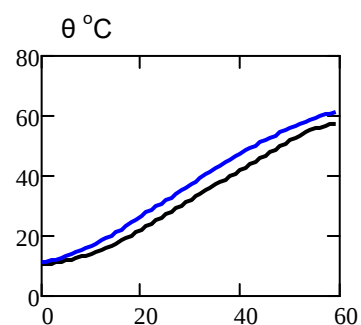


Рисунок 6.49 – аркуш 1. Результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень



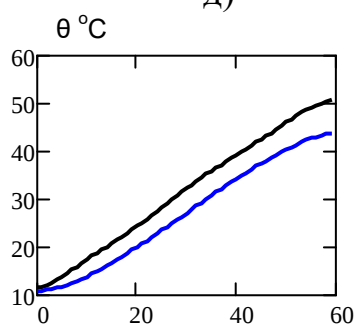
t, хв

д)



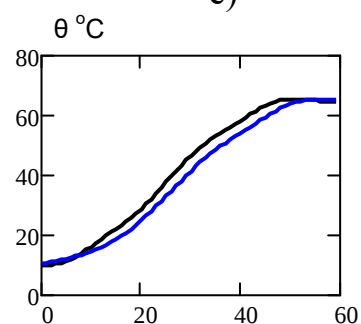
t, хв

е)



t, хв

є)



t, хв

ж)

Рисунок 6.49 – аркуш 2. Результати математичного моделювання у порівнянні із результатами експериментальних досліджень

Перевірку адекватності здійснено за такими критеріями: абсолютні відхилення, відносні відхилення, середньоквадратичні відхилення. Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі приведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі

| №  | № термопар | Абсолютне відхилення | Відносне відхилення | Середнє квадратичне відхилення |
|----|------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|
| 1  | T1         | 4.853                | 18.581              | 5.722                          |
| 3  | T3         | 4.863                | 10.004              | 6.285                          |
| 4. | T4         | 6.468                | 12.932              | 7.599                          |
| 5  | T5         | 3.738                | 8.431               | 4.62                           |
| 6. | T6         | 4.00                 | 13.744              | 4.297                          |
| 7. | T7         | 4.533                | 14.641              | 4.837                          |
| 8. | T8         | 3.154                | 9.589               | 3.586                          |

Таким чином абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання та усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 7 °С, що відсоткових показниках не перевищує 20 %, середньоквадратичні відхилення становлять в межах  $3 \div 8$  °С, що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту.

#### **6.4 Висновки за розділом**

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. З використанням обґрунтованого набору моделей газогідродинаміки та з використанням програмного забезпечення FDS проведений чисельний експеримент, що імітує процес проведення випробування з модельним вогнищем пожежі класу 55 В та фрагментом будинку із горючим та негорючим фасадами і показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 19 %, 16,9 %, 20 %, 17 °С, 12,2 °С, 8 °С відповідно, а критерій Фішера не перевищує табличних значень та становить 4,63; 5,08 відповідно.

Показано за критерієм Фішера, що отримані моделі є адекватними, при цьому відносна похибка в порівнянні з експериментальними даними для модельного вогнища та фрагменту будинку склала 15 % та 20 % відповідно.

2. На основі проведених досліджень визначено залежності просторово-часового розподілу температури в залежності від відстані розміщення суміжних об'єктів. Отримані дані будуть використані під час обґрунтування протипожежних відстаней між будинками та спорудами за рахунок математичної моделі теплообміну між об'єктами під час пожежі за методами газодинаміки, а також під час обґрунтування алгоритму створення математичної моделі FDS тепломасопереносу під час горіння пожежі.

## РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРАХУНКОВОЇ ОЦІНКИ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВІДСТАНЕЙ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ

### 7.1 Загальна методологія розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами

Під час оцінювання протипожежної відстані між суміжними об'єктами будівництва розрахунковими методами [306, 307] слід розглядати проектні сценарії пожежі в кожному із цих об'єктів будівництва [308].

Після оцінювання розрахункової протипожежної відстані між суміжними об'єктами будівництва за двома можливими проектними сценаріями пожежі ( $R_1$  та  $R_2$ ) для визначення значення проектної протипожежної відстані ( $R_I$ ) приймають більше значення із двох розрахункових протипожежних відстаней ( $R$ ) [309].

$$R_I = K_6 \cdot \max\{R_1, R_2\}, \quad (7.1)$$

де  $K_6$  - коефіцієнт безпеки, приймають не менше ніж 1,2.

Оцінювання протипожежних відстаней розрахунковими методами між суміжними об'єктами будівництва здійснюють на підставі:

а) вибору проектного сценарію пожежі та відповідного теплового опромінювання суміжних об'єктів будівництва. Для розрахунково-табличного методу оцінювання протипожежних відстаней визначають: теплоутворювальну здатність пожежної навантаги, коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку, тривалість теплового опромінювання. Для спрощеного розрахункового методу визначають тепловий баланс у поверхні суміжного об'єкту будівництва, що опромінюються від факелу пожежі. Для розрахункових методів оцінювання протипожежних відстаней визначають розрахункову температуру;

б) визначення допустимої температури для речовин і матеріалів у об'єкті будівництва, що сприймає тепло від пожежі.

Критерієм прийнятності значення розрахункової протипожежної відстані (R) є умова того, що розрахункова температура ( $T_p$ ) із урахуванням тривалості теплового опромінювання на поверхні матеріалу, або речовини суміжного об'єкту будівництва, що сприймає тепло від пожежі не перевищує допустиму температуру ( $T_d$ ) для такого матеріалу або речовини, тобто  $T_p \leq T_d$  [310].

Тривалість теплового опромінювання (t) визначають:

- для розрахунково-табличного методу оцінювання протипожежних відстаней – із урахуванням часу введення сил і засобів для локалізації та ліквідації пожежі та/або захисту об'єктів будівництва, що сприймає тепло від пожежі;

- для розрахункового методу із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності та розрахункового методу із використанням польових моделей – із урахуванням вигорання пожежної навантаги або із урахуванням введення сил і засобів для локалізації та ліквідації пожежі та/або захисту об'єкту будівництва, що сприймає тепло від пожежі.

Теплофізичні характеристики матеріалів та речовин використаних під час оцінювання розрахунковими методами протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва приймають на основі даних наведених у довідникових виданнях (з відповідним посиланням на джерело) або за експериментальними даними.

Під час оцінювання протипожежних відстаней розрахунковими методами допускається робити такі припущення:

- температуру полум'я приймають однаковою по всій поверхні;
- температуру речовин або матеріалів, які сприймають тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва, в початковий момент розрахунку приймають рівною 20 °C;

- приймають такі умови навколишнього середовища: температура повітря 20 °С, атмосферний тиск 1 атм, швидкість вітру 0 м/с;

- тепловий вплив від пожежі на суміжний об'єкт будівництва під час використання спрощеного розрахункового методу оцінювання протипожежних відстаней та методу із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності визначають за рахунок теплового випромінювання, конвективну складову допускається не враховувати;

- за відсутності даних, ступінь чорноти полум'я ( $\epsilon_f$ ) приймають рівними  $\epsilon_f=1$ , а ступінь чорноти поверхні матеріалу або речовини, які сприймають тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва ( $\epsilon_m$ ) приймають рівними  $\epsilon_m=0,8$ , як для деревини згідно із [142];

- причину виникнення пожежі не розглядають.

Параметри, які характеризують тепловий вплив від пожежі на суміжний об'єкт будівництва: висота та ширина будинку в якому виникла пожежа; площа полум'я; взаємне розташування суміжних об'єктів будівництва, що впливають на кутовий коефіцієнт опромінювання; величина пожежної навантаги та теплофізичні характеристики речовин і матеріалів що її складають; теплофізичні характеристики речовин і матеріалів, які сприймають тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва; коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку, в якому виникла пожежа; тривалість теплового опромінювання об'єкту будівництва.

Достовірність результатів оцінювання протипожежних відстаней розрахунковими методами має підтверджуватися:

- обґрунтованістю проектних сценаріїв пожежі;
- повнотою вихідних даних для розрахунку;
- достовірністю властивостей речовин і матеріалів;
- обґрунтованістю граничних умов та припущень;

- точністю, що забезпечується кроком за часом та кроком просторового розбиття розрахункових областей, а також алгоритмів чисельного розв'язку диференціальних рівнянь.

Під час оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва розглядають проектні сценарії пожежі, за яких реалізуються найбільш сприятливі умови для поширення вогню на суміжні об'єкти будівництва.

Під час вибору проектного сценарію пожежі між суміжними об'єктами будівництва можна брати до уваги такі вихідні дані або їх комбінації:

- особливості об'ємно-планувальних та конструктивних рішень суміжних об'єктів будівництва та розміщення технологічного обладнання (межі вогнестійкості зовнішніх будівельних конструкцій, наявність прорізів у зовнішніх будівельних конструкціях та їх розміри, площа протипожежного відсіку або окремих приміщень тощо);

- вид, кількість, спосіб розміщення та пожежонебезпечні властивості речовин і матеріалів, що знаходяться (зберігаються, переробляються) у суміжних об'єктах будівництва, які сприймають тепло від пожежі;

- значення коефіцієнту врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинку де виникла пожежа, що направлені в бік суміжного об'єкту будівництва, який сприймає тепло від пожежі;

- оснащення будинку системами пожежогасіння;

- час введення сил та засобів пожежно-рятувальними підрозділами на гасіння пожежі або на захист суміжного об'єкту будівництва.

Під час оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва розрахунковими методами розглядаються такі найбільш характерні проектні сценарії пожежі та відповідного теплового впливу на суміжні об'єкти будівництва:

- через прорізи в огорожувальних конструкціях будинків;

- від фасадної частини будинку;

- від покрівлі будинку;

- від зовнішньої технологічної установки.

Допустиму температуру ( $T_d$ ) визначають для речовин і матеріалів у суміжному об'єкті будівництва, що сприймає тепло від пожежі, які залежно від особливостей їх розташування або особливостей технологічного процесу можуть потрапити під дію такого теплового впливу від пожежі.

Під час визначення речовини або матеріалу за характеристиками яких визначають допустиму температуру ( $T_d$ ) слід врахувати:

- дані щодо температури займання ( $T_3$ ) таких речовин та матеріалів;
- кількість цих речовин і матеріалів та умови їх розташування.

За результатами аналізу щодо пожежної небезпеки речовин та матеріалів суміжного об'єкту будівництва, що сприймають тепло від пожежі визначають речовину або матеріал з найменшою температурою займання ( $T_3$ ).

У випадках, коли температура займання ( $T_3$ ) речовини або матеріалу не відома та її визначення не можливе,  $T_3$  приймають рівною:

- для будинків, у якій зовнішня стіна, що сприймає тепло від пожежі у суміжній будівлі (тобто є протилежною такій будівлі), має віконні прорізи – 140 °С;
- для будинків, у якій зовнішня стіна, що сприймає тепло від пожежі у суміжній будівлі (тобто є протилежною такій будівлі), не має віконних прорізів – 250 °С;
- для технологічної установки – 60 °С.

Значення допустимої температури ( $T_d$ ) для об'єктів будівництва, що сприймають тепло від пожежі, повинно не перевищувати 80% температури займання ( $T_3$ ) матеріалів або речовин, що встановлені у п.7.2, тобто  $T_d \leq 0,8T_3$ .

Під час оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва можуть використовуватися такі розрахункові методи:

- розрахунково-табличний метод оцінювання протипожежних відстаней;

- спрощений розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней;
- розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності;
- розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням польових моделей.

В якості основного методу під час оцінювання протипожежних відстаней рекомендується використовувати розрахунково-табличний метод. Решту розрахункових методів використовують для перевірки або уточнення даних отриманих за розрахунково-табличним методом.

## **7.2 Розрахунково-табличний метод оцінювання протипожежних відстаней між об'єктами**

В якості спрощеного методу розрахункової оцінки протипожежних відстаней між об'єктами запропоновано використовувати табличний метод.

Створення таблиць щодо визначення протипожежних відстаней запропоновано здійснювати за методикою, що розуміє виконання таких процедур [311]:

1. Здійснюється вибір найбільш значущих параметрів об'єктів, що впливають на процеси теплопередачі від об'єкту, що горить на елементи суміжних об'єктів.
2. Будується універсальна апроксимаційна модель для розрахунку протипожежної відстані із змінними параметрами, які є значущими щодо впливу на процеси теплопередачі.
3. Створюється математична модель на основі прийнятої регресійної залежності.
4. Складається план повного факторного обчислювального експерименту.

5. Проводиться повний факторний обчислювальний експеримент з використанням створених плану експерименту та апроксимаційних моделей із змінними параметрами.

6. Визначаються константи числової регресійної залежності та будується математична модель залежності протипожежних відстаней від вибраних параметрів.

7. На основі побудованої математичної моделі складається відповідна таблиця щодо мінімальних протипожежних відстаней між будинками для забезпечення не поширення пожежі від одного будинку на інший.

Для побудування плану повного факторного експерименту взято попередньо обґрунтований перелік параметрів, які мають найбільші значення під час визначення протипожежних відстаней, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги ( $Q$ ), коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях ( $k$ ), тривалість опромінювання ( $t$ ). У таблиці 7.1 вказані інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів.

Таблиця 7.1

Інтервали параметрів в експерименті, що вибрані в якості факторів

| Пожежна навантага, МДж/м <sup>2</sup> |                         |                           | Коефіцієнт прорізів, %   |                         |                           | Тривалість опромінювання, хв |                         |                           |
|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Найменше значення, $Q_-$              | Середнє значення, $Q_0$ | Найбільше значення, $Q_+$ | Найменше значення, $k_-$ | Середнє значення, $k_0$ | Найбільше значення, $k_+$ | Найменше значення, $t_-$     | Середнє значення, $t_0$ | Найбільше значення, $t_+$ |
| 20                                    | 910                     | 1800                      | 10                       | 57.5                    | 95                        | 10                           | 80                      | 150                       |

В якості критерію настання умови поширення пожежі від осередку теплового опромінювання на елементи конструкцій суміжного об'єкту розглядається температура займання матеріалів із яких виконані такі елементи.

Математична модель за зробленим нами припущеннями відповідає лінійній залежності протипожежних відстаней та факторами, яка має такий вигляд рівняння 7.2 [280].

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (7.2)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – параметри, що враховують вибрані фактори, які зазначені у таблиці 7.1;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – константи рівняння числової регресії.

Для визначення констант рівняння числової регресії відповідно до формули (7.1) необхідно провести 8 чисельних експериментів [280] за складеною для цього матриці планування, що записана у вигляді таблиці 7.2.

Таблиця 7.2

Типова матриця планування повного факторного експерименту для побудування математичної моделі

| Номер експерименту | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1, x_2,$ | $x_1, x_3$ | $x_2, x_3$ | $x_1, x_2, x_3$ |
|--------------------|-------|-------|-------|-------------|------------|------------|-----------------|
| 1                  | +     | +     | +     | +           | +          | +          | +               |
| 2                  | -     | +     | +     | -           | -          | +          | -               |
| 3                  | +     | -     | +     | -           | +          | -          | -               |
| 4                  | -     | -     | +     | +           | -          | -          | +               |
| 5                  | +     | +     | -     | +           | -          | -          | -               |
| 6                  | -     | +     | -     | -           | +          | -          | +               |
| 7                  | +     | -     | -     | -           | -          | +          | +               |
| 8                  | -     | -     | -     | +           | +          | +          | -               |

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів об'єкту, що опромінюється в конструктивних елементах фасаду якого використовуються горючі матеріали, негорючі матеріали, а також для технологічного об'єкту, що опромінюється та в якому обертаються горючі рідини згідно із прийнятою матрицею планування (таблиця 7.2) для всіх варіацій значущих параметрів, що визначені у таблиці 7.1.

Результати розрахунків наведені у таблицях 7.3 – 7.5.

