

*Т. М. Шналь<sup>1</sup>, С. В. Поздєєв<sup>2</sup>, Р. С. Яковчук<sup>3</sup>, О. В. Некора<sup>2</sup>, С. О. Сідней<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», <sup>2</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України,*

*<sup>3</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності*

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ У ТРИПОВЕРХОВІЙ ЖИТЛОВІЙ БУДІВЛІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ У НІЙ ПОВНОМАСШТАБНИХ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ

Метою роботи було математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні в ній повномасштабних пожежних випробувань; дослідження точності та достовірності параметрів температурних режимів пожежі в окремих приміщеннях будівлі. Для досягнення цієї мети доцільно застосовувати засоби обчислювальної газогідродинаміки, які дають змогу визначити межі застосування такого підходу для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі. Для розрахунку температури у моделях приміщень із пожежею застосовувалася комп'ютерна система Pyrosim, яка слугує користувацькою оболонкою для програми Fire Dynamics Simulator. Ця система FDS використовує чисельні алгоритми розв'язку повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для визначення температури та інших небезпечних факторів під час пожежі. Для візуалізації результатів розрахунків використовувався програмний модуль системи PyroSim Smokeview, що дає змогу побудувати відповідні графічні відображення розподілів температури.

Проведено чисельний експеримент з моделювання повномасштабних випробувань приміщень триповерхової будівлі з пожежею із застосуванням методів комп'ютерної газогідродинаміки. Визначено характер перебігу пожежі та часові залежності її основних параметрів, що у свою чергу дало змогу проаналізувати адекватність результатів моделювання і дослідити їх адекватність та точність.

Отримані результати досліджень точності моделювання повномасштабних випробувань приміщень із пожежею у триповерховій будівлі показали, що похибка, визначена при порівнянні експериментальних та розрахункових даних, не мала істотних значень. Відносна помилка не перевищувала 28%, а середньоквадратичне відхилення не перевищувало 51°C. Величини статистичних критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера для результатів моделювання зумовлені різницею між розрахунковими та експериментальними даними мають величини відповідно не більші за 0,98; 0,84 та 1,008 і не перевищують табличних значень. Це означає, що результати моделювання є адекватними, що дає змогу використовувати цей підхід для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в наближених до реальних умовах пожежі.

**Ключові слова:** комп'ютерне моделювання пожежі, вогнестійкість, Fire Dynamics Simulator, PyroSim, польова модель пожежі.

*T. M. Shnal, S. V. Pozdieiev, R. S. Yakovchuk, O. V. Nekora, S. O. Sidnei*

## MATHEMATICAL MODELING OF FIRE DEVELOPMENT IN A THREE-STOREY RESIDENTIAL BUILDING DURING FULL-SCALE FIRE TESTS

The aim of the work was mathematical modeling of fire development in a three-storey residential building during full-scale fire tests; research of accuracy and reliability of parameters of temperature modes of fire in separate rooms of the building. To achieve this goal, it is advisable to use computational gas-hydrodynamics, which allow to determine the limits of application of this approach to predict the behavior of building structures in a fire. The Pyrosim computer system, which serves as a user shell for the Fire Dynamics Simulator program, was used to calculate the temperature in fire room models. This FDS system uses numerical algorithms to solve the complete system of Navier-Stokes differential equations to determine temperature and other hazards in a fire. To visualize the results of calculations, the software module of the PyroSim Smokeview system was used, which allows to build appropriate graphical representations of temperature distributions.

A numerical experiment was performed to model full-scale tests of rooms with fire in a three-story building using computer gas-hydrodynamics methods. The nature of the fire and the time dependences of its main parameters were revealed, which in turn allowed to analyze the adequacy of the simulation results and investigate their adequacy and accuracy.

The obtained results of research on the accuracy of modeling of full-scale tests of rooms with fire in a three-story building showed that the error determined when comparing experimental and calculated data was not significant. The relative error did

not exceed 28%, and the standard deviation did not exceed 51 ° C. The values of the statistical criteria of Cochren, Student and Fisher for the simulation results due to the difference between the calculated and experimental data have values of no more than 0.98, 0.84 and 1.008, respectively, and do not exceed the tabular values. This means that the simulation results are adequate, which allows you to use this approach to predict the behavior of building structures in a fire that is close to real.