Таблиця 7.3

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів об'єкту, що опромінюється в конструктивних елементах фасаду якого використовуються горючі матеріали

| Відстань від осередку<br>теплового випромінювання,<br>м | Розрахункове значення температури для<br>відповідного номера експерименту згідно із<br>таблицею 7.2 |     |     |     |     |    |     |    |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
|                                                         | 1                                                                                                   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   |    |
| 18                                                      | 45                                                                                                  | 21  | 33  | 22  | 25  | 20 | 24  | 21 |
| 15                                                      | 86                                                                                                  | 30  | 67  | 26  | 37  | 20 | 28  | 24 |
| 10                                                      | 188                                                                                                 | 61  | 141 | 53  | 75  | 22 | 37  | 26 |
| 8                                                       | 260                                                                                                 | 101 | 207 | 89  | 106 | 24 | 79  | 30 |
| 6                                                       | 332                                                                                                 | 155 | 288 | 150 | 162 | 29 | 123 | 47 |
| 4                                                       | 404                                                                                                 | 271 | 369 | 267 | 273 | 46 | 197 | 89 |

Таблиця 7.4

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів об'єкту, що опромінюється в конструктивних елементах фасаду якого використовуються негорючі матеріали

| Відстань від осередку<br>теплового випромінювання,<br>м | Розрахункове значення температури для<br>відповідного номера експерименту згідно із<br>таблицею 7.2 |     |     |     |     |    |     |    |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
|                                                         | 1                                                                                                   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6  | 7   | 8  |
| 18                                                      | 54                                                                                                  | 26  | 46  | 27  | 31  | 25 | 30  | 25 |
| 15                                                      | 103                                                                                                 | 45  | 75  | 33  | 45  | 25 | 37  | 25 |
| 10                                                      | 226                                                                                                 | 75  | 163 | 66  | 90  | 27 | 69  | 28 |
| 8                                                       | 314                                                                                                 | 124 | 239 | 110 | 132 | 29 | 107 | 34 |
| 6                                                       | 427                                                                                                 | 190 | 334 | 184 | 201 | 34 | 166 | 50 |
| 4                                                       | 625                                                                                                 | 331 | 477 | 326 | 339 | 53 | 274 | 97 |

Таблиця 7.5

Розраховані значення температури верхнього шару конструктивних елементів для технологічного об'єкту, що опромінюється та в якому обертаються горючі рідини

| Відстань від осередку теплового випромінювання, м | Розрахункове значення температури для відповідного номера експерименту згідно із таблицею 7.2 |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                   | 1                                                                                             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| 18                                                | 96                                                                                            | 47  | 79  | 39  | 50  | 44  | 61  | 35  |
| 15                                                | 201                                                                                           | 99  | 138 | 87  | 99  | 64  | 86  | 39  |
| 10                                                | 503                                                                                           | 196 | 284 | 139 | 139 | 129 | 161 | 44  |
| 8                                                 | 624                                                                                           | 301 | 342 | 231 | 169 | 140 | 205 | 53  |
| 6                                                 | 745                                                                                           | 498 | 400 | 401 | 624 | 164 | 318 | 77  |
| 4                                                 | 866                                                                                           | 695 | 458 | 571 | 968 | 255 | 431 | 145 |

Варіюючи параметрами згідно із таблиці 7.1 та таблиці 7.2, і проводячи розрахунки за формулою (7.1), інтерполюючи отримані дані за температурою займання ( $255^{\circ}\text{C}$  як для соснової деревини), отримані протипожежні відстані між будинками під час пожежі із урахуванням значущих факторів впливу. Отримані дані для різних конструктивних характеристик об'єктів, що опромінюються наведені у таблицях 7.6 – 7.8.

Таблиця 7.6

Протипожежні відстані, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для об'єкту, що опромінюється та в конструктивних елементах фасаду якого використовуються горючі матеріали

| Номер експерименту       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Протипожежні відстані, м | 9,1 | 5,5 | 7,1 | 5,0 | 5,2 | 2,5 | 4,4 | 2,0 |

Таблиця 7.7

Протипожежні відстані, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для об'єкту, що опромінюється та в конструктивних елементах фасаду якого використовуються не горючі матеріали

| Номер експерименту       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Протипожежні відстані, м | 8,3 | 4,4 | 6,7 | 4,3 | 4,5 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |

Таблиця 7.8

Протипожежні відстані, отримані в умовах повного факторного експерименту згідно із прийнятою матрицею планування для технологічного об'єкту, що опромінюється та в якому обертаються горючі рідини

| Номер експерименту       | 1    | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|--------------------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Протипожежні відстані, м | 13,1 | 7,3 | 10,8 | 7,0 | 7,5 | 4,0 | 6,6 | 2,0 |

Використовуючи дані таблиці 7.6 – 7.8 визначені константи рівняння числової регресії залежності (7.1) за формулами (7.3) [162, 163]:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; \quad b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 y_i; \quad b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 y_i; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_3 y_i; \quad b_4 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 y_i; \\
 b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_3 y_i; \quad b_6 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_2 x_3 y_i; \quad b_7 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_1 x_2 x_3 y_i,
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

де  $N = 8$  – кількість експериментальних ситуацій згідно із планом експерименту;

$x_i$  – значення параметру згідно із матрицею плану (див. таблицю 7.2);

$y_i$  – значення протипожежної відстані згідно із таблицями 7.4 – 7.6.

Константи рівняння числової регресії наведені у таблицях 7.9 – 7.11.

Таблиця 7.9

Константи рівняння числової регресії для випадку горючого фасаду

| Коефіцієнт | $b_0$ , | $b_1$ , | $b_2$ , | $b_3$ , | $b_4$ , | $b_5$ , | $b_6$ , | $b_7$ |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Значення   | 5,09    | 1,34    | 0,475   | 1,573   | 0,225   | 0,073   | 0,134   | 0,134 |

Таблиця 7.10

Константи рівняння числової регресії для випадку не горючого фасаду

| Коефіцієнт | $b_0$ , | $b_1$ , | $b_2$ , | $b_3$ , | $b_4$ , | $b_5$ , | $b_6$ , | $b_7$  |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Значення   | 4,275   | 1,1     | 0,525   | 1,65    | 0,5     | 0,475   | -0,1    | -0,125 |

Таблиця 7.11

Константи рівняння числової регресії для випадку технологічного об'єкту, в якому обертаються горючі рідини

| Коефіцієнт | $b_0$ , | $b_1$ , | $b_2$ , | $b_3$ , | $b_4$ , | $b_5$ , | $b_6$ , | $b_7$ |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| Значення   | 7,247   | 2,215   | 0,698   | 2,243   | 0,125   | 0,21    | -0,037  | 0,39  |

Використовуючи отриману регресійну залежність побудовані відповідні поверхні залежності протипожежних відстаней від вибраних найбільш значущих параметрів, які показані на рисунках 7.1 – 7.3. На побудованих поверхнях показані рівні, що відповідають різним значенням протипожежних відстаней.

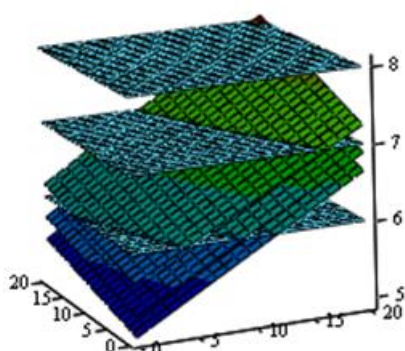


Рисунок 7.1 – Поверхні залежності протипожежних відстаней від найбільш значущих параметрів для випадку горючого фасаду

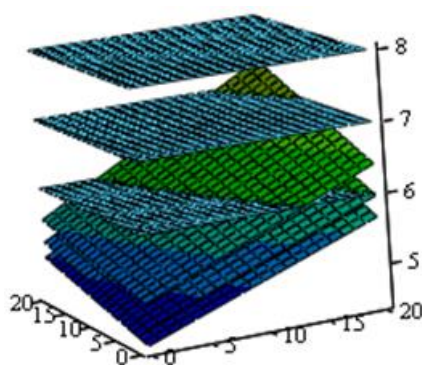


Рисунок 7.2 – Поверхні залежності протипожежних відстаней від найбільш значущих параметрів для випадку не горючого фасаду

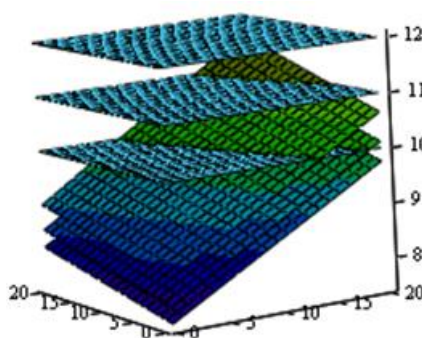


Рисунок 7.3 – Поверхні залежності протипожежних відстаней від найбільш значущих параметрів для випадку технологічного об'єкту, в якому обертаються горючі рідини

Отримані дані дозволяють провести визначення мінімальних значень протипожежних відстаней для забезпечення умови не поширення пожежі від одного об'єкту на інший.

Перевірку результатів розрахунку за регресійною залежністю проведено за абсолютними, відносними та середньоквадратичними відхиленнями та за критерієм Фішера.

Використовуючи побудовані регресійні залежності створено таблиці 7.12 – 7.14 визначення мінімальних протипожежних відстаней залежно від відповідних параметрів факторів, що впливають на процеси теплопередачі від об'єкту, що горить на елементи конструкцій суміжного об'єкту.

Таблиця 7.12

Визначення протипожежних відстаней для об'єкту, що опромінюється  
та виконаний із горючого фасаду

| Величина пожежної навантаги q, МДж/м <sup>2</sup> | Розрахункова протипожежна відстань, (Т <sub>р</sub> , м) залежно від коефіцієнту врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, (О, %) та тривалості теплового опромінювання, (t, хв) |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|--------------|-------|------|--------------|-------|------|--------|-------|------|
|                                                   | О, %                                                                                                                                                                                                      |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|                                                   | до 25                                                                                                                                                                                                     |       |      | від 25 до 50 |       |      | від 50 до 90 |       |      | від 90 |       |      |
|                                                   | t, хв                                                                                                                                                                                                     |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|                                                   | <10                                                                                                                                                                                                       | 10÷60 | >60  | <10          | 10÷60 | >60  | <10          | 10÷60 | >60  | <10    | 10÷60 | >60  |
| до 100                                            | 5,5                                                                                                                                                                                                       | 6,0   | 7,5  | 5,5          | 6,0   | 7,5  | 5,5          | 6,0   | 7,5  | 6,0    | 7,0   | 8,0  |
| від 100 до 400                                    | 6,0                                                                                                                                                                                                       | 7,0   | 8,0  | 6,0          | 7,0   | 8,0  | 6,0          | 7,0   | 8,0  | 7,0    | 7,5   | 8,5  |
| від 400 до 1500                                   | 7,0                                                                                                                                                                                                       | 7,5   | 9,0  | 7,0          | 7,5   | 9,0  | 7,5          | 7,5   | 10,0 | 7,5    | 8,5   | 10,0 |
| від 1500                                          | 7,5                                                                                                                                                                                                       | 8,0   | 10,0 | 7,5          | 8,0   | 10,0 | 8,0          | 8,5   | 10,5 | 8,0    | 9,0   | 10,5 |

Таблиця 7.13

Визначення протипожежних відстаней для об'єкту, що опромінюється  
та виконаний із не горючого фасаду

| Величина пожежної навантаги q, МДж/м <sup>2</sup> | Розрахункова протипожежна відстань, (Т <sub>р</sub> , м) залежно від коефіцієнту врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях, (О, %) та тривалості теплового опромінювання, (t, хв) |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|--------------|-------|------|--------------|-------|------|--------|-------|------|
|                                                   | О, %                                                                                                                                                                                                      |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|                                                   | до 25                                                                                                                                                                                                     |       |      | від 25 до 50 |       |      | від 50 до 90 |       |      | від 90 |       |      |
|                                                   | t, хв                                                                                                                                                                                                     |       |      |              |       |      |              |       |      |        |       |      |
|                                                   | <10                                                                                                                                                                                                       | 10÷60 | >60  | <10          | 10÷60 | >60  | <10          | 10÷60 | >60  | <10    | 10÷60 | >60  |
| до 100                                            | 6,0                                                                                                                                                                                                       | 7,5   | 8,5  | 6,0          | 7,5   | 8,5  | 7,0          | 8,0   | 9,0  | 7,5    | 8,0   | 9,0  |
| від 100 до 400                                    | 7,0                                                                                                                                                                                                       | 8,0   | 9,0  | 7,0          | 8,0   | 9,0  | 7,5          | 8,5   | 10,0 | 8,0    | 8,5   | 10,0 |
| від 400 до 1500                                   | 7,5                                                                                                                                                                                                       | 8,5   | 9,5  | 7,5          | 8,5   | 9,5  | 8,0          | 9,0   | 10,5 | 8,5    | 9,0   | 11,0 |
| від 1500                                          | 8,0                                                                                                                                                                                                       | 9,0   | 10,5 | 8,0          | 9,0   | 10,5 | 8,5          | 10,0  | 11,0 | 9,0    | 9,0   | 11,5 |

Таблиця 7.14

Визначення протипожежних відстаней для технологічного об'єкту, в  
якому обертаються горючі рідини

| Величина пожежної навантаги $q$ , МДж/м <sup>2</sup> | Розрахункова протипожежна відстань, ( $T_p$ , м) залежно від тривалості теплового опромінювання, ( $t$ , хв) |       |      |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|
|                                                      | $t$ , хв                                                                                                     |       |      |
|                                                      | >10                                                                                                          | 10÷60 | >60  |
| до 100                                               | 25,5                                                                                                         | 27,0  | 31,5 |
| від 100 до 400                                       | 27,0                                                                                                         | 28,5  | 33,0 |
| від 400 до 1500                                      | 30,0                                                                                                         | 33,0  | 39,0 |
| від 1500                                             | 31,5                                                                                                         | 34,5  | 42,0 |

Для оцінювання протипожежної відстані із використанням розрахунково-табличного методу для об'єкту будівництва, в якому виникає пожежа необхідно встановити величину пожежної навантаги ( $Q$ ), коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях будинків ( $O$ ) та тривалість теплового опромінювання ( $t$ ).

Величину пожежної навантаги ( $Q$ , Дж/м<sup>2</sup>) визначають для протипожежного відсіку або приміщення, що виділене протипожежними перешкодами та для технологічного обладнання, аварійна ситуація, в якому може привести до виникнення пожежі відповідно до [311].

Середнє значення пожежної навантаги для деяких приміщень згідно із [142, 312] наведено в таблиці 7.15.

Таблиця 7.15

Середнє значення пожежної навантаги для приміщень

| Приміщення                     | Середнє значення пожежної навантаги $Q$ , МДж/м <sup>2</sup> |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Житлове                        | 780                                                          |
| Лікарняна палата               | 230                                                          |
| Готельний номер                | 310                                                          |
| Бібліотека                     | 1500                                                         |
| Офіс                           | 420                                                          |
| Класна кімната в школі         | 285                                                          |
| Торгівельний центр             | 600                                                          |
| Театр (кінотеатр)              | 300                                                          |
| Вокзал (простір для пасажирів) | 100                                                          |

Коефіцієнт врахування площі прорізів ( $O$ , %) у зовнішніх огорожувальних конструкціях визначають за формулою [142]:

$$0 = A_{v1} \sqrt{h_{eq}} / A_{t1} \quad (7.4)$$

де  $A_{v1}$  – загальна площа прорізів у зовнішній стіні, яка протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло, будинку, в якому виникла пожежа, м<sup>2</sup>;

$A_{t1}$  – загальна площа зовнішньої огорожувальної конструкції (враховуючи прорізи), яка протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло, будинку, в якому виникла пожежа, м<sup>2</sup>;

$h_{eq}$  – середнє значення висоти прорізів у зовнішній стіні, яка протилежна суміжному об'єкту будівництва, що сприймає тепло, будинку, в якому виникла пожежа, м.

Тривалість теплового опромінювання ( $t$ , хв) із урахуванням часу для введення сил і засобів для локалізації та ліквідації пожежі та/або захисту об'єкту будівництва, що сприймають тепло від пожежі визначають за формулою:

$$t = t_{пв} + t_{зб} + t_{сл} + t_{ор} \quad (7.5)$$

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 [313]);

$t_{ор}$  – час оперативного розгортання підрозділу пожежної охорони на пожежу, хв (приймають не менше ніж на 1 хв) [314].

### **7.3. Розрахунок протипожежних відстаней між об'єктами за спрощеним методом**

Приймаємо умову, що тепловий потік, який випромінює факел пожежі однаковий із тепловим потоком біля поверхні суміжного будинку, яка

опромінюється цим теплом. В такому випадку, кількість теплоти можна визначити за формулою [142]:

$$q = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma ((T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4) \quad (7.6)$$

де  $\Phi$  – кутовий коефіцієнт опромінювання;

$\varepsilon_m$  – ступінь чорноти поверхні матеріалу, що сприймає тепло приймають рівною 0,8;

$\varepsilon_f$  – ступінь чорноти факелу полум'я, приймають рівною 1;

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

$T_f$  – температура факелу пожежі, °С;

$T_s$  – температура на поверхні суміжного об'єкту, що опромінюється теплом °С.

Під час опромінювання поверхні будинку від факелу пожежі енергія випромінювання призводить до нагрівання даної поверхні. При цьому, найбільшої температури ця поверхня набуває, коли процес нагріву стає усталеним. За таких умов його можна описати, як для стаціонарного режиму нагріву. В такому разі кількість теплоти, що випромінюється на поверхню суміжного будинку можна визначити через закон Фур'є [315]:

$$q_{\text{пов}} = \lambda \frac{T_s - T_o}{\delta} \quad (7.7)$$

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини, що застосовуються у будинку, який опромінюється теплом, Вт/м·К;

$T_o$  – температура матеріалу або речовини, що застосовуються у будинку, який опромінюється теплом, °С.

Кількість теплоти, що передається від поверхні в оточуюче середовище із не обігрівного боку можна визначити за законом Ньютона - Рихмана [130]:

$$q_{\text{в.сер.}} = \alpha (T_o - T_n) \quad (7.8)$$

$T_H$  – температура середовища, в яке передається тепло від поверхні будинку, допускається приймати  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  – коефіцієнт теплопередачі, приймається  $9\text{ Вт/м}^2$ , згідно із [142].