**Key words:** computer fire modeling, fire resistance, Fire Dynamics Simulator, PyroSim, field fire model.

**Вступ.** Пожежна безпека будівель і споруд залежить від адекватної оцінки вогнестійкості конструкцій. Належна оцінка вогнестійкості конструкцій можлива лише під час використання для розрахунків таких температурних моделей пожеж, які якнайточніше відповідають реальним умовам пожежі. Математичне моделювання пожежі у приміщенні передбачає наявність даних про розміри приміщення, його отвори, щільність пожежного навантаження, значення максимальної температури пожежі та час її настання тощо. Деякі дослідні дані є певною мірою суперечливими, що зумовлено відмінностями у завданнях конкретного дослідження. Тому існує необхідність якомога глибшого і детальнішого вивчення закономірностей виникнення та розвитку пожежі у приміщенні.

Динаміку пожежі описують переважно температурно-часовими кривими, серед яких: стандартні криві «температура/час» ISO-834, параметричні криві, крива BFD тощо. Забезпечення відповідного рівня пожежної безпеки великопанельних будівель потребує проведення досліджень сценаріїв розвитку пожежі в таких будівлях та поведінки конструкцій будівлі за умов пожежі. Оцінка та прогнозування вогнестійкості великопанельних будівель виконується на основі лабораторних випробувань та обмеженої кількості натурних випробувань, що не давало змоги зробити адекватні висновки про надійність таких будівель в умовах реальної пожежі. Обмежена кількість досліджень в цьому напрямі пояснюється складністю підготовки експерименту і значними матеріальними витратами.

При здійсненні розрахункової оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій, із врахуванням реального теплового впливу пожежі, аналіз задачі вогнестійкості зводиться до вирішення трьох окремих задач. Це задачі визначення температури у приміщенні із пожежею поблизу елементів конструкції, задачі розрахунку температури у внутрішніх шарах елементів конструкцій та задачі термосилового відгуку елементів конструкції на цей тепловий вплив. Основною проблемою аналізу цих задач є етапи їх взаємного пов'язування на рівні початкових умов та основних положень розрахунку з метою досягнення конкретного результату. Цей результат полягає у відповідності того чи іншого елемента вимогам щодо його класу вогнестійкості, при цьому відсутня можливість комплексного врахування наявності автоматичних систем протипожежного захисту, пожежного навантаження тощо. Ситуація ускладнюється необхідністю застосування потужного комерцій-

ного програмного забезпечення, що потребує відповідної кваліфікації фахівців та істотних матеріальних затрат на придбання ліцензій про використання цього програмного забезпечення. Ще одним проблемним питанням за умов застосування даного підходу є необхідність послідовного виконання даних етапів за відсутності можливості використання загальних математичних співвідношень для отримання кінцевого результату, що змогли б суттєво підвищити продуктивність розрахунків без позначення на перевагах такого підходу температурними режимами пожеж наближених до реальних, а саме більшої точності та достовірності із зниженням жорсткості вимог щодо вогнестійкості досліджуваних елементів конструкцій.

**Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.** Конструктивні елементи під час пожежі нагріваються неоднаково, що зумовлене випадковим (імовірнісним) типом багатьох параметрів, які впливають на динаміку пожежі [1]. Дослідження температурних режимів пожеж у житлових будівлях залишаються актуальними і на даний час. Особливу увагу науковців привертає математичний опис динаміки пожежі [2, 3] для створення нових та покращення вже існуючих кривих «температура/час». Істотне значення у поширенні пожеж на інші приміщення чи будівлі має факел полум'я, що виходить разом з гарячими газами через отвори огорожувальних конструктивних елементів. У роботі [4] наведено залежність величини теплового потоку від факела полум'я.

За даними математичного моделювання впливу параметрів пожежі на її інтенсивність та динаміку (виконано на основі параметричної кривої [5]) цікавим було зосередження дослідження у напрямі впливу значення коефіцієнта отворів та взаємного розташування отворів у огорожувальних конструкціях за двох рівнів пожежного навантаження на температурний режим пожежі у житловому приміщенні.

Результати досліджень температурного режиму під час пожежі у житловому приміщенні описано в роботах [6-8]. Останнім часом є досить популярним проведення не лише повномасштабних натурних випробувань фрагментів будівель та споруд за національними та міжнародними стандартами, але й використання спеціального програмного забезпечення Fire Dynamics Simulator (FDS) для комп'ютерного моделювання результатів випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість [9-15]; чисельного моделювання розподілу температур по нагрітих поверхнях конструкцій під час вогневих випробувань,

а також інших параметрів, які слід враховувати для прогнозування ймовірності прогресивного обвалення будівельних конструкцій у разі їх пошкодження під час пожежі [16-19].