Під час передачі тепла від факелу пожежі на поверхню матеріалу або речовини, що застосовуються у будинку, який опромінюється теплом, має виконуватися умова теплового балансу із врахуванням втрат тепла через не обігрівну поверхню за рахунок конвекції та випромінювання. Зазначену умову можна записати [315]:

$$q = q_{\text{пов}} = q_{\text{в.сер.}} \quad (7.9)$$

З даної умови та формул (7.7), (7.8) можна визначити температуру ( $T_o$ ) [315]:

$$T_o = \frac{\lambda T_s + \alpha \delta T_H}{\alpha \delta + \lambda} \quad (7.10)$$

Підставивши формулу (7.10) у формулу (7.7) отримаємо [315]:

$$q = \frac{\lambda T_s}{\delta} \left(1 - \frac{\lambda}{\alpha \delta + \lambda}\right) - \frac{\alpha \lambda T_H}{\alpha \delta + \lambda} \quad (7.11)$$

Використавши умову (7.9) можна отримати рівняння (7.12) [315]:

$$\left(1 - \frac{\lambda}{\alpha \delta + \lambda}\right) \frac{\lambda T_s}{\delta} - \frac{\alpha \lambda T_H}{\alpha \delta + \lambda} - \Phi \sigma \epsilon_m \epsilon_f \left( (T_s - 273)^4 - (T_f - 273)^4 \right) = 0 \quad (7.12)$$

Рівняння (7.12) може бути використане для знаходження протипожежної відстані, що входить у вираз для визначення коефіцієнту кутового опромінювання ( $\Phi$ ).

Кутовий коефіцієнт опромінювання ( $\Phi$ ) визначають [142]:

- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані паралельно один відносно одного [142]:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \operatorname{arctg} \left( \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \right) + \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \right] \quad (7.13)$$

- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані перпендикулярні один відносно одного [142]:

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg}(a) - \frac{b}{\sqrt{1+b^2}} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{1+a^2}} \right) \right] \quad (7.14)$$

- полум'я пожежі та поверхня, що опромінюється розташовані під кутом  $\theta$  один відносно одного [142]:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{2\pi} \left[ \operatorname{arctg}(a) - \frac{1-b \cos \theta}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \operatorname{arctg} \left( \frac{a}{\sqrt{1+b^2-2b \cos \theta}} \right) \right] + \\ & \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{a \cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \left( \operatorname{arctg} \left( \frac{b-\cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \theta}{\sqrt{a^2+\sin^2 \theta}} \right) \right] \end{aligned} \quad (7.15)$$

де  $a = L_L/R$ ;

$b = W/R$ ;

$R$  – розрахункова протипожежна відстань, м

Умовою відсутності загорання згідно із вибраною критеріальною базою є умова, за якою температура на поверхні матеріалу не перевищує 80% температури займання ( $T_3$ ) відповідного матеріалу або речовини, що застосовуються у будинку, який опромінюється теплом. Тоді вираз (7) може бути розглянуто, як рівняння теплового балансу за певної відстані, коли температура поверхні даного матеріалу буде дорівнювати допустимій температурі ( $T_d$ ).

Тоді дане рівняння може бути вирішено відносно значення протипожежної відстані, при якій виконується така умова. Рівняння (7) не

має аналітичного розв'язку. Для його розв'язання запропоновано графічний метод, суть якого полягає у побудові графіку функції, що представляє собою ліву частину рівняння (7) в залежності від відстані (R). Після перетину відповідної кривої вісі абсцис, в якості протипожежної відстані береться найближче більше ціле значення (R).

Температура факелу полум'я  $T_f$  визначається за формулою [142]:

$$T_f = \frac{520}{\left[1 - 0,4725 \left(L_f * \frac{W_t}{q}\right)\right]} + T_0, \text{ К} \quad (7.16)$$

де  $L_f$  – довжина полум'я вздовж осі, м;

$W_t$  – сумарна ширина прорізів, м;

$q$  – густина теплового потоку, що випромінюється під час горіння, МВт;

$T_0$  – початкова температура, К

Густина теплового потоку, що виділяється під час горіння  $q$  визначається за формулою [142]:

$$q = \min((A_f * q_{f,d})/\tau_F; 3,15(1 - e^{-\frac{0,036}{O}})A_v(\frac{h_{eq}}{D/W})^{1/2}) , \text{ МВт} \quad (7.17)$$

де  $A_f$  – площа поверху в межах протипожежного відсіку, м<sup>2</sup>;

$Q$  – пожежна навантага, МДж/м<sup>2</sup>;

$\tau_F$  – тривалість вільного горіння під час пожежі (приймається 1200 с);

$e$  – основа натурального логарифма (дорівнює приблизно 2,72);

$O$  – коефіцієнт врахування прорізів протипожежного відсіку;

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

$A_v$  – загальна площа вертикальних прорізів, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт врахування площі прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях визначається за формулою [142]:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad (7.18)$$

де  $A_t$  – загальна площа огорожувальних конструкцій (стіни, стеля і підлога, враховуючи прорізи),  $m^2$ .

Відношення  $D/W$  визначається [142]:

- якщо у стіні, що межує із суміжним об'єктом є більше ніж одне вікно, тоді застосовуються середнє арифметичне значення висоти вікна  $h_{eq}$ , загальна площа вертикальних прорізів  $A_v$  та сумарна ширина вікон [142]:

$$W_t = \sum W_i \quad (7.19)$$

де  $W_i$  – ширина  $i$ -го вікна, м;

- якщо вікна є лише в стіні, що межує із суміжним об'єктом, то відношення  $D/W$  визначається за формулою [142]:

$$D/W = \frac{W_2}{W_t} \quad (7.20)$$

де  $W_2$  – ширина стіни перпендикулярної до стіни, що межує із суміжним об'єктом, у протипожежному відсіку, м;

- якщо вікна є більш ніж в одній стіні, то відношення  $D/W$  визначається за формулою [142]:

$$D/W = \frac{W_2 A_{v1}}{W_1 A_v} \quad (7.21)$$

де  $W_1$  – ширина стіни що межує із суміжним об'єктом, м;

$A_{v1}$  – сумарна площа вікон у стіні, що межує із суміжним об'єктом,  $m^2$ ;

- якщо у протипожежному відсіку є ядро жорсткості, то відношення  $D/W$  визначається за формулою [142]:

$$D/W = \frac{(W_2 - L_c)A_{v1}}{(W_1 - W_c)A_v} \quad (7.22)$$

де  $L_c$  і  $W_c$  – довжина та ширина ядра жорсткості, м;

Довжина полум'я вздовж осі  $L_f$  визначається [142]:

- якщо  $h_{eq} \leq 1,25w_t$

$$L_f = L_L + h_{eq}/2 \quad (7.23)$$

- якщо  $h_{eq} > 1,25w_t$

$$L_f = (L_L^2 + \left(L_H - \frac{h_{eq}}{3}\right)^2)^{1/2} + h_{eq}/2 \quad (7.24)$$

де  $L_L$  – висота полум'я, м;

$L_H$  – горизонтальна проекція полум'я.

Висота полум'я  $L_L$  визначається за формулою [142]:

$$L_L = 1,9(Q/W_t)^{2/3} - h_{eq} \quad (7.25)$$

Горизонтальна проекція полум'я  $L_H$  визначається [142]:

- якщо  $h_{eq} \leq 1,25W_t$

$$L_H = h_{eq}/3 \quad (7.26)$$

- якщо  $h_{eq} > 1,25W_t$

$$L_H = 0,3h_{eq}(h_{eq}/W_t)^{0,54} \quad (7.27)$$

- в інших випадках

$$L_H = 0,454h_{eq}(h_{eq}/2W_t)^{0,54} \quad (7.28)$$

- у разі відсутності стіни над вікном

$$L_H = 0,6h_{eq}(L_L/h_{eq})^{1/3} \quad (7.29)$$

Пожежну навантагу ( $Q$ ) визначають згідно із [309].

Алгоритм оцінювання протипожежних відстаней за спрощеним методом зображено на рисунку 7.4.

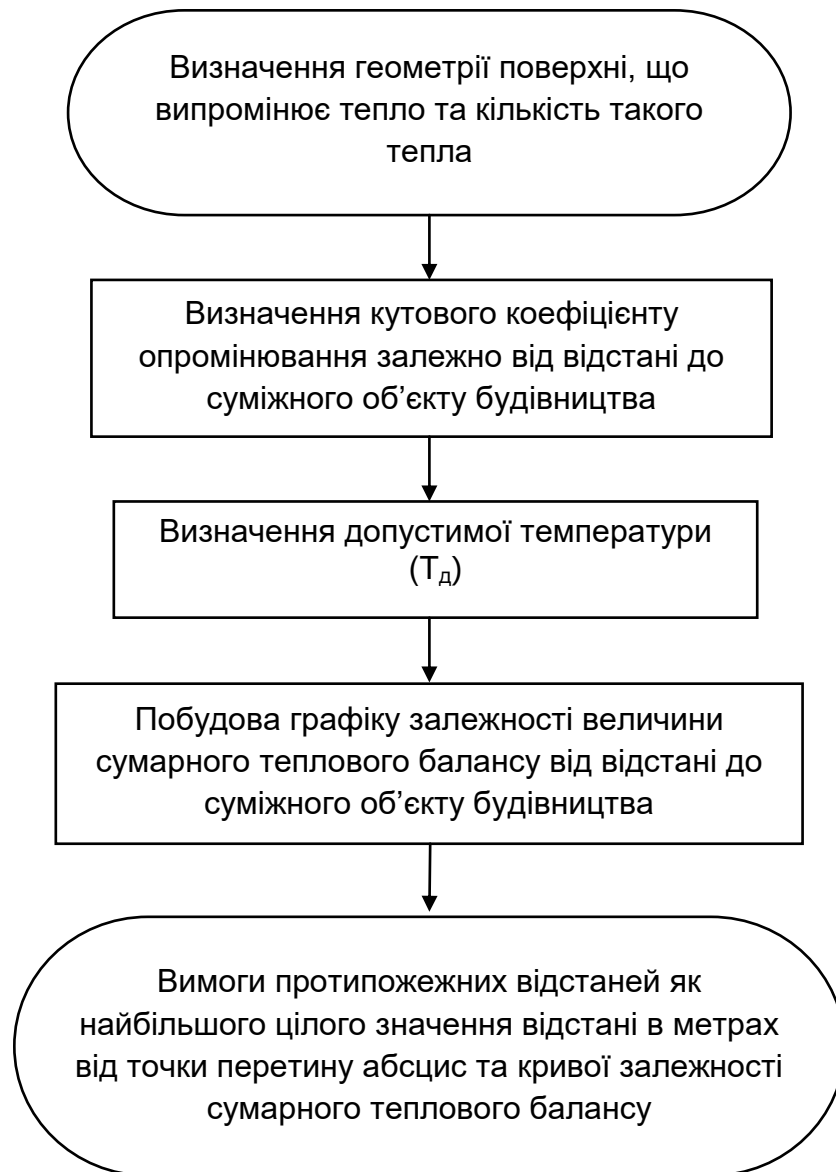


Рисунок 7.4 – Алгоритм розрахунку протипожежних відстаней між об'єктами за спрощеним методом

#### 7.4 Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності

Розрахункову температуру на поверхні суміжного об'єкту будівництва, що опромінюється теплом ( $T_p$ ) визначають за рівнянням теплопередачі, яке засноване на використанні рівняння нестационарної теплопровідності, яке має вигляд:

$$C_p \rho \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T_p}{\partial z} \right) \quad (7.30)$$

де  $t$  – тривалість теплового опромінювання, с;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва, Вт/(м·°C);

$c_p$  – питома теплоємність матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі у суміжному об'єкті будівництва, Дж/(кг·°C);

$\rho$  – густина матеріалу або речовини у будинку, що сприймає тепло від пожежі суміжного об'єкту будівництва, кг/м<sup>3</sup>.

Променистий теплообмін між факелом пожежі та поверхнею суміжного об'єкту будівництва враховують шляхом вирішення інтегрального рівняння, що має такий вигляд:

$$\sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - \varphi_{ij}) \sigma \theta_j^4 = \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_j} \left( \frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij} \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_j} \right) q_j \quad (7.31)$$

де  $\delta_{ij}$  – символ, що дорівнює 1 при  $i = j$ , та 0 в інших випадках;

$i, j$  – кількість елементів, на які розбивається поверхня, що випромінює тепло та опромінюється теплом відповідно;

$Q_j$  – кількість теплоти, що передається від  $i$  поверхні, до  $j$  поверхні;

$\varphi_{i,j}$  – променевий кутовий коефіцієнт опромінювання, що залежить від взаємного розташування  $i$  та  $j$  поверхонь, який визначають, як

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \beta_i \cos \beta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (7.32)$$

де  $\beta$  – кут між нормаллю до елемента і лінією, яка з'єднує елементи  $i$  та  $j$ ;

$r$  – відстань між центрами елементів  $i$  та  $j$ , м;

$A_i, A_j$  – площа елементів поверхонь, що випромінюють тепло та опромінюються теплом відповідно, м<sup>2</sup>.

За умови розв'язку рівняння (В.2) на кожній площині поверхні розрахункової області визначається тепловий потік за формулою:

$$\lambda \frac{\partial T_{pj}}{\partial r_j} |_{r_j} = q_j \quad (7.33)$$

Під час вирішення рівняння теплопровідності (В.1) використовують метод кінцевих різниць або метод кінцевих елементів.

Алгоритм оцінювання протипожежних відстаней із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності зображено на рисунку 7.5.

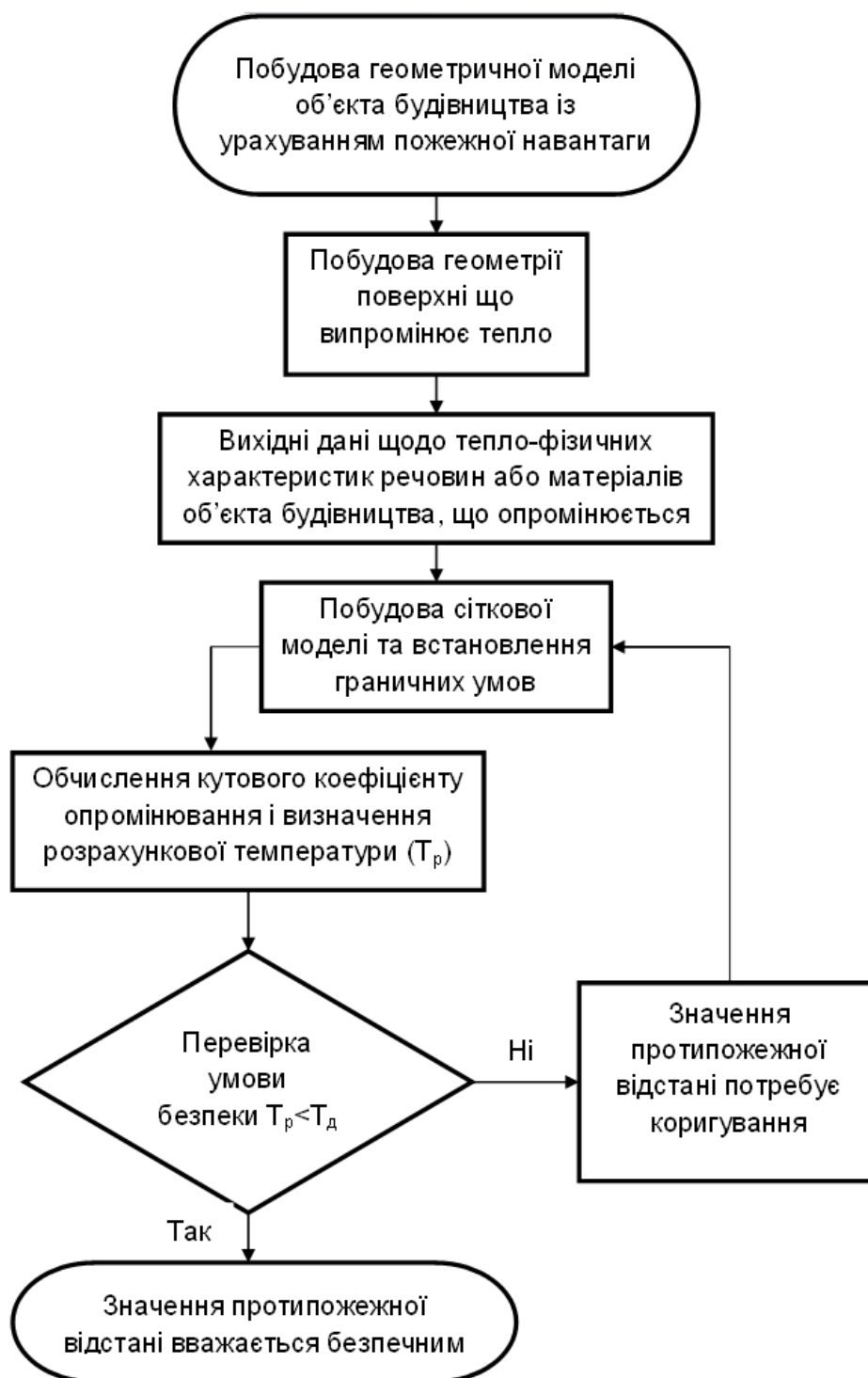


Рисунок 7.5 – Алгоритм оцінювання протипожежних відстаней між суміжними будівлями із використанням рівняння променистого теплообміну та рівняння нестационарної теплопровідності

## 7.5 Розрахунковий метод оцінювання протипожежних відстаней із використанням польових моделей

Метод із використанням польових моделей заснований на використанні повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса.

Основою для польових моделей є диференціальні рівняння подані нижче.

Рівняння збереження маси [230]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j) = 0, \quad (7.34)$$

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 [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot u_j \cdot u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho \cdot g_i, \quad (7.35)$$

де  $\rho$  – густина повітря між суміжними об'єктами, 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 визначається за формулою [230]:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \cdot \delta_{ij}. \quad (7.36)$$

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  $k$  [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_j \cdot Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho \cdot D \cdot \frac{\partial Y_k}{\partial x_j}\right) + S_k, \quad (7.37)$$

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;

$Y_k$  – 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 (Г.1) – (Г.4) використовується рівняння стану ідеального газу. Для суміші газів воно має такий вигляд [230]:

$$p = \rho \cdot R_0 \cdot T \cdot \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (7.38)$$

де  $p$  – абсолютний тиск повітря між суміжними об'єктами, Па;

$\rho$  – густина повітря між суміжними об'єктами, кг/м<sup>3</sup>;

$R_0 = 8,31$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;

$T$  – абсолютна температура повітря між суміжними об'єктами, °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 [230]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot u_j \cdot h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_j^R}{\partial x_j}, \quad (7.39)$$

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 у сукупності із одноступеневим стехіометричним рівнянням хімічної реакції.

Для врахування турбулентності використовують стандартну модель « $k$ - $\varepsilon$ » або інші моделі турбулентності.

Для розв'язку системи рівнянь Нав'є-Стокса використовують один із чисельних методів (наприклад метод контрольних об'ємів або метод кінцевих різниць).

Алгоритм оцінювання протипожежних відстаней із використанням польових моделей зображено на рисунку 7.6.

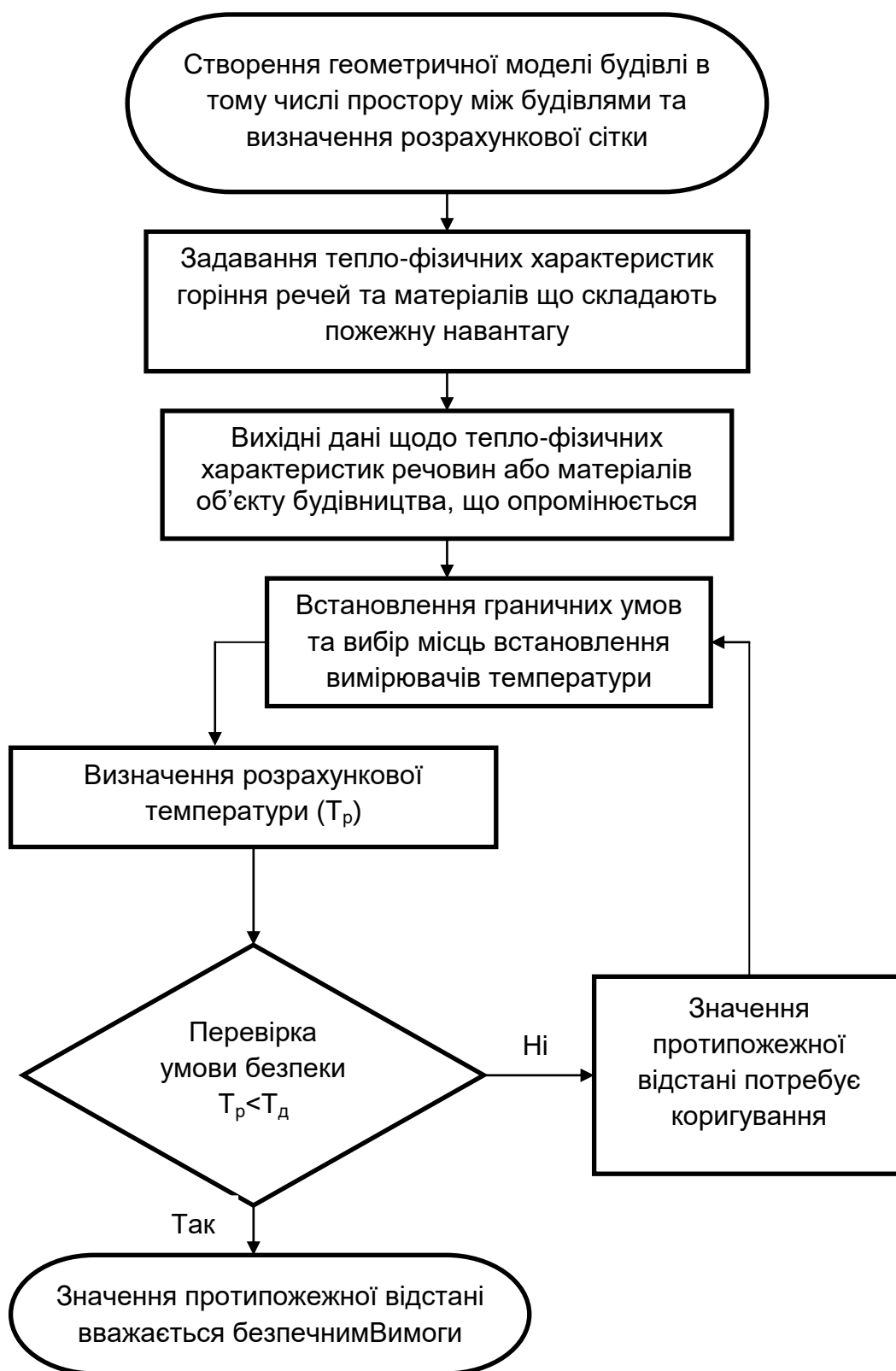


Рисунок 7.6 – Алгоритм оцінювання протипожежних відстаней із використанням польових моделей

## 7.6 Порівняння економічних параметрів за запропонованими розрахунковими методами із існуючими підходами

Оцінювання економічного ефекту за запропонованими розрахунковими методами порівняно із існуючими підходами проводимо за формулою:

$$E = E_1 + E_2 \quad (7.40)$$

де  $E_1$  – економічний ефект, що досягається за рахунок запобігання можливих втрат від пожежі, що поширюється від одного будинку на інший, тис. грн.;

$E_2$  – економічний ефект, що досягається за рахунок більш раціонального використання земельних ресурсів, що виділяються під будівництво (зокрема під влаштування протипожежних відстаней), тис. грн.

Економічний ефект, що досягається за рахунок запобігання можливих втрат від пожежі, що поширюється від одного будинку на інший ( $E_1$ ) визначається із урахуванням того, що використання обґрунтованих запропонованих розрахункових методів знижує ризик поширення пожежі між суміжними об'єктами до припустимих рівнів. Тобто приймається варіант, що поширення пожежі між суміжними будівельними об'єктами не відбудеться. В такому випадку значення економічного ефекту, що досягається за рахунок запобігання можливих втрат від пожежі, що поширюється від одного будинку на інший ( $E_1$ ) можна визначити за формулою:

$$E_1 = Z_{c1} - Z_{c2} \quad (7.41)$$

де  $Z_{c1}$  – середні збитки від однієї пожежі, під час якої мало місце поширення пожежі між суміжними об'єктами продовж року, тис. грн.;

$Z_{c2}$  - середні збитки від однієї пожежі продовж року, тис. грн.

Для визначення економічного ефекту, що досягається за рахунок більш раціонального використання земельних ресурсів, що виділяються під будівництво (зокрема під влаштування протипожежних відстаней) розглянемо довільний елемент забудови, що зображений на рисунку 7.7.

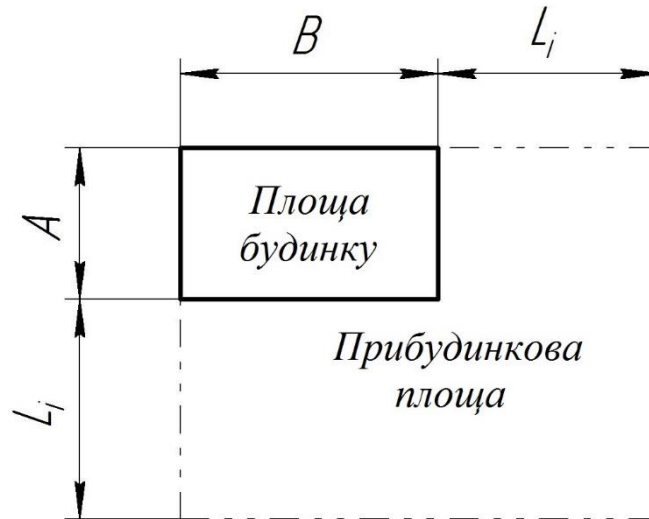


Рисунок 7.7 – Довільний елемент забудови території

В такому випадку:

- коефіцієнт забудови можна визначити за формулою:

$$k_i = \frac{(A \cdot B)}{(A + L_i) \cdot (B + L_i)} \quad (7.42)$$

- коефіцієнт раціоналізації протипожежної відстані між суміжними будинками можна визначити за формулою:

$$k = \frac{L_1}{L_2} \quad (7.43)$$

де,  $L_1$  - відстань між суміжними будинками згідно із існуючими вимогами, м;

$L_2$  - відстань між суміжними будинками згідно із запропонованими розрахунковими методами;

- коефіцієнт відношення довжини до ширини будинку можна визначити за формулою:

$$s = \frac{B}{A} \quad (7.44)$$

Оцінку економічного ефекту, що досягається за рахунок більш раціонального використання земельних ресурсів, що виділяються під будівництво ( $E_2$ ) можна знайти шляхом обчислення коефіцієнту зниження відносних витрат на одиницю площі прибудинкової території ( $e_p$ ) за формулою:

$$e_p = \frac{(S_{\text{заг } 1} - S_{\text{заг } 2})}{S_{\text{заг } 1} - S_{\text{буд}}} \quad (7.45)$$

де,  $S_{\text{заг } 1}$  – загальна площа елемента забудови, де відстань між будинками обчислена згідно із існуючих норм;

$S_{\text{заг } 2}$  – загальна площа елемента забудови, де відстань між будинками обчислена згідно із запропонованого розрахункового методу;

$S_{\text{буд}}$  – загальна площа, що займає будинок.

Підставивши до цієї формули значення, що наведені на рисунку 7.7, отримаємо:

$$e_p = \frac{((A+L_1) \cdot (B+L_1) - (A+L_2) \cdot (B+L_2))}{(A+L_1) \cdot (B+L_1) - (A \cdot B)} \quad (7.46)$$

Скориставшись формулами (7.44-7.46) отримаємо формулу:

$$\begin{aligned}
e_p = & \left( \left( A + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i} \right) \cdot \right. \\
& \left( A_s + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i} \right) - \\
& - \left( A + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i k} \right) + \\
& \left. + \left( A_s + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i k} \right) \right) / \\
& \left( \left( A + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i} \right) \left( A_s + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{(-k_i s - k_i + \sqrt{k_i^2 s^2 - 2k_i^2 s + k_i^2 + 4k_i s}) \cdot A}{2k_i} \right) - A^2 s \right)
\end{aligned} \tag{7.47}$$

Здійснивши скорочення отримаємо формулу для визначення коефіцієнту зниження відносних витрат на одиницю площі прибудинкової території ( $e_p$ ):

$$e_p = \frac{(k-1) \left( (k+1) \sqrt{((s-1)^2 k_i + 4s) k_i} + k_i (s+1) (k-1) \right)}{\sqrt{((s-1)^2 k_i + 4s) k_i} + k_i (s+1) k^2} \tag{7.48}$$

Якщо прийняти коефіцієнт забудови, де відстань між будинками обчислена згідно із існуючими нормами,  $k_1 = 0.4$ , що відповідає практиці згідно із існуючим підходом, то зменшення витрат внаслідок використання запропонованих математичних моделей під час оцінювання протипожежних

відстаней між будинками залежність величини коефіцієнту відносних витрат на одиницю площі прибудинкової території можна продемонструвати на рисунку 7.8.

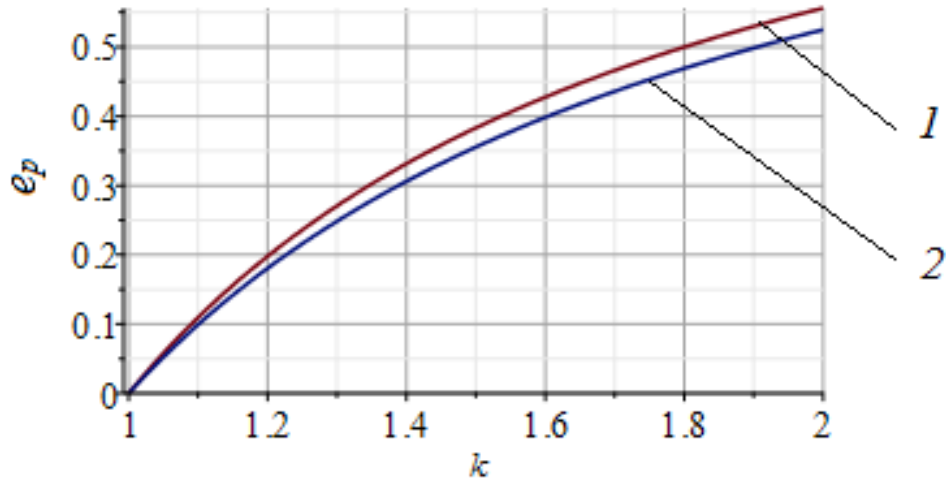


Рисунок 7.8 – Залежність величини коефіцієнту зниження відносних витрат на одиницю площі прибудинкової території від коефіцієнта запропонованого розрахункового методу

Залежність, що наведена на рисунку 7.8 для двох значень коефіцієнту відношення довжини до ширини будинку, крива 1 – для  $s = 10$ , крива 2 – для  $s = 1$ , показує незначний вплив цієї величини, тому, задавши  $s = 3$ , що відповідає середньостатистичному значенню, отримаємо формулу у кінцевому вигляді:

$$e_p = \frac{(k-1)((k+1)\sqrt{k_i(4k_i+12)}+4k_i(k-1))}{(\sqrt{k_i(4k_i+12)}+4k_i)k^2} \quad (7.49)$$

Тоді величина відносних витрат на прибудинкову територію може бути визначена за формулою:

$$E = 1 - e_p \quad (7.50)$$

В очікуваному діапазоні значень коефіцієнт раціоналізації протипожежної відстані між суміжними будинками ( $k=1\dots 2$ ) можна визначити за формулою 7.43, в такому випадку величину відносних витрат можна визначити із графіку, що наведений на рисунку 7.9.

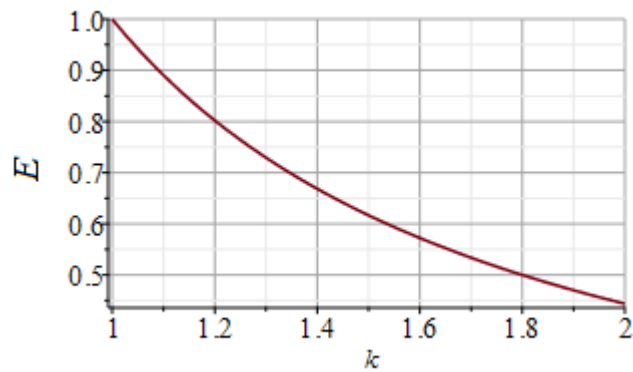


Рисунок 7.9 – Величина відносних витрат на прибудинкову територію від коефіцієнта раціоналізації відстані між будинками

Згідно із статистичними даними [316] вартість 1 м<sup>2</sup> землі у Києво-Святошинському районі Київської області становить близько 500 грн. Площа забудови, Києво-Святошинському району Київської області становить 7,2 км<sup>2</sup>. Результати розрахунків представлені у таблиці 7.16.

Таблиця 7.16 – Результати розрахунків визначених параметрів

| №<br>п/п | Найменування параметра                                                                                                       | Розрахункове значення<br>параметра |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                                                            | 3                                  |
| 1.       | Середні збитки від однієї пожежі, під час якої мало місце поширення пожежі між суміжними об'єктами продовж року ( $Z_{c1}$ ) | 139,5 тис. грн.                    |
| 2.       | Середні збитки від однієї пожежі продовж року ( $Z_{c2}$ )                                                                   | 45,8 тис. грн.                     |

Продовження таблиці 7.16

| 1  | 2                                                                                                                                                    | 3                                                                                                                                                                       |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3. | Економічний ефект, що досягається за рахунок запобігання можливих втрат від пожежі, що поширюється від одного будинку на інший ( $E_1$ )             | 93,7 тис. грн.                                                                                                                                                          |
| 4. | Коефіцієнт раціоналізації протипожежної відстані між суміжними будинками ( $k$ )                                                                     | - табличний метод – 1,1<br>- спрощений метод – 1,3<br>- рівняння нестационарного теплообміну – 1,6<br>- польовий метод – 1,8                                            |
| 5. | Економічний ефект, що досягається за рахунок більш раціонального використання земельних ресурсів, що виділяються під будівництво ( $E_2$ )           | - табличний метод – 0,36 млн. грн.<br>- спрощений метод – 9,72 млн. грн.<br>- рівняння нестационарного теплообміну – 15,12 млн. грн.<br>- польовий метод – 18 млн. грн. |
| 6. | Максимальний економічний ефект, який можливо досягти із використанням запропонованого розрахункового методу порівняно із існуючими підходами ( $E$ ) | 18 млн. грн. на одну пожежу, продовж року під час якої мало місце поширення вогню між суміжними об'єктами                                                               |

### 7.7 Висновки за розділом

Результати досліджень, що наведені у цьому розділі дозволяють зробити такі висновки:

1. Шляхом проведення чисельного експерименту з використанням математичних моделей обчислювальної газо-гідродинаміки виявлено закономірність залежності мінімальних безпечних відстаней для суміжних будівельних об'єктів у випадку пожежі у будинку з негорючим та горючим фасадом, а також на технологічних установках із використанням горючих рідин, що залежить від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги,

коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання у вигляді регресійної залежності:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3.$$

2. На основі виявлених закономірностей побудовані таблиці безпечних відстаней у залежності від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання для реалізації спрощеного табличного методу розрахунку.