Для розрахунку температури у моделях приміщень із пожежею застосовується комп'ютерна система Pyrosim, яка слугує користувацькою оболонкою для програми Fire Dynamics Simulator (FDS). Ця система FDS використовує чисельні алгоритми розв'язку повної системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для визначення температури та інших небезпечних факторів під час пожежі [20]. Результати моделювання приміщень були використані для вивчення впливу масштабу моделей приміщень із пожежею, впливу систем автоматичного пожегогасіння та систем штучної вентиляції.

Для візуалізації результатів розрахунків використовується програмний модуль системи PyroSim Smokeview, що дає змогу побудувати відповідні графічні відображення розподілів температури. При цьому дана система також дає змогу відслідковувати динаміку температурних полів та відтворювати процес нагрівання за допомогою анімації. Також ця система дозволяє отримувати картини задимлення, розподілення концентрації продуктів горіння [20, 21].

Польовий метод моделювання (CFD) розвитку пожежі [22] не накладає обмежень на геометричні характеристики об'єкта, дає змогу більш детального аналізу процесу пожежі, тому є універсальним інструментом комп'ютерного моделювання. Основою польової моделі є система рівнянь в похідних [23, 24]: нерозривності; збереження кількості руху; збереження енергії, що описують просторово-часовий розподіл температур та швидкостей газового середовища в приміщенні. У більш загальному випадку до цієї системи рівнянь додається диференціальне рівняння теплопровідності, що описує процес нагрівання огороджувальних конструкцій.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи було математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні в ній повномасштабних пожежних випробувань; дослідження точності та достовірності параметрів температурних режимів розвитку пожежі в окремих приміщеннях будівлі. Для досягнення цієї мети доцільно застосувати засоби обчислювальної газогідродинаміки, які дають змогу визначити межі застосування такого підходу для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести комплекс чисельних експериментів щодо розвитку та поширення пожежі у приміщеннях натурної моделі триповерхової будівлі за допомогою математичного моделювання методами комп'ютерної газогідродинаміки;

- на основі результатів моделювання оцінити вплив факторів статистичної похибки експерименту;

- враховуючи отримані дані статистичної похибки результатів моделювання оцінити межі застосування цього підходу для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в умовах пожежі, що наближені до реальних.

**Матеріали та методи дослідження.** Методики проведення експерименту та визначення необхідних параметрів описані в [25]. Щоб математично описати турбулентності використовуємо відому модель великих вихорів Смагоринського (LES) [20, 21]. Метод чисельної реалізації цієї моделі (DNS) може бути застосований за умови малого розрідження сітки, і має контролюватися відповідними числами Куранта-Фрідріхса-Леві [20, 21].

Для моделювання пожеж у відповідних приміщеннях було застосовано одноступінчасту хімічну реакцію за двопараметричної моделі часток у суміші (mixture fraction model) [20, 21]. Така модель використовує спеціальний постійний параметр, що обчислюється на основі масової частки одного або більше компонентів газу у цій області комірки потоку у розрахунковій області. При цьому розглядаються масові частки двох компонентів утвореної суміші газів: компоненту палива, яке не згоріло, та компоненту повністю згорілого палива. Всі розрахунки виконуються з огляду на те, що кінцева швидкість протікання реакції не змінюється [20, 21].

При проведенні моделювання пожежі у відповідних моделях приміщень має бути врахований променистий теплообмін. За таких умов використовується спосіб розв'язку рівняння променистого переносу тепла для сірого газу, а також з використанням широкодіапазонної моделі. Для чисельного розв'язку рівняння променистого теплопереносу використовується метод, аналогічний методу контрольних об'ємів для променистого переносу, який називається «методом кінцевих об'ємів» (Finite Volume Method (FVM)). Обчислювальний процес потребує великих ресурсів комп'ютерної техніки, оскільки при використанні приблизно 100 дискретних кутів обчислення променистого теплообміну займає приблизно 20 % загального часу завантаження центрального процесора. Врахування обсягу поглинання та випромінювання тепла сажею й димом обчислюються за допомогою вузькосмугової моделі RADCAL [20, 21]. За таким же алгоритмом враховується поглинання та розсіювання тепла краплями рідини, при моделюванні дії автоматичних систем пожегогасіння.

На рис. 1 наведено плани поверхів та розрізи із позначенням приміщень, що вибрані у якості модельних. Також на плані показано розміщення пожежного навантаження.