3. Розроблено методологічну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти шляхом створення структурних схем-методів, що разом складають ієрархічну структуру та є теоретичною основою для створення відповідної нормативної бази.

4. Запропонований підхід щодо оцінювання протипожежних відстаней в порівнянні з чинним нормативним методом дає можливість досягнення економічного ефекту: в 1,2 рази у випадку використання запропонованого табличного методу; в 1,4 рази у випадку використання спрощених моделей; в 1,75 рази у випадку використання моделі на основі рівняння нестационарного теплообміну; у 2 рази у випадку використання польової моделі. Загальна сума економічного ефекту, яку можна досягти у випадку використання польової моделі складає близько 18 млн. грн. для площі забудови Києво-Святошинського району Київської області продовж одного року.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням наведено розв'язання актуальної наукової проблеми розкриття закономірностей параметрів теплообміну між факелом пожежі та будівельними об'єктами, що являється науковими основами для розрахункового обґрунтування протипожежних відстаней між такими об'єктами при їх проектуванні та експлуатуванні і слугують теоретичною базою для прогнозування небезпеки поширення пожеж від одного об'єкту на інший, при цьому одержано такі наукові і практичні результати:

1. За результатами проведеного аналізу літературних джерел щодо сучасного стану розрахункових методів обґрунтування безпечних протипожежних відстаней між об'єктами будівництва та прогнозування небезпеки поширення пожеж між такими об'єктами виявлено, що існуюча методологічна розрахункова база потребує нового підходу, який би надав стандартизованим методам параметричної складової за рахунок використання сучасних математичних підходів та комп'ютерних технологій.

2. Обґрунтовано сценарії виникнення та розвитку пожеж, при яких має місце поширення пожежі на сусідній будинок, а також перелік найбільш значущих параметрів щодо прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання. На основі параметрів пожежної навантаги запропонована відповідна класифікація будинків за чотирма рівнями: безпечні, малонебезпечні, небезпечні, високонебезпечні.

Запропонований новий підхід щодо критеріїв небезпеки поширення пожежі, який полягає у фіксації небезпечної температури появи полум'я на суміжному об'єкті та враховує природу матеріалів його пожежної навантаги. В якості такого критерію має використовуватись температура займання матеріалів, що піддаються тепловому впливу з боку факелу пожежі, на

суміжному об'єкті. За тих умов можна використовувати загальний підхід заснований на використанні альтернативних чинним нормам розрахункових методів, які мають ієрархічну структуру.

3. Обґрунтований набір математичних моделей, що дозволяє прогнозувати небезпеку поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти, таких як газо-гідродинамічна модель з урахуванням найбільш значущих факторів поширення пожежі, модель на основі рівняння променистого теплообміну і показана їх гнучкість та універсальність на прикладі таких об'єктів, як житловий будинок, автозаправна станція, виробництво біогазу. При цьому, показано, що обрані параметри, а саме: теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалість опромінювання впливають на значення температури на поверхні елементів будинків, що опромінюються від осередку пожежі, визначення яких дозволило обґрунтувати безпечну протипожежну відстань на прикладі житлового будинку та автозаправної станції, яка склала 22,8 м (згідно чинних норм – 40 м), а під час розрахунку ферментаторів для виробництва біогазу – 20 м (норми відсутні).

4. Розроблено методику натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між факелом пожежі та суміжними об'єктами включаючи будинки та технологічні установки, в яких використовуються горючі рідини, що максимально наближені до реальних умов та проведені відповідні випробування.

Запропоновано нову принципову схему дослідження небезпечного теплового впливу пожежі на суміжний будинок з використанням зразків, що імітують даний будинок із врахуванням найбільш несприятливих умов.

5. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що:

- впродовж 10 хвилинного впливу факелу від модельного вогнища пожежі класу 55В зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d)=509-337,1d+81,5d^2-6,4d^3$ ;

- впродовж 30 хвилинного впливу факелу пожежі фрагменту будинку із негорючим фасадом зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d) = 883 - 629,25d + 160,25d^2 - 13,063d^3$ ;

- впродовж 60 хвилинного впливу факелу пожежі фрагменту будинку із горючим фасадом зміна температури на поверхні елементів суміжного об'єкту залежно від відстані описується поліноміальною залежністю 3-го порядку  $\Theta(d) = 589 + 194,083d - 140,5d^2 + 15,604d^3$ , де  $\Theta$  – температура, °C,  $d$  – відстань, м.

6. З використанням обґрунтованого набору моделей газогідродинаміки та з використанням програмного забезпечення FDS проведений чисельний експеримент, що імітує процес проведення випробування з модельним вогнищем пожежі класу 55В та фрагментом будинку із горючим та негорючим фасадами і показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 19 %, 16,9 %, 20 %, 17 °C, 12,2 °C, 8 °C відповідно, а критерій Фішера не перевищує критичних значень. Показано, що отримані моделі є адекватними, при цьому відносна похибка в порівнянні з експериментальними даними для модельного вогнища та фрагменту будинку склала 15 % та 20 % відповідно.

7. Шляхом проведення чисельного експерименту з використання математичних моделей обчислювальної газо-гідродинаміки виявлено закономірність залежності мінімальних безпечних відстаней для суміжних будівельних об'єктів у випадку пожежі у будинку з негорючим та горючим фасадами, а також на технологічних установках із використанням горючих рідин, що залежить від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання у вигляді лінійної (по кожному із параметрів) регресійної залежності.

8. На основі виявлених закономірностей побудовано таблиці безпечних відстаней залежно від теплоутворювальної здатності пожежної навантаги, коефіцієнту прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях та тривалості опромінювання для реалізації спрощеного табличного методу розрахунку.

Розроблено методологічну базу для розрахункового обґрунтування мінімальних безпечних протипожежних відстаней та прогнозування небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти шляхом створення структурних схем-методів, що разом складають ієрархічну структуру та є теоретичною основою для створення відповідної нормативної бази.

9. Запропонований підхід щодо оцінювання протипожежних відстаней в порівнянні з чинним нормативним методом дає можливість досягнення економічного ефекту: в 1,2 рази у випадку використання запропонованого табличного методу; в 1,4 рази у випадку використання спрощених моделей; в 1,75 рази у випадку використання моделі на основі рівняння нестационарного теплообміну; у 2 рази у випадку використання польової моделі. Загальна сума економічного ефекту, яку можна досягти у випадку використання польової моделі складає близько 18 млн. грн. для площі забудови Києво-Святошинського району Київської області продовж одного року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2009-2012 роки: статистичний збірник аналітичних матеріалів / Р.В. Климась, Д.Я. Матвійчук, А.В. Одинець, О.П. Якименко. – К.:УкрНДІЦЗ. – 2018. – С. 33-34.
2. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013-2016 роки: статистичний збірник аналітичних матеріалів / Р.В. Климась, Д.Я. Матвійчук, А.В. Одинець, Р.В. Уханський, О.П. Якименко. – К.:УкрНДІЦЗ. – 2018. – С. 34 – 35.
3. Ройтман М.Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве // Под общ. Ред. Проф. д-ра техн. наук Н.А. Стрельчука. – Москва: Стройиздат, 1969. – С. 480.
4. Звіт про дослідження пожежі, що виникла 15.09.2017 р. на території КПНЗ “Одеський міський дитячий оздоровчо-спортивний комплекс “Вікторія”, який розташовується за адресою: м. Одеса, вул. Дача Ковалевського, 93.
5. Новиков И.Т. Научно-технический прогресс в строительстве. – М.: Стройиздат, 1977. 198 с.
6. Постанова Кабінету Міністрів України від 20.12.2006 року № 1764 «Про затвердження Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд». Офіційний вісник України від 02.01.2007 — 2006 р., № 51, стор. 145, стаття 3415, код акта 38230/2006.
7. Регламент (ЄС) № 305/2011 Європейського парламенту та Ради від 09.03.2011 року, що встановлює гармонізовані умови для розміщення на ринку будівельних виробів та скасовує Директиву Ради 89/106/ЄЕС.
8. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. ДБН В.1.1.7-2016. – [Чинний від 2017-06-01]. – К.: Держбуд України, 2017. – 39 с. – (Державні будівельні норми України).
9. СНиП II-Н.1-62 «Генеральные планы сельскохозяйственных предприятий. Нормы проектирования» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293788/4293788154.pdf>.

10. Н 130-55 «Противопожарные нормы планировки сельских населенных мест» під редакцією В.Д. Кузакова, Л.А. Болховитинова та Р.Т. Смолякова». [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.normacs.ru/Doclist/doc/11A57.html>.

11. СН 116-55 Нормы и технические условия проектирования ферм крупного рогатого скота. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293781/4293781160.pdf>.

12. Планування та забудова територій. ДБН Б.2.2-12:2019 [Чинний від 2019-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2019. – 177 с. – (Державні будівельні норми України).

13. СНиП Склады лесных материалов. Противопожарные нормы проектирования. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://profidom.com.ua/v-2/v-2-2/1564-snip-2-11-06-91-sklady-lesnyh-materialov-protivopozharnyje-normy-projektirovanija>.

14. ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://profidom.com.ua/v-2/v-2-2/1529-vbn-v-2-2-58-2-94-rezervuari-vertikalni-stalevi-dla-zberiganna-nafti-i-naftoproduktiv-z-tiskom-nasichenih-pariv-ne-vishhe-93-3-kpa>.

15. Правила улаштування електроустановок. [Чинні від 2017-08-21]. – К.: Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. – 614 с. – (ПУЕ).

16. ВБН В.1.1-034-2003 Противопожарные нормы проектирования атомных электростанций с водоводяным энергетическим реактором. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://profidom.com.ua/v-1/v-1-1/1208-protivopozharnyje-normy-projektirovanija-atomnyh-elektrostantsij-s-vodo-vodanyimi-energeticheskimi-reaktorami>.

17. Peter Collier Method for determining safe separation distances between building in the event of fire / issn:0111-8161, 1996.

18. Наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417, зареєстрований в Міністерстві юстиції України за № 252/26697 05.03.2015 р. «Про

затвердження Правил пожежної безпеки в Україні». – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15>.

19. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 75, poz. 690 z późn. zm.).

20. Poradnik Bezpieczeństwo pożarowe budynków - Mercor 2005.

21. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania. ASTM E 1355-04, Standard Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Deterministic Fire Models, 2004.

22. K.B. McGrattan, B.W. Klein, S. Hostikka, and J.E. Floyd. Fire Dynamics Simulator (Version 5), User's Guide. NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, October 2007.

23. Friedman. Survey of Computer Models for Fire and Smoke. Technical report, Factory Mutual Research Corporation, Norwood, Massachusetts, March 1990.

24. H.C. Hottel. Stimulation of Fire Research in the United States After 1940 (A Historical Account) *Combustion Science and Technology*, 39:1–10, 1984.

25. BR187 External fire spread: building separation and boundary distances. - Building Research Establishment Report, - ISBN 0 85125 465 9 – 44 p.

26. Сайт. Режим доступу: <https://www.muratorplus.pl/biznes/prawo/nowe-warunki-techniczne-jakim-powinny-odpowiadac-budynki-i-ich-usytuowanie-dzial-vi-aa-vtJA-f7W5-Mf5k.html>.

27. Emil Carlsson, Report 5051 - External fire spread to adjoining buildings – A review of fire safety design guidance and related research - Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden, 1999 – 125 p.

28. NFPA 80A, Recommended Practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures - January 18, 2016 / National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02169-7471. – 30 p.

29. ASTM E84 - 17a Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials.
30. Dariusz Ratajczak, Odległości między budynkami wymagane z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe, „Ochrona Przeciwpożarowa” Nr 3/2003.
31. СП 42.13330.2011 (СНиП 2.07.01-89\*) «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200084712>.
32. СНБ 2.02.04-03 «Противопожарная защита населенных пунктов и территорий предприятий». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/3997855/snb-2.02.04-03-protivopozharnaya-zashhitanaselennyh-punktov-i>.
33. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М., Химия, 1990.
34. Piotr Tofilo / Fire Engineering Platform - A New Tool Package Addressing the Needs of Fire Protection Engineers. - 2016 – 7 p.
35. G.P. Forney and W.F. Moss. Analyzing and Exploiting Numerical Characteristics of Zone Fire Models. *Fire Science and Technology*, 14:49–60, 1994.
36. Boverket, Boverkets byggregler, BBR 94:3, Norstedts Tryckeri, Karlskrona, June 1995, In Swedish.
37. R. Peyret and T.D. Taylor. *Computational Methods for Fluid Flow*. Springer-Verlag, New York, 1983.
38. Dusica Pesic, Darko Zigar, Miomir Raos, Ion Anghel / Simulation of fire spread between residential buildings regarding safe separation distance ISSN 1330-3651.
39. BSI: Initiation and development of fire within the enclosure of origin, Application of Fire Safety Engineering Principles to the Design of Buildings, PD7974-1, Part 1. British Standards Institution, London, 2003.

40. McGrattan, K.; Baum, H.; Rehm, R.; Mell, W.; McDermott, R. Fire dynamics simulator (Version 5) technical reference guide. NIST Special Publication 1018-5, Gaithersburg, 2010.
41. G.P. Forney. User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. NIST Special Publication 1017-1, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, August 2007.
42. Drysdale Dougal, An Introduction to Fire Dynamics, Department of Fire Safety Engineering, University of Edinburgh, 1987.
43. Jönsson R., Frantzich H., Karlsson B., Magnusson S.E., Ondrus J., Pettersson O., Bengtsson S., Osterling T., Thor J., Brandskydd – Teori och Praktik, Brandskyddslaget, LTH-Brandteknik, Stockholm, 1994, In Swedish.
44. Методика натурних вогневих випробувань теплоізоляційно-оздоблювальних систем зовнішніх стін будинків і споруд на поширення вогню. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://undicz.dsns.gov.ua/files/docs/Metod\\_TOS.pdf](https://undicz.dsns.gov.ua/files/docs/Metod_TOS.pdf).
45. CEN/TS 54-14:2018 Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 14. Настанови щодо побудови, проектування, монтажних робіт, введення в експлуатацію, експлуатування і технічного обслуговування.
46. Пожарная профилактика в строительстве / [Грушевский Б.В., Яковлев А.И., Кривошеев И.А. и др.] под ред. В.Ф. Кураленки-на. – М.: ВИПТИШ, 1985. – 451 с.
47. R.G. Rehm and H.R. Baum. The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows. Journal of Research of the NBS, 83:297–308, 1978.
48. W.W. Jones. A Review of Compartment Fire Models. NBSIR 83-2684, National Bureau of Standards (now NIST), Gaithersburg, Maryland, 1983.
49. J.P. Holman. Heat Transfer. McGraw-Hill, New York, 5th edition, 1989.
50. F.P. Incropera and D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, New York, 4th edition, 1996.

51. R. Siegel and J. R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor & Francis, New York, 4th edition, 2002.
52. P.J. DiNenno, editor. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.
53. D. Drysdale. An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 2002.
54. J.G. Quintiere. Principles of Fire Behavior. Delmar Publishers, Albany, New York, 1998.
55. J. Quintiere. A Perspective on Compartment Fire Growth. Combustion Science and Technology, 39:11–54, 1984.
56. E.S. Oran and J.P. Boris. *Numerical Simulation of Reactive Flow*. Isevier Science Publishing Company, New York, 1987.
57. Лазаренко О.В. Дослідження захисних водяних завіс генерованих насадками РВ-12 та НРТ-5. Пожежна безпека теорія і практика. 2015. Вип. 19. С. 76 – 80.
58. V. Babrauskas. *Ignition Handbook*. Fire Science Publishers, Issaquah, Washington USA, 1st edition, 2003. Co-published by the Society of Fire Protection Engineers.
59. J.H. Ferziger and M. Peric. ' *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Berlin, 2<sup>nd</sup> edition, 1999. R.W. Bilger. Turbulent Diffusion Flames. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 21:101 – 135, 1989.
60. F.P. Incropera and D.P. De Witt. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley and Sons, New York, 4th edition, 1996.
61. R. Siegel and J. R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor & Francis, New York, 4th edition, 2002.
62. P.J. DiNenno, editor. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002.
63. D. Drysdale. An Introduction to Fire Dynamics. John Wiley and Sons, New York, 2nd edition, 2002.