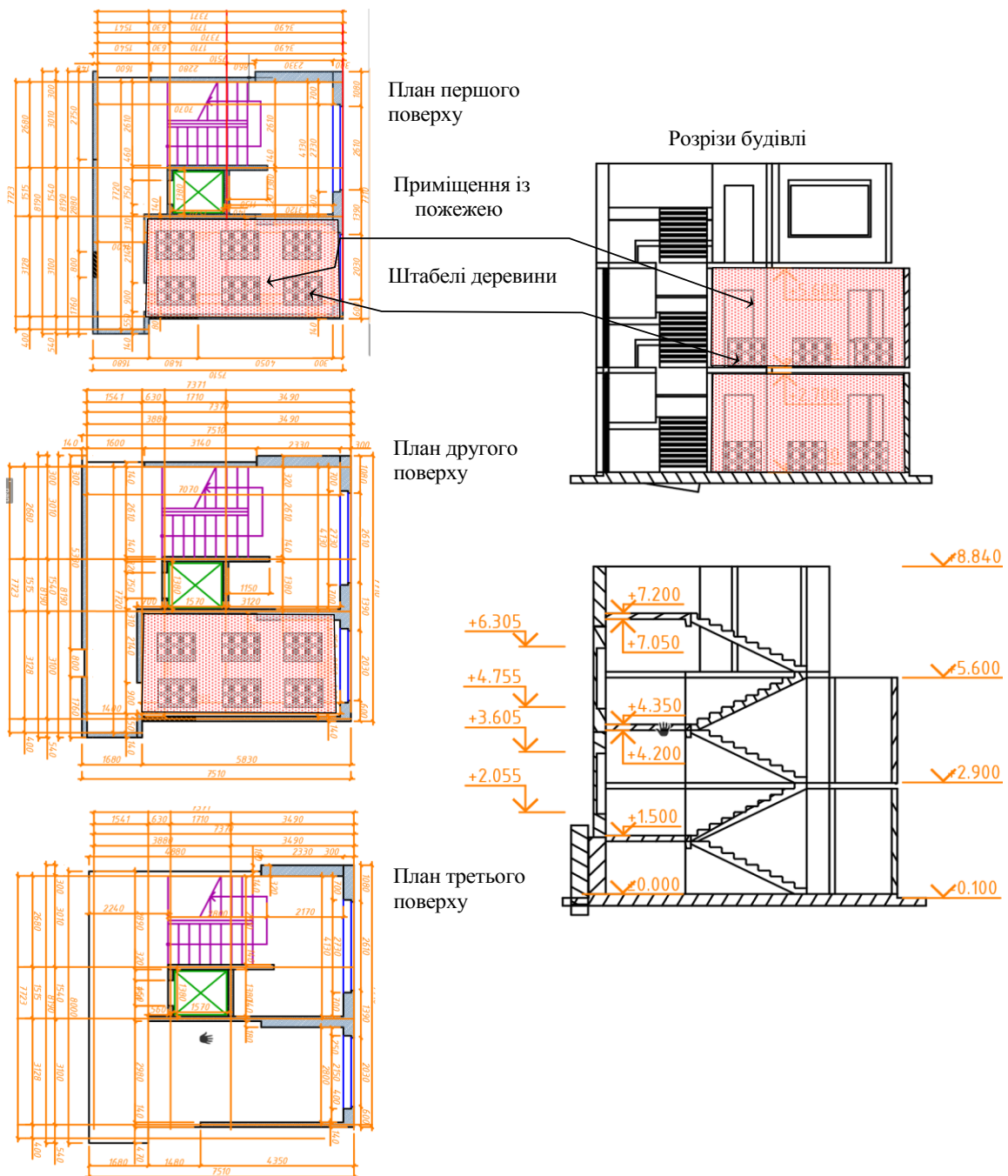


Рисунок 1 – Плани поверхів та розрізи із позначенням приміщень, що вибрані у якості модельних

Основні математичні моделі, що були застосовані, наведені у табл. 1

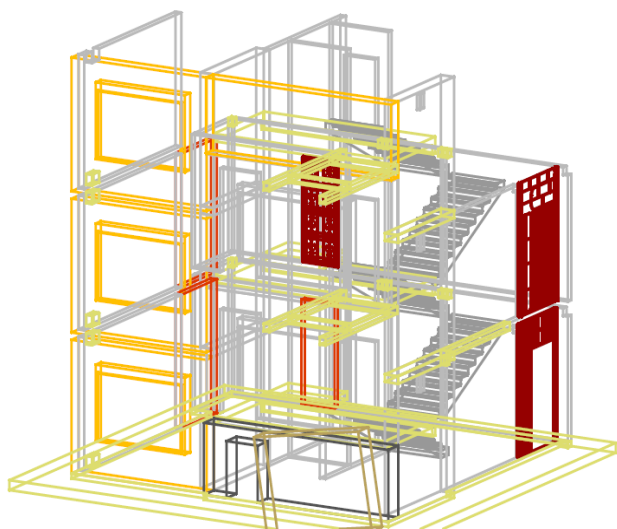
Таблиця 1

Основні методи опису та врахування напружено-деформованого стану залізобетону

Особливості процесів тепломасообміну під час пожежі	Математична модель або метод
Процес тепломасообміну	Система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса
Модель турбулентності	Модель великих вихорів (LES-модель)
Модель хімічної реакції	Одноступінчасте стехіометричне рівняння
Модель горіння	Модель Зельдовича
Модель променистого теплообміну	Метод кінцевих об'ємів (FVM)
Метод апроксимації диференціальних рівнянь	Метод кінцевих різниць за явною схемою «предиктор-коректор»
Програмне забезпечення для реалізації математичних моделей	Fire Dynamic Simulator (FDS) (розробка національного інституту стандартів NIST USA)
Засіб візуалізації	Візуалізаційний модуль PyroSim

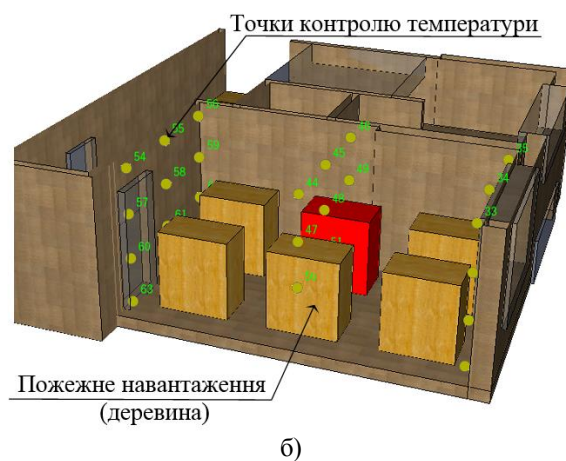
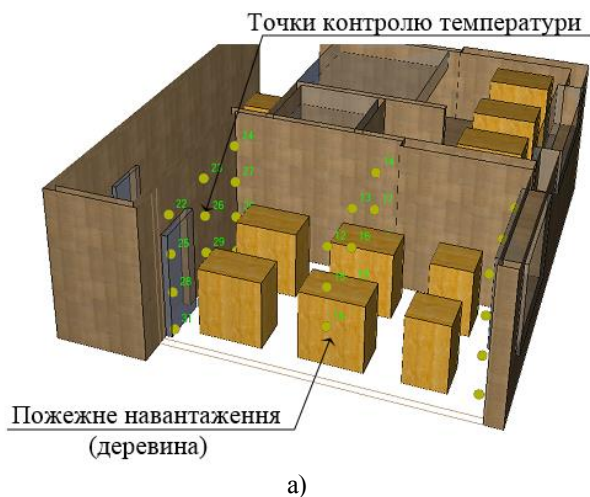
Дані про геометрію та основні властивості матеріалів та речовин використовуюваного комп'ютерного модуля Pygosim вводилися інтерактивно і відповідним чином перевірені за коректністю вхідного формату файлів, які використовуються у FDS. Версія Pygosim, що використана у цій роботі, підтримує актуальну версію FDS [20, 21].

**Результати розрахунку температури під час пожежі у триповерховій будівлі.** Геометрична схема повністю відповідала конструктивній схемі будівлі із відповідними приміщеннями, яка наведена на рис. 2.



**Рисунок 2** – Конструктивна схема будівлі із відповідним приміщенням

На рис. 3 наведена 3-D модель із розташуванням точок контролю температурних показників в приміщенні на першому (рис. 3 а) та другому (рис. 3 б) поверхах. Термопари встановлювали на відстані 0,1 м від внутрішньої поверхні стіни, які були змодельовані в програмному комплексі.



**Рисунок 3** – Розташування точки знімання температурних показників:  
а – на першому поверсі;  
б – на другому поверсі експериментальної будівлі

Важливою є оцінка впливу температурного режиму пожежі на будівельні конструкції. Було виділено площини з термопарами П1...П4, які розташовані на відстані 0,1 м від внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій, за даними яких було зручно оцінювати вплив температурного поля на огорожувальні конструкції.