64. J.G. Quintiere. Principles of Fire Behavior. Delmar Publishers, Albany, New York, 1998.
65. J. Smagorinsky. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment. Monthly Weather Review, 91(3):99 – 164, March 1963.
66. J.W. Deardorff. Numerical Investigation of Neutral and Unstable Planetary Boundary Layers. Journal of Atmospheric Sciences, 29:91–115, 1972.
67. M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W.H. Cabot. A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. Physics of Fluids A, 3(7):1760–1765, 1991.
68. Лобода Е.А. Экспериментальные методы исследования процессов теплопереноса и ИК-диагностики: Учебно-методическое пособие. Томск: Издательский дом томского государственного университета, 2017. С. 41.
- 69.** Ніжник В.В. Активная противопожарная защита деревянных конструкций куполов церквей с применением огнетушащих веществ / С.В. Жартовский, В.В. Ніжник., Р.В. Уханський. – Пожаровзрывобезопасность. М.: Пожнаука 4 – 2013 с. 65 – 94.
70. S.B. Pope. Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flows. New Journal of Physics, 6:1–24, 2004.
71. H.R. Baum, K.B. McGrattan, and R.G. Rehm. Three Dimensional Simulations of Fire Plume Dynamics. Journal of the Heat Transfer Society of Japan, 35(139):45 – 52, 1997.
72. I.K. Puri and K. Seshadri. Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air. Combustion and Flame, 65:137 – 150, 1986.
73. C.K. Westbrook and F.L. Dryer. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. Combustion Science and Technology, 27:31 – 43, 1981.
74. W. Grosshandler. RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment. NIST Technical Note TN 1402, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1993.

75. K. Prasad, C. Li, K. Kailasanath, C. Ndubizu, R. Ananth, and P.A. Tatem. Numerical modelling of methanol liquid pool fires. *Combustion Theory and Modelling*, 3:743 – 768, 1999.
76. Чистяков С.Ф., Радун Д.В. Теплотехнические измерения и приборы. – М: Высшая школа, 1972. – 387 с.
77. Данишевский С.К., Сведе-Швец И.И. Высокотемпературные термопары. – М.: Металлургия, 1977. – 231 с.
78. G. Heskestad and R.G. Bill. Quantification of Thermal Responsiveness of Automatic Sprinklers Including Conduction Effects. *Fire Safety Journal*, 14:113 – 125, 1988.
79. P. Ruffino and M. di Marzo. Temperature and Volumetric Fraction Measurements in a Hot Gas Laden with Water Droplets. *Journal of Heat Transfer*, 125(2):356 – 364, April 2003.
80. P. Ruffino and M. di Marzo. The Effect of Evaporative Cooling on the Activation Time of Fire Sprinklers. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*, pages 481–492. International Association for Fire Safety Science, 2002.
81. F. Gavelli, P. Ruffino, G. Anderson, and M. di Marzo. Effect of Minute Water Droplets on a Simulated Sprinkler Link Thermal Response. NIST GCR 99-776, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, July 1999.
82. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
83. G.W. Mulholland and C. Croarkin. Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke. *Fire and Materials*, 24:227–230, 2000.
84. T.S. Chan. Measurements of Water Density and Droplet Size Distributions of Selected ESFR Sprinklers. *Journal of Fire Protection Engineering*, 6(2): 79 – 87, 1994.
85. H.Z. Yu. Investigation of Spray Patterns of Selected Sprinklers with the FMRC Drop Size Measuring System. In *Fire Safety Science – Proceedings of*

the First International Symposium, pages 1165 – 1176. International Association For Fire Safety Science, 1986.

86. T. Ravigururajan and M. Beltran. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets. *Fire Safety Journal*, 15:171–181, 1989.

87. A. Tuntomo, C. Tien, and S. Park. Optical Constants of Liquid Hydrocarbon Fuels. *Combustion Science and Technology*, 84:133–140, 1992.

88. A. Hamins and K.B. McGrattan. Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a RackStorage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium*, pages 457–468. International Association for Fire Safety Science, 2002.

89. Дослідження адекватності методів розрахунку теплового потоку випромінювання від палаючого штабеля з деревиною / В.І. Желяк та ін. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. №13. С.28 – 31.

90. Рекомендации по тушению пожаров на открытых складах лесоматериалов. - М.: ВНИИПО МВД России, 1995. – 76 с.

91. Гундар С.В., Подгрушный А.В. О защите штабелей лесоматериалов от теплового излучения при пожарах на открытых складах // Докл. Тринадцатой научно-технич. конф. «Системы безопасности СБ-2004». – М.: АГПС МЧС России, 2004. – С. 187 – 189.

92. Дослідження параметрів горіння біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом / Т.М. Скоробагатько та ін. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2015. №2 (32). С. 95 – 100.

93. A. Hamins and K.B. McGrattan. Reduced-Scale Experiments to Characterize the Suppression of Rack Storage Commodity Fires. NISTIR 6439, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1999.

94. W.J. Wiscombe. Improved Mie Scattering Algorithms. *Applied Optics*, 19(9):1505–1509, 1980.

95. T. Cleary, A. Chernovsky, W. Grosshandler, and M. Anderson. Particulate Entry Lag in Spot-Type Smoke Detectors. In *Fire Safety Science –*

Proceedings of the Sixth International Symposium, pages 779–790. International Association for Fire Safety Science, 1999.

96. Дунюшкін В.О. Дослідження параметрів горіння модельних вогнищ класу А / Дунюшкін В.О., Огурцов С.Ю., Цимбалістий С.З. // Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал. – К., УкрНДІПБ МНС України, 2011, № 1(23). – С. 37 – 47.

97. Техніка пожежна. Установки порошкового пожежогасіння. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. ДСТУ 3972–2000. [Чинний від 2001-01-01.] – К.: Держстат, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).

98. ТУ У 29.2-00230668-007:2008. Модулі пожежогасіння тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами МПГ ТВВР-0,05-1,6-00 та МПГ ТВВР-0,05-1,6-01. Технічні умови.

99. Провести пошукові експериментальні дослідження впливу параметрів та стану зразків деревини на показники пожежної небезпеки та характеристики горіння модельних вогнищ: Звіт про НДР. – К.: УкрНДІПБ, 1998.

100. K.B. McGrattan, R.G. Rehm, and H.R. Baum. Fire-Driven Flows in Enclosures. *Journal of Computational Physics*, 110(2):285 – 291, 1994.

101. Дунюшкін В.О., Огурцов С.Ю. Проведення досліджень процесів транспортування та подавання вогнегасного порошку системами порошкового пожежогасіння // Науковий вісник УкрНДІПБ: Журнал. – К., 2009. – № 2 (20). – С. 5–12.

102. G.M. Hale and M.R. Querry. Optical constants of water in the 200 nm to 200  $\mu$ m wavelength region. *Applied Optics*, 12(3):555–563, 1973.

103. N. Cheremisinoff. *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Volume 3: Gas-Liquid Flows. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1986.

104. H.Z. Yu, J.L. Lee, and H.C. Kung. Suppression of Rack-Storage Fires by Water. In *Fire Safety Science – Proceedings of the Fourth International Symposium*, pages 901–912. International Association For Fire Safety Science, 1994.

105. C. Beyler. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Flammability Limits of Premixed and Diffusion Flames. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th edition, 2008.
106. N. Takahashi, H. Koseki, and T. Hirano. Temporal and Spatial Characteristics of Radiation from Large Pool Fires. Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, 49(1):27–33, 1999.
107. C. Lautenberger and C. Fernandez-Pello. Generalized pyrolysis model for combustible solids. Fire Safety Journal, 44:819–839, 2009.
108. W. Yang, T. Parker, H.D. Ladouceur, and R.J. Kee. The Interaction of Thermal Radiation and Water Mist in Fire Suppression. Fire Safety Journal, 39:41–66, 2004.
109. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. Journal of Chongqing University, 28, 122.
110. Zhang, D., Xue, W. (2010). Effect of Heat Radiation on Combustion Heat Release Rate of Larch. Journal of West China Forestry Science, 39, 148.
111. X. Hu, Z. Wang, F. Jia, E.R. Galea, and M.K. Patel. Simulating Smoke Transport in Large Scale Enclosure Fires Using a Multi-Particle-Size Model. In Fire Safety Science – Proceedings of the 10th International Symposium, pages 445–458, University of Maryland, College Park, Maryland, USA, 2011.
112. H.R. Baum, O.A. Ezekoye, K.B. McGrattan, and R.G. Rehm. Mathematical Modeling and Computer Simulation of Fire Phenomenon. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 6:125–139, 1994.
113. G. Continillo, F.M Denaro, and F.S. Marra. Accuracy and Stability Analysis of Time-Integrated Schemes for Advection-Diffusion-Reaction Equations. In Seventh International Conference on Numerical Combustion, page 99, 1998.
114. WW. Zhang, N. Ryder, R.J. Roby, and D. Carpenter. Modeling of the Combustion in Compartment Fires Using Large Eddy Simulation Approach. In Proceedings of the 2001 Fall Technical Meeting, Eastern States Section. Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, December 2001.

115. Skinner, A. J., Lambert, M. F. (2006). Using Smart Sensor Strings for Continuous Monitoring of Temperature Stratification in Large Water Bodies. *IEEE Sensors Journal*, 6 (6), 1473 – 1481.
116. Kluz T. The fire resistance of prestressed concrete: concrete and constructional Engineering, 1959. – № 7. – P. 231 – 241.
117. Домокеев А. Г. Строительные материалы : учеб. [для строит. спец. вузов инж.-пед. профиля] / А. Г. Домокеев. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М. : Высшая школа, 1989. – 495 с.
118. Ахвердов И. Н. Моделирование напряженного состояния бетона и железобетона / И. Н. Ахвердов, А. Е. Смольский, В. В. Сточеляс. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1973. – 232 с.
119. R.A. Sweet. Direct Methods for the Solution of Poisson's Equation on a Staggered Grid. *Journal of Computational Physics*, 12:422–428, 1973.
120. G.D. Raithby and E.H. Chui. A Finite-Volume Method for Predicting Radiant Heat Transfer in Enclosures with Participating Media. *Journal of Heat Transfer*, 112(2): 415–423, 1990.
121. J.Y. Murthy and S.R. Mathur. Radiative Heat Transfer in Axisymmetric Geometries Using an Unstructured Finite-Volume Method. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 33:397–416, 1998.
122. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности : учебное пособие / В. И. Егоров. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
123. Дослідження адекватності математичної моделі тепломасообміну випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій / О. М. Нуянзін, С. В. Поздєєв, В. М. Андрієнко [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2013. – № 13. – С. 91 – 100.
124. Зенков Н. И. Строительные материалы и поведение их в условиях пожара : учеб. [для слуш. вузов по спец. «Инженер противопожарной техники и безопасности»] / Н. И. Зенков. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1974. – 176 с.

125. Шкловер А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий /А.М. Шкловер, Б.Ф. Васильев, Ф.В. Ушков. – М.: Стройиздат, 1956. – 350 с.

126. Табунщиков Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.

127. Нагорная А.Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий: диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.18 / Нагорная Анастасия Николаевна; [Место защиты: Юж.-Ур. гос. ун-т].- Челябинск, 2008.- 150 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/398.

128. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / [Ройтман М.Я., Комиссаров Е.П., Пчелинцев В.А.] под ред. Ю.А. Кошмарова.- М.: ВИПТШ, 1977. –415 с.

129. Пожарная профилактика в строительстве / [Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П.] под ред. Ф.А. Аммосова.- М.: Стройиздат, 1978. – 363 с.

130. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. МДС 21.2-2000 [Введен в действие 2000-01-01]. – М.: Стройиздат, 2000. – 49 с. – (Национальный стандарт РФ).

131. Некора О.В. Розрахунково-експериментальний метод визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 «Пожежна безпека» / Ольга Валеріївна Некора ; Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. – Черкаси, 2008. – 147 с.

132. Нуянзін О. М. Дослідження впливу конструкції вимірювальної арматури вогневих печей на адекватність результатів випробувань на вогнестійкість / О. М. Нуянзін, С. В. Поздєєв // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 9. – С. 99–105.

133. S.H. Kim and K.Y. Huh. Assessment of The Finite-Volume Method and The Discrete Ordinate Method for Radiative Heat Transfer In a Three-Dimensional Rectangular Enclosure. Numerical Heat Transfer, Part B, 35:85–112, 1999.
134. Грушевський Б., Романенко П., Ройтман М., Ракитянський В. Інтенсивність випромінювання і протипожежні розриви. «Пожарне дело», 1966, № 9.
135. Mizner G.A. Comb. Sci. and Techn. / G.A. Mizner, J.A. Eyre. – 1983. – 32 V. 35. – P. 33.
136. Фомин С. Л. Моделирование тепло- и влагопереноса в железобетонных конструкциях при воздействии климатической, технологической и пожарной сред / С. Л. Фомин // Электронное моделирование. – 1999. – Т. 21. – № 4. – С. 28 – 32.
137. Lie T. T. Characteristic temperature curves for various fire severities / T. T. Lie // «Fire Tachnol». – 1974, 10. – № 4. – P. 315–326.
138. Геращенко О.А. Основы теплотермії. К.: Наукова думка, 1971, с. 15.
139. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В. М. Ройтман. – М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
140. Ройтман В. М. Возможности прогнозирования и регулирования огнестойкости строительных материалов и конструкций на основе кинетического подхода / В. М. Ройтман // Пути повышения огнестойкости строительных материалов и конструкций. – М. : Знание, 1982. – С. 376.
141. Страхов В. Л. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования / В. Л. Страхов, А. Н. Геращенко // Строительные материалы. – 2002. – № 6. – С. 2 – 5.
142. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT) ДСТУ-Н Б EN 1991-1-

2:2010, [Чинний від 01.07.2013] Мінрегіонбуду України від 27.12.2010 р. № 549 – 74 с. (Національний стандарт України).

143. Макаров Г.В. Охрана труда в химической промышленности / Г.В. Макаров, Н.А. Стрельчук, В.П. Кушелев // М.: Химия. – С. 496.

144. Методика оценки пожаробезопасных расстояний при проектировании промышленных предприятий. – Методическое пособие. – Москва. – 2016. – С. 225.

145. Rubini P. SOFIE – Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 Users guide, School of Mechanical Engineering, Granfield University (UK), 2000.

146. Gerhardt H. Design Method of Smoke and Heat exhaust Systems in construction Works / H. Gerhardt // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 127 – 140.

147. Sundstrom B. Test Methods and Their use for Fire Safety Engineering / B. Sundstrom // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 141 – 150.

148. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants / Joaquim Casal. – Industrial Safety Series. –V. 8. – Elsevier, 2008. – 117 p.

149. Thomas P.H. The size of flames from natural fires / P.H. Thomson // Proc. Combust. Inst., 1963. – V.9. – P. 844.

150. Fishman G.S. Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications / G.S.Fishman. - New York: Springer, 1996. - 698 p. - (Springer series in operations research).

151. Нуянзін В. М. Вплив кліматичних факторів на вогнестійкість залізобетонних колон : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 02 «Пожежна безпека» / Віталій Михайлович Нуянзін ; Держ. інспек. техноген. безпеки України, Укр. НДІ цив. захисту. – К., 2013. – 123 с.

152. Григорьян Б. Б. Огнестойкость сжатых железобетонных элементов при температурных режимах, близких к реальным : дисс. канд. техн. наук: 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» / Борис

Бахшиевич Григорьян ; Харьковский гос. технический ун-т строительства и архитектуры. – Х., 2001. – 168 с.

153. Фомін С. Л. Робота залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук : 21.06.02 «Пожежна безпека» / С. Л. Фомін ; Харківська державна академія залізничного транспорту. – Харків, 1997. – 38 с.

154. Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа ; пер. с франц. М. В. Предтеченского. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

155. Романенков И. Г. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов / И. Г. Романенков, В. Н. Зигерн-Корн. – М.: Стройиздат, 1984. – 240 с.

156. Дерев'янюк І.Г. Визначення та прогнозування небезпечних факторів пожежі. / І.Г. Дерев'янюк, Ю.М. Сенчихін, А.Я. Шаршанов // Практ. Посібник. –АЦЗУ. –2006. – С. 88.

157. Law Margaret. Predication of fire resistance. «Fire-Resistance Requirements Build - New Approach. Proc. Symp., London, 1971" London, 1973. – P. 15 – 29.

158. Lie T. T. Processus du development et estimation de l'importance d'une incendie / T. T. Lie // «Rev. techn.». – 1973. – № 133. – P. 30 – 36.

159. Krukovsky P. Fire Safety Analysis for new Safe confinement's Building Constructions of Chernobyl NPP / P. Krukovsky // Materiały V Międzynarodowy Konferencji «Bezpieczeństwo pożarowe budowli». – 2005. – С. 223 – 227.

160. Petterson O. S-E Magnusson, Lorgen Tohr-Fire engineering Design of Stee. Structures, are SBI, 1976. – P. 64 – 72.

161. Кошмаров Ю. А. Новые методы расчета огнестойкости и огнезащиты современных зданий и сооружений / Ю. А. Кошмаров // Пожарная безопасность. – 2002. – № 2. – С. 91 – 98.