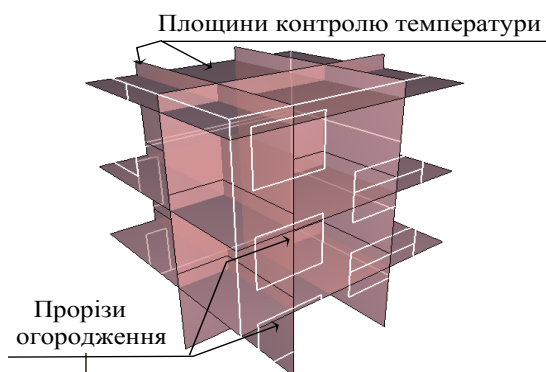
Основні параметри та початкові дані щодо моделі, яка застосовується для розрахунку температурного режиму, наведено у табл. 2.

**Таблиця 2**

Основні параметри моделі та початкові дані

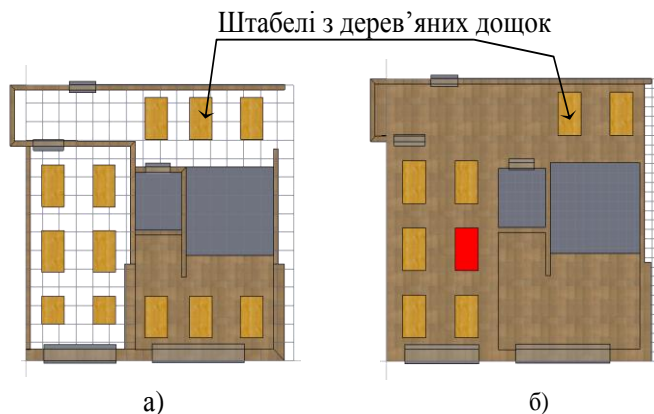
Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Початкові параметри		
Температура навколишнього середовища	°C	20
Атмосферний тиск	кПа	101,325
Масова доля кисню	кг/кг	0,232378
Масова доля чадного газу в атмосфері	кг/кг	$5,95 \cdot 10^{-4}$
Відносна вологість повітря	%	40
Константа Смагоринського	–	0,2
Число Шмідга	–	0,5
Число Прадтля	–	0,5
Початкова незмішана доля	–	1,0
Коефіцієнт випромінювання факела пожежі	–	0,9
Параметри осередку пожежі		
Тепловиділення	кВт/м <sup>2</sup>	1907,0
Температурний датчик		
Діаметр спая	мм	1,0
Коефіцієнт випромінювання поверхні спая	–	0,85
Густина спая	кг/м <sup>3</sup>	8908,0
Питома теплоємність спая	кДж/(кг·К)	0,44

Одним із методів класичного розрахунку температурного режиму є поділ приміщення на шари (багатозона модель). Таким чином, паралельно з вимірюванням температури в об'ємі моделі приміщення за допомогою термопар під час експерименту вимірювалася температура на поверхні огорожувальних конструкцій та покриття. Також вимірювалася температура вихідних гарячих газів з отворів житлових приміщень за допомогою моделі горизонтальних та вертикальних площин розподілів температурних потоків по моделям приміщень (рис. 4).



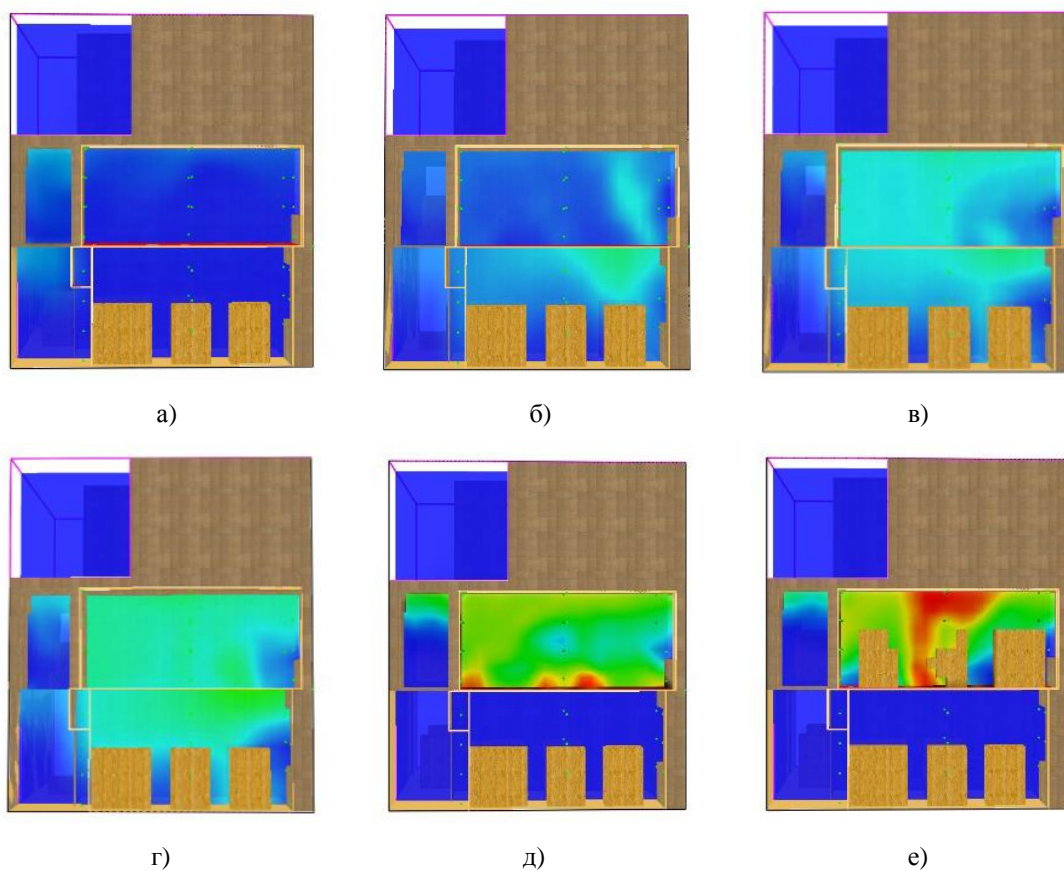
**Рисунок 4** – Горизонтальні та вертикальні площини розподілу температурних потоків по площині житлової будівлі

Відповідно була сформована 3D модель пожежного навантаження в досліджуваній будівлі, представлена на рис. 5.



**Рисунок 5** – План розташування пожежного навантаження у триповерховій будівлі:  
а – на першому поверсі; б – на другому поверсі

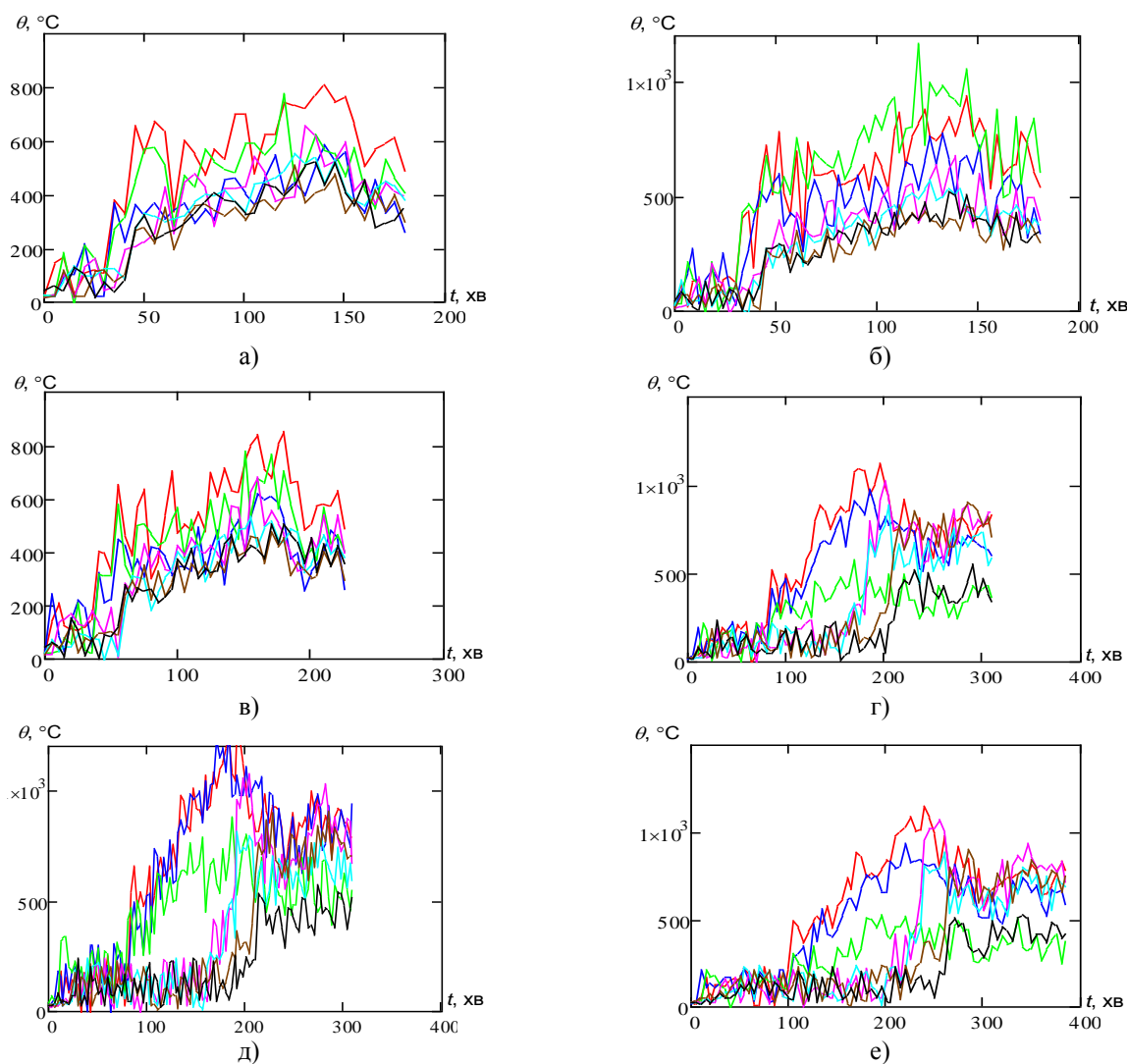
У результаті розрахунку були отримані розподіли температури по площині на відповідних площинах. Отримані результати наведені на рис. 6.