162. Поздеев С. В. Методика определения режимов нагрева бетонных образцов, моделирующих состояние элементов строительных конструкций при пожаре / С.В. Поздеев, О.В. Некора, А.В. Поздеев // Проблемы пожарной безопасности. – Х. : АГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 111 – 116.

163. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А.Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1998. – 304 с.

164. Фомин С. Л. Огнестойкость центрально сжатых железобетонных элементов / С. Л. Фомин, О. А. Стельмах, Джафар Шакер Шахин // Сб. пожарной безопасности. Организационно-техническое обеспечение. – Х.: ХИПБ МВД Украины, 1996. – С. 78 – 81.

165. Басманов А.Е. Теоретические основы предупреждения каскадного распространения пожара в резервуарных парках с нефтепродуктами и повышение эффективности его ликвидации: Дис. ... доктора тех.наук: 21.06.02.

166. Милованов А. Ф. Расчет жаростойких железобетонных конструкций / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1975. – 128 с.

167. Мурашев В. И. Железобетонные конструкции. Общий курс / В. И. Мурашев, Э. В. Сигалов, В. Н. Байков ; под ред. П. Л. Пастернака. – М. : Госстройиздат, 1962. – 658 с.

168. Климов Ю. А. Современные тенденции развития мирового железобетона / Ю. А. Климов // Матеріали II-ї Всеукр. наук.-техніч. конференції «Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону». – К. : НДІБК, 1999. – Вип. 50. – С. 12 –18.

169. Mehlig B. A global-update simulation algorithm / B.Mehlig, D.W.Heermann, B.M.Forrest. - Heidelberg, 1991. - 8 p.

170. Symposium on Monte Carlo methods. Held at the University of Florida. Conducted by Statistical laboratory. Sponsors by Wright air development center of the Air research and development command. March 16 and 17, 1954 / Ed. By.

171. Техническое регулирование в строительстве. Аналитический обзор мирового опыта [Текст]: Snip Innovative Technologies; рук. Серых А. – Чикаго: SNIP, 2010. – 889 с.: ил.

172. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою ДСТУ Б В.1.1-36:2016, [Чинний від 01.01.2017] Мінрегіонбуду України від 15.06.2016 р. № 158 – 31 с. (Національний стандарт України).

173. *Fire Models* S. M. An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke / S. M. Olenick, D. J. Carpenter // *Journal of Fire Protection Engineering*. – 2003. – № 13. – S. 87 – 110.

174. Снегирёв А. Ю. Моделирование тепломассообмена и горения при пожаре : дисс. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» / Александр Юрьевич Снегирёв ; Государственная служба гражданской авиации МТ РФ, Академия гражданской авиации. – СПб., 2004. – 270 с.

175. Friedman R. An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke /Raynold Friedman // *Journal of Fire Protection Engineering*. - 1992. - Vol.4. №3. - P.81-92.

176. Lewis M.J. Field Modeling of Non-Charring Flame Spread / M.J. Lewis, P.A. Rubini, J.B. Moss // *Fire Safety Science : proceeding of the sixth international symposium*. – 1999.

177. Hadjisophocleous, G.V. Computer Modeling of Compartment Fires / G.V. Hadjisophocleous, M. Cacambourus // *Journal of Fire Protection Engineering*. - 1993. - Vol.5. – № 2. – P.39 – 52.

178. Milarcik E. L An Analysis of the Performance of Residential Smoke Detection Technologies Utilizing the Concept of Relative Time / E. L. Milarcik, S. M. Olenick, R. J. Roby // *The National Fire Protection Research Foundation Suppression and Detection Research and Applications Symposium (SUPDET)*, March, 2007. (2007 Carey award).

179. Химическая гидродинамика: справочное пособие / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрянов и др. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.
180. Chang Ch., Banks D., Meroney R. N., Computational Fluid Dynamics Simulation of the Progress of Fire Smoke in Large Space, Building Atria, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 151 – 157 (2003).
181. Jia F. The Prediction of Fire Propagation in Enclosure Fires / F. Jia, E.R. Galea, M.K. Patel // Fire Safety Science : proceeding of the fifth international symposium. - 1997. - P.439 - 450.
182. Хасанов И. Р. Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования / И.Р. Хасанов, В. И. Голованов // Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России / под общей редакцией Н. П. Копылова. – М. : ВНИИПО, 2007. – С. 121 – 158.
183. Anderson John D. (1995) Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications. Science/Engineering/Math. McGraw-Hill Science
184. Сохацький А. В. Порівняння нових та відомих методик розв'язку рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії в криволінійній неортогональній системі координат / А. В. Сохацький // Придніпровський науковий вісник. – Дніпропетровськ : Дніпропетровський державний університет. – 1996. – № 4. – С. 20.
185. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість / С. В. Поздєєв, О. М. Тищенко, О.М. Нуянзін [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБ, 2011. – № 8. – С. 73 – 79.
186. Сохацький А. В. Неявна факторизована схема апроксимації рівнянь Нав'є – Стокса в змінних вихор-функція течії // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1996. – С. 51.
187. Башкирцев М. П. Исследование температурного режима при пожарах в зданиях на моделях / М. П. Башкирцев, П. Н. Романенко,

Н. А. Стрельчук // Труды Высшей школы МООП РСФСР. – М. : НИиРИО ВШ МООП РСФСР, 1966. – Вып. 13. – С. 33 – 53.

188. Заславський Б.Л. Застосування чисельного моделювання для вибору аеродинамічної форми транспортних засобів / Б. Л. Заславський, О. А. Приходько, А. В. Сохацький // Праці 3-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. – Львів : ЛДУ «Львівська політехніка», 1997. – С. 191 – 192.

189. Сохацький А.В. Застосування моделі турбулентності для розрахунку обтікання колового циліндру / А. В. Сохацький // Методы дискретных особенностей в задачах аэродинамики, электродинамики и теории дифракции. – К. : Институт математики НАН Украины, 1997. – С. 143 – 146.

190. Заславський Б.Л. Расчет обтекания кругового цилиндра с использованием k-ε модели турбулентности / Б. Л. Заславський, О. А. Приходько, А.В. Сохацький // Прикладные проблемы механики жидкости и газа. – Севастополь : Сев. ГТУ, 1997. – С. 80.

191. Patankar Suhas. (1980) Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Series on Computational Methods in Mechanics and Thermal Science. Taylor & Francis. ISBN 0-89116-522-3.

192. Shah, Tasneem M. An analysis and comparison of tube natural frequency modes with fluctuating force frequency from the thermal cross-flow fluid in 300 MWe PWR / Shah, Tasneem M.; Sadaf Siddiq, Zafar U. Koreshi / International Journal of Engineering and Technology 9 (9): 201 – 205.

193. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4. Руководство пользователя. – М. : ТЕСИС, 2008. – 284 с.

194. Химическая гидродинамика : справочное пособие / А. М. Кутепов, А. Д. Полянин, З. Д. Запрянов и др. – М. : Квантум, 1996. – 336 с.

195. Rehm R. G. Baum H. R. Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – Vol. 83. – 1978. – №3. – P. 297 – 308.

196. CFAST Technical Reference Manual, Natl. Inst. Stand. Technol. Spec. Pub. 1026, 126 pages (December 2005), <http://fast.nist.gov/Documents/S102.pdf>.
197. Ryzhov A.M. Numerical Simulation of Fires in Compartments / A.M. Ryzhov // III Proceedings of the Russian-Japanese seminar on combustion / The Russian section of the Combustion Institute. - 1993. – P.85 – 86.
198. Ошовский В. В. Использование компьютерных систем конечно-элементного анализа для моделирования гидродинамических процессов / В.В. Ошовский, Д. И. Охрименко, А. Ю. Сысоев // Наукові праці ДонНТУ. – Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2010. – Вип. 15 (163). – С. 163 – 173.
199. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. – М. : ДМК Пресс, 2006. – С. 240.
200. Ansys Release 10, inc. Theory Reference.
201. Kuzmin D., Course: Introduction to Computational Fluid Dynamics, Institute of Applied Mathematics University of Dortmund.
202. Яковлев А. И. Расчетная оценка поведения железобетонных колонн при режимах пожара, отличных от «стандартного». Тепло- и массообмен в технологических процессах производства и при пожарах / А.И. Яковлев, Б. Б. Григорян // Сб. научн. тр. ВИПТШ МВД СССР. – М., 1983. – С. 147 – 153.
203. Гупало О. В. Методика розрахунку теплової роботи печі безперервної дії з розподіленням підведенням і відведенням газоподібного палива / О. В. Гупало, Н.Є. Василенко, Д. С. Пономаренко // Metallургическая теплотехника. – 2010. – Вып. 2 (17). – С. 65 – 71.
204. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2 : Design of concrete structures – Part 1-2 : General rules – Structural fire design, Brussels 2004.
205. Harmathy T. Z. The fire resistance test and its relation to real world fires / T. Z. Harmathy // Fire and Materials. – 1981. – Vol. 5. – № 3. – P. 59 – 65.
206. Олимпиев В. Г. Исследование прочностных и деформативных свойств тяжелого силикатного бетона при воздействии высоких температур / В. Г. Олимпиев, Н. И. Зенков // Огнестойкость строительных конструкций :

сб. трудов ВНИИПО МВД СССР. – М. : ВНИИПО, 1975. – Вып. 3. – С. 24 – 36.

207. Метод конечных элементов в механике твердых тел / [А. С. Сахаров, В. М. Кислокий, В. В. Киричевский и др.] ; под ред. А. С. Сахарова, И. А. Альтенбаха. – К. : Вища школа ; Лейпциг : ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.

208. Черный С. Г. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей / С.Г. Черный, П. А. Шашкин, Ю. А. Грязин // Вычислительные технологии. – 1999. – Том 4, № 2. – С. 74 – 94.

209. Численное моделирование пожара в вагоне метрополитена. А.И. Данилов и др. Пожаровзрывобезопасность. 2017. №10. С.273.

210. Соболевская Е.С. Определение величины противопожарного разрыва при помощи программы «Теплообмен излучением при пожаре». ГУО Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь. 2015. С. 95.

211. Никулин И.Л. Математическое моделирование температурных полей в оболочковой литейной форме перед заливкой. ПНИПУ. Пермь. 2013. С. 79.

212. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

213. Ніжник В.В. Удосконалення будівельних норм з пожежної безпеки об'єктів/ Ніжник В.В., Сізіков О.О., Уханський Р.В., Новак С.В., Нефедченко Л.М., Жартовський С.В., Мартюк Д.В. // Науковий вісник УкрНДПБ – Київ, 2014. №1(29). – С. 65 – 72.

214. Нижник В.В. Влияние целевых добавок к воде на эффективность системы пожаротушения / А.А. Сизиков, С.В. Жартовский, В.В. Нижник, Я.В. Балло, В.С. Бенедюк // Вестн. ун-та гражд. защ. МЧС Беларуси. – Минск, 2017. – Вып. 25. – С. 35 – 43.

**215.** Білошицький М.В. Особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху парів сумішей горючих рідин / М.В. Білошицький, В.В. Ніжник, Н.В. Кравченко., О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2017. №2(4). – С. 14 – 24.

**216.** Ніжник В.В. Висвітлення основних положень ДСТУ Б В.1.1-36:2016 у Посібнику по практичному застосуванню ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою / М.В. Білошицький, Н.В. Кравченко, В.В. Ніжник, Т.М. Скоробагатько, С.В. Семічаєвський, О.М. Тесленко // Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» 20-21 жовтня 2017 року. – Черкаси, 2017. – С. 12 – 14.

217. E.S. Oztekin, D. Blake, and R. Lyon. Numerical simulations of a small fire in an aircraft cargo compartment. In FM Global Open Source CFD Fire Modeling Workshop, Norwood, MA, May 10 2012.

218. J. Floyd, S. Hunt, F. Williams, and P. Tatem. Fire and Smoke Simulator (FSSIM) Version 1: Theory Manual. NRL/MR/6180-04-8765, U.S. Naval Research Laboratory, Washington, DC, 2004.

**219.** Ніжник В.В. Вогнестійкість дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис // Пожежна безпека: збірник наукових праць ЛДУБЖД. – Львів, 2017 – № 30. – С. 159 – 167.

220. Forney, G.P. Smokeview (Version 5): A Tool for Vizualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume 1: User's Guide / G.P. Forney // NIST Special Publication 1017-1, 2008. – 142 p.

**221.** 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.

222. B.A. Kader. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24:1541–1544, 1981.

223. Demeshok V. Calculation method for evaluating the fire resistance of timber slabs with use the Finite Elements Method / Zalevs'ka A., Lutsenko Yu., Tychenko O. // Збірник наукових праць / XVIII international scientific conference Czestochowa university of technology faculty of production engineering and materials technology, 2017. – P. 405 – 409.

224. Ніжник В.В. Щодо розрахунку часу евакуації дітей з шкільних і дошкільних закладів у разі пожежі / В.В. Ніжник, О.М. Тесленко, С.З. Цимбалістий, Н.В. Кравченко // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2016. №1(1). – С. 81 – 88.

225. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / Перельмутер А.В., Сливкер В.И. – К.: Изд-во «Сталь», 2002. – 600 с.

226. Ніжник В.В. Аналіз теоретичних та експериментальних методів досліджень теплопередачі між будинками та спорудами під час пожежі / Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2019. – Вып. №3 (65)/2019. – С. 86 – 92.

227. Konig J. and Walleig L. Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires. Part 2: A design model for standard fire expose// Tratek, Rapport I 0001001.-Stocholm.–June 2000.

228. Ніжник В.В. Запобігання надзвичайним ситуаціям, що обумовлені загораннями і пожежами на об'єктах критичної інфраструктури / М.Г. Шкарабура, І.Г. Маладика, С.В. Жартовський, В.В. Ніжник // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2015. – С. 178 – 180.

229. Нижник В.В. Обоснование безопасного противопожарного расстояния между ферментаторами для производства биогаза / С.В. Поздеев, В.В. Нижник, Я.В. Балло, А.Н. Нуязин, Р.В. Уханский, В.С. Кропивницкий /

Naukowy wydawany. BIP. Bezpieczeństwo i technika pożarnicza. – Vol. 51 ISSUE 3, 2018. – 60 – 67. (Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).

230. D.A. Anderson, J.C. Tannehill, and R.H. Pletcher. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation, Philadelphia, Pennsylvania, 1984.

231. Ніжник В.В. Оцінка класу вогнестійкості самонесучої стіни залізобетонних модулів сховища відпрацьованого ядерного палива / С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, В.В. Ніжник, О.П. Борис // «Пожежна безпека: теорія і практика». – Черкаси, 2015. № 20. – С. 81 – 90.

232. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide / K. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1019-5. 2009. – 176.

233. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model / K. McGrattan [et al.] // NIST Special Publication 1018-5. 2009 – 94 p.

234. ООО «СИТИС». TP-5078. Перевод технической документации к программе Fire Dynamics Simulator (FDS) Версия 6. Техническое руководство к программе моделирования динамики пожара. Математическая модель.

235. Ніжник В.В. Обґрунтування швидкості руху пожежних автомобілів для визначення дислокації пожежно-рятувальних підрозділів / О.М. Крикун, В.С. Кропивницький, В.В. Ніжник, О.П. Жихарєв, Д.О. Добряк // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2018 – № 1 (5). – С. 21 – 25.

236. Ніжник В.В. Удосконалення системи функціонування джерел зовнішнього протипожежного водопостачання/ О.О. Сізіков, Н.М. Довгошеєва, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, С.Ю. Голікова // Науковий вісник УкрНДІПБ – Київ, 2013. №1 (27). – С. 49 – 57.

237. Пузач В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для ВУЗов. – 4-е изд.. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

238. Поздеев С.В. Развитие научных основ определения пределов огнестойкости несущих железобетонных конструкций: дис. ... доктора тех. Наук: 21.06.02/Поздеев Сергей Валериевич – Черкассы, 2012 – 351.

239. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А.А. – М.: Наука, 1971. – 554 с.

240. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. – М.: Высшая школа, 1976. – 664 с.

241. ANSYS, ANSYS 9.0 Manual Set, ANSYS Inc., Southpoint, 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317, USA.

242. 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, Vol. 31, pp. 573 – 610 (1991).

**243.** Ніжник В.В. Феноменологічне моделювання процесу зменшення горючості карбамідоформальдегідних пінопластів / С.В Жартовський, О.В. Новіков, В.В. Ніжник, Е.А. Лінчевський // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2015. – № 1(31). – С. 93 – 98.

244. ISO 16730-1:2015 Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods – Part 1: General (Процедури та вимоги до верифікації та валідації розрахункових методів. Частина1: Загальні положення).

245. 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.

246. Новак С.В. Валідація та верифікація методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій / С.В. Новак, М.С. Новак // Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ». – Черкаси. – 2018. – с. 186 – 188.

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

248. Про затвердження критеріїв утворення державних пожежно-рятувальних підрозділів (частин) Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в адміністративно-територіальних одиницях та переліку суб'єктів господарювання, де утворюються такі підрозділи (частини), Постанова Кабінету Міністрів України від 27 листопада 2013 р. № 874. Офіційний вісник України - 2013 р., № 96, стор. 113.

249. Волков О.М. Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. – М.: Недра, 1984. – 151 с.

250. Ройтман М. Я. Противопожарное нормирование в строительстве / М. Я. Ройтман. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1985. – 596 с.

251. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 420 с.

252. Ніжник В.В. Підходи щодо визначення протипожежних відстаней між будинками та спорудами / Науково-технічний збірник Сучасні проблеми архітектури та містобудування. КНУБА. – К., 2019. – №53. – С.215 – 226.

253. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е. Влияние пожара на резервуар с нефтепродуктом // Вестник национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. трудов. Вып.29. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – С.131 – 133.

254. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. – М.: Химия, 1979. – 368 с.

255. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бензины. Свойства и применение. – М.: Нефть и газ, 1996.

256. Луканин В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др. – М.: Высш. шк., – 2002. – 671 с.

257. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.

258. EN 1996-1-2:2004 Eurocode 6: Design of masonry structures Part 1-2: General rules - Structural fire design, Brussels, 2004.

259. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ. в 4;х т. – Т.1. Кн.1. – М.: Наука, 1978. – 496 с.

260. EN 1993-1-2:2005 Eurocode3: Design of steel structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.

261. Мартинсон Л.К., Малов Ю.И. Дифференциальные уравнения математической физики: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996. – 228 с.

262. Нижник В.В. Метод интерполяции температурных полей в сечении фрагментов деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник, А.Ю. Новгородченко // Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2018 –№ 3 (31). – 64 – 73.

263. Иванова Е.Е. Дифференциальное исчисление функций одного переменного: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1999. – 408 с.

264. Волков И.К., Канатников А.Н. Интегральные преобразования и операционное исчисление: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996. – 228 с.

265. Myshlanova M.Yu. ,Yntehral'nyy effekt vnedrenyya al'ternatyvnoho enerhonosytelya – byohaza, w: Sbornyk nauchnykh trudov Vserosyyskoho nauchno-tekhnycheskoy konferentsyy, 2004.

266. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

267. Дзюбенко В.П. Розрахунок часу евакуації у разі пожежі в торгово-розважального комплексу об'єкту «Будівництво торгово-розважального комплексу з житловим будинком, з вбудовано-прибудованими приміщеннями по вул. М.Тимошенко, 21 В в Оболонському районі м. Києва» // ТОВ Девелопмент Естейт, Київ 2018 р – 29 с.

268. Morgan J. Hurley, SFPE Handbook of fire protection engineering, Greenbelt, 351, (2016).

**269.** Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between industrial constructions / O. Kyrychenko, O. Tarasenko, A. Shvydenko, S. Hovalenkov // MATEC Web of Conferences 230, 02021 (2018). doi.org/10.1051/matecconf/201823002021.

270. ДСТУ-Н Б EN 1995-1-2:2012. Єврокод 5. Проектування дерев'яних будівельних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, IDT).

**271.** Ніжник В.В. Методика експериментальних досліджень поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням та без нього в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник, О.П. Борис, Ю.В. Долішній // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ. – 2017 – № 1 (3)., С. 98 – 103.

272. B. Pospelov, Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A., "Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.1, No.10 (91), (2018), pp. 50 – 55.

**273.** Ніжник В.В. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку / В.В. Ніжник, С.В. Поздєєв, С.В. Жартовський, Ю.Л. Фещук // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". – 2019. – №11 (73). – С. 47 – 51.

274. 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>.

**275.** Ніжник В.В. Експериментальні дослідження поведінки дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням в умовах пожежі / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В. Ніжник // Сборник научных трудов: Проблемы пожарной безопасности. – Харків. – 2017. – № 42., С. 155 – 164.

276. 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 України, 2019. – 31 с. – (Державні будівельні норми України).

277. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги ДСТУ Б В.1.1-4-98\* [Чинний від 01.01.2006] Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України від 28.10.98 № 247 – 42 с.

278. Ніжник В.В. Визначення параметрів подавання води з системи пожежогасіння в підкупольних дерев'яних конструкціях культових споруд / В.В. Ніжник // Науковий вісник УкрНДІПБ. – Київ, 2013. №2(28). – С. 168 – 174.

279. Пат. 132896 Україна, МПК (2019.01) G09B 25/04 (2006/01), A62C 3/00, A62C 99/00, G01N 25/00, G01N 25/12 (2006.01). Зразок для дослідження процесів теплопередачі між джерелом теплового випромінювання та суміжними об'єктами / В.В. Ніжник, С.В. Поздєєв, Ю.Л. Фещук, заявник та патентовласник Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. – № u 2018 10891, заяв. 05.11.2018; опубл. 11.03.2019, бюл. № 5.

280. Нижник В.В. Методология прогнозирования пределов огнестойкости деревянных колонн с огнезащитной облицовкой / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздеев, В.В. Нижник // Международный научный журнал "Интернаука". – 2018. – № 14. – с. 74 – 81.

281. Danchenko Y., Andronov V., Teslenko M., Permiakov V., Rybka E., Meleshchenko R., Kosse A., "Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.1, No.12(91), pp.9–17.

282. Thomas P.H., Fire Research Note, N.600, Fire Research Station, Borelamwood, England, 1965.

283. Нижник В.В. Исследования теплового влияния факела модельного очага пожара класса В на элементы смежных объектов / В.В. Нижник,

С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, А.А. Сизиков// Вестник Кокшетауского технического института Комитета по Чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан. – 2019 – № 2 (34). – 62 – 71.

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

**285.** Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. – УкрНІЦЗ. – Київ. – 2007.

**286.** Ефремов О.Ю. Военная педагогика: Учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Питер, 2017. – 640 с.

**287.** Model Code on Fire Engineering. – ed. – ECCS, 2011.

**288.** Ветошніков В.С. Вимірювання густини теплового потоку в камері згорання. // В.С. Ветошніков, Ю.Г. Добровольський, І.С. Пресняк, Б.Г. Шабашкевич, Л.М. Шафран // Актуальные проблемы транспортной медицины. – № 1 (7), 2007. – С. 119 – 126.

**289.** Piccini E, Guo S M and Jones T V 2000 Measurement Science and Technology 11 342.

**290.** Ainsworth R, Allen J, Davies M, Doorly J, Forth C, Hilditch M, et al. 1989 Journal of Turbomachinery 111 20-7.

**291.** Pullins C A 2011 High temperature heat flux measurement: sensor design, calibration, and applications Virginia Polytechnic Institute and State University.

**292.** Nizhnyk V. A method of experimental studies of heat transfer processes between adjacent facilities / S.Shchipets, O. Tarasenko, V. Kropyvnytskyi, B. Medvid // International Journal of Engineering & Technology; Vol. 7, № 4.3 (2018): Special Issue 3. – 288 – 292.

**293.** Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу модельного вогнища пожежі через віконний проріз на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук,

С.В. Поздєєв // Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах». – Київ. – 2019. – С. 198 – 201.

294. S. Hostikka, K.B. McGrattan, and A. Hamins. Numerical Modeling of Pool Fires using Large Eddy Simulation and Finite Volume Method for Radiation. In Fire Safety Science – Proceedings of the Seventh International Symposium, pages 383–394. International Association for Fire Safety Science, 2002.

295. F. Colella, G. Rein, J. Torero, and R. Borchiellini. A novel multiscale methodology for simulating tunnel ventilation flows during fires. Fire Technology, 2010.

296. K. Wakatsuki. High Temperature Radiation Absorption of Fuel Molecules And An Evaluation of Its Influence on Pool Fire Modeling . PhD thesis, University of Maryland, College Park, Maryland, 2005.

**297.** Ніжник В.В. Застосування FDS моделювання для дослідження наслідків розвиненої стадії пожежі / Я.В. Балло, В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, С.Ю. Голікова Н.М. Довгошеєва // Матеріали 20 Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». – Київ. – 2018. – С. 29 – 30.

298. Z. Chen, J. Wen, B. Xu, and S. Dembele. Extension of the eddy dissipation concept and smoke point soot model to the les frame for fire simulations. in review. 49, 133.

299. ТР-5044 Пожарная нагрузка. Обзор зарубежных источников.ООО«СИТИС», 2009. – 82 с.

**300.** Ніжник В.В. Моделювання процесів теплопередачі пожежі класу В / В.В. Ніжник, Я.В. Балло, О.О. Сізіков , С.Ю. Голікова // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». – Черкаси. – 2019. – С. 222 – 225.

**301.** Ніжник В.В. Адекватність вимірювання у фрагментах дерев'яних колон під час вогневих випробувань / Ю.Л. Фещук, С.В. Поздєєв, В.В.

Ніжник // Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Технології та інфраструктура транспорту». – Харків. – 2018. – С. 311 – 313.

302. Г.Т.Земский. Физико-химические и огнеопасные свойства органических химических соединений. (Справочник в двух книгах) –М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009, кн2-458 с. ISBN –5-901140-55-9».

303. Ніжник В.В. Моделювання теплового впливу пожежі через віконний проріз будинку на елементи суміжних об'єктів / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук., С.В.Поздєєв, І.Я. Олійник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2019. – №10 (72). – С. 50 – 56.

304. Ніжник В.В. Дослідження теплового впливу вогнища пожежі через віконний проріз будівлі на елементи суміжних об'єктів // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – Київ, 2019. – № 1(7). – С. 26 – 33.

305. J.M. Suo-Anttila, T.K. Blanchat, A.J. Ricks, and A.L. Brown. Characterization of thermal radiation spectra in 2 m pool fires. Proceedings of the Combustion Institute, 32(2):2567–2574, 2009.

306. Барановский А.С. Оценка противопожарных расстояний между объектами различного назначения / А.С. Барановский, П.А. Леончук, С.А. Зуев // Пожарная безопасность. – 2019 – № 2. – 95 – 99.

307. Забезпечення пожежної безпеки наземного космічного ракетного комплексу «Циклон-4» в Федеративній Республіці Бразилія / О.О. Сізіков, В.В. Ніжник, Р.В. Уханський, О.Г. Доценко // Науковий вісник УкрНДІПБ: Наук.журнал. – К., 2012. – № 2 (26). – С. 86 – 91.

308. Нижник В.В. Расчетно-табличный метод оценки противопожарных расстояний между смежными строительными объектами / В.В. Нижник, С.В. Поздеев, Ю.Л. Фещук, С.Ю. Голикова, Я.В. Балло // Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Минск. – 2019. – С. 373 – 383.

309. СТ СЭВ 446-77 Противопожарные нормы строительного проектирования. Методика определения расчетной пожарной нагрузки.

**310.** 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.

**311.** Ніжник В.В. Розрахунковий табличний метод визначення межі вогнестійкості дерев'яних колон з вогнезахисним облицюванням / Ю.Л. Фещук, В.В. Ніжник // Матеріали VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». – Черкаси. – 2018. – С. 245 – 249.

**312.** Проектирование стальных конструкций. Расчет конструкций на огнестойкость ДСТУ-Н Б В.2.6-211:2016, [Чинний від 01.04.2017] ДП УкрНДНЦ від 14.06.2016 р. № 155 – 74 с. (Національний стандарт України).

**313.** 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).

**314.** 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».

**315.** Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. – Учебник. – Москва: Высшая инженерная и пожарно-техническая школа МВД СССР, 1987. – 440 с.

**316.** Менеджмент, маркетинг, девелопмент земли и коттеджных поселков «Real estate results» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.svdevelopment.com>.

## Додаток А

прДСТУ Пожежна безпека. Оцінювання протипожежних відстаней між суміжними об'єктами будівництва розрахунковими методами. Основні положення



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

---

ДСТУ ХХХХ:20\_\_

**ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА**  
**ОЦІНЮВАННЯ ПРОТИПОЖЕЖНИХ ВІДСТАНЕЙ МІЖ**  
**СУМІЖНИМИ ОБ'ЄКТАМИ БУДІВНИЦТВА**  
**РОЗРАХУНКОВИМИ МЕТОДАМИ. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ**

***Видання офіційне***

(Проект, остаточна редакція)

**Київ**

**ДП «УкрНДНЦ»**

**20\_\_**

### Додаток Б

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи  
у навчальний процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв  
Чорнобиля НУЦЗ України

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. начальника Черкаського  
 інституту пожежної безпеки  
 імені Героїв Чорнобиля  
 Національного університету  
 цивільного захисту України



Олександр ТИЩЕНКО

09 2019 рік

## Акт

**про впровадження завершеної наукової роботи на тему «Розвиток  
 наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні  
 будівельні об'єкти»**

Розробник Ніжник Вадим Васильович, з однієї сторони та завідувач кафедри «Пожежно-профілактичної роботи» Кириченко Оксана В'ячеславівна, з іншої сторони, склали акт про те, що результати дисертаційної роботи «Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти» має теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Об'єктами впровадження в освітній процес є: критеріальна база для встановлення небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти; методика визначення протипожежних відстаней на основі спрощеного підходу; методика на основі розроблених довідкових таблиць протипожежних відстаней.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес при підготовці фахівців освітнього ступеню «бакалавр» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» під час вивчення дисципліни «Пожежна безпека територій будівель і споруд» в розрізі таких тем: «Об'ємно-планувальні рішення із забезпеченням пожежної безпеки будівель і споруд» та «Протипожежне нормування при розробці генеральних планів» (протокол кафедри № 7 від 20.11.19). Впровадження результатів забезпечує актуальний характер навчання та високий науково-методичний рівень викладання дисципліни «Пожежна безпека територій будівель і споруд» і дозволяє підвищити якість проведення практичних занять для здобувачів вищої освіти. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для написання випускних атестаційних робіт за першим (бакалаврським) рівнем та за другим (магістерським) рівнем.

Завідувач кафедри  
 пожежно-профілактичної роботи



Оксана КИРИЧЕНКО

Розробник:  
 Начальник НДЦТ УкрНДЦЗ



Вадим НІЖНИК

## Додаток В

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи  
у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям  
ДСНС України

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Заступник директора  
департаменту запобігання  
надзвичайним ситуаціям  
полковник служби  
цивільного захисту



Павло Афанасьєв

08 2019 р.

**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційної роботи  
Ніжника Вадима Васильовича «Розвиток наукових основ оцінювання  
небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти»**

Комісія в складі: голови комісії – заступника начальника управління – начальника відділу по роботі з органами влади та стратегічними об'єктами управління пожежної безпеки Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Лінчевського Є.Л., начальника відділу технічного регулювання та нормативної роботи управління пожежної безпеки Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС Пальчикова Р.В., головного інспектора відділу аварійно-рятувальних служб та взаємодії з органами виконавчої влади управління техногенної безпеки Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України, кандидата технічних наук Морща Є.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Ніжника В.В. апробовано та впроваджено у роботу Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Результати дисертаційних досліджень Ніжника В.В. можуть бути використані під час оцінювання ризику поширення пожежі між суміжними будівельними об'єктами, а також під час визначення протипожежних відстаней розрахунковими методами.

Голова комісії:

Є.Л. Лінчевський

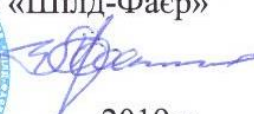
Члени комісії:

Р.В. Пальчиков

Є.В. Морщ

Додаток Г

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи  
у діяльність ТОВ «Шілд-Фаєр»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор ТОВ «Шілд-Фаєр»  
 Мусійчук В.В.   
 «16» \_\_\_\_\_ 2019 р.



**АКТ**  
**впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**Ніжника Вадима Васильовича «Розвиток наукових основ оцінювання**  
**небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти»**

Комісія в складі: голови комісії – директора ТОВ «Шілд-Фаєр» Мусійчука Василя Володимировича, члена комісії – директора технічного ТОВ «Шілд-Фаєр» Уханського Романа Володимировича, к.т.н., склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Ніжника В.В. апробовано та впроваджено у практичну роботу ТОВ «Шілд-Фаєр».

Голова комісії:



В.В. Мусійчук

Член комісії, к.т.н.



Р.В. Уханський

## Додаток Д

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи  
у діяльність ДП Український державний науково-дослідний інститут  
проектування міст «ДІПРОМІСТО» ім. Ю.Б. Білоконя

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
Державного підприємства  
«Український державний науково-  
дослідний інститут проектування  
міст «ДІПРОМІСТО»  
імені Ю.М. Білоконя



Іван Шпилевський  
« 19 » 09 2019 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи  
Ніжника Вадима Васильовича  
«Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі  
на суміжні будівельні об'єкти»**

Комісія у складі: в.о. начальника архітектурно-планувального управління - начальника відділу нормативного та методичного забезпечення містобудівного проектування Економов А.О. – голова комісії та членів комісії – ученого секретаря інституту, кандидата географічних наук Сивак О.О.; начальника науково-дослідного відділу, кандидата географічних наук Зеркаль М.В. склала цей акт, яким засвідчує, що результати дисертаційних досліджень Ніжника В.В. впроваджено у діяльність Українського державного науково-дослідного інституту проектування міст «ДІПРОМІСТО» імені Ю.М. Білоконя шляхом застосування запропонованих за результатами роботи алгоритмів оцінювання протипожежних відстаней під час розроблення нових будівельних норм ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова територій», як параметричного методу нормування у будівництві.

Голова комісії

А.О.Економов

Члени комісії

О.О.Сивак

М.В.Зеркаль