**Рисунок 6** – Температурні розподіли у площині в розрізі приміщень будівлі у різні моменти часу її розвитку:  
а) – 600 с; б) – 1200 с; в) – 1800 с; г) – 2400 с; д) – 3000 с; е) – 3600 с

Відповідно до температурних датчиків (термопар), що були встановлені відповідно до схем розташування термопар (рис. 3), було виділено

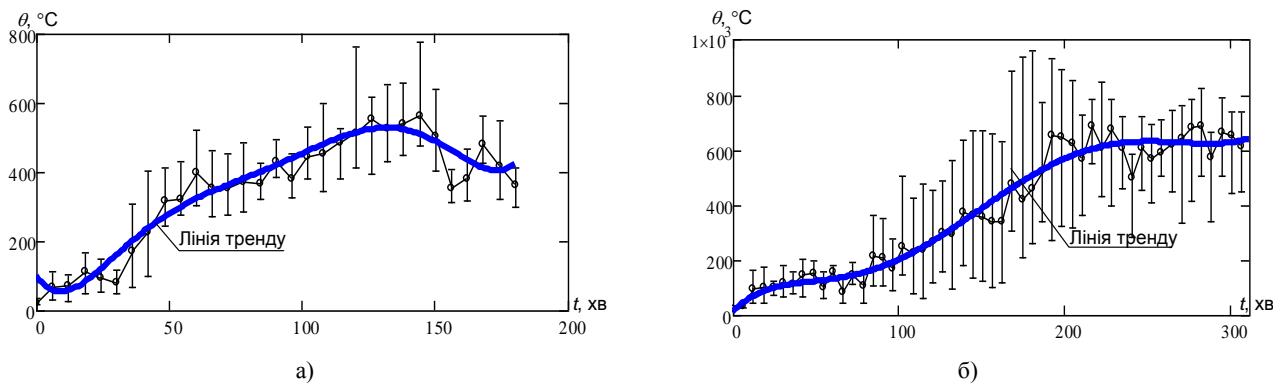
площини з термопарами П1...П6 та отримано графіки залежності температури від часу. Результати наведені на рис. 7.



**Рисунок 7** – Показники температури у площинах вимірювання (рис. 6): а) – 1п; б) – 2п; в) – 3п; г) – 4п; д) – 5п; е) – 6п

Для перевірки адекватності отриманих результатів були побудовані лінії тренду залежності середньооб'ємної температури від часу та

відповідні дисперсії відхилень. Побудовані графічні залежності наведено на рис. 8.



**Рисунок 8** – Графіки залежностей середньооб'ємної температури від часу та відповідні дисперсії відхилень для приміщення: а) – на першому поверсі; б) – на другому поверсі

З метою дослідження достовірності результатів моделювання температурних режимів для повномасштабних випробувань у приміщеннях триповерхової будівлі були досліджені основні статистичні параметри отриманих даних. Дані щодо середніх абсолютних відхилень, середніх відносних відхилень, середніх квадратичних відхилень показників термодинаміки для відповідних випробувань, що досліджувалися, наведені в табл. 3.

**Таблиця 3**

Абсолютні відхилення, відносні відхилення, квадратичні відхилення температурних режимів, що порівнювалися з експериментальними даними [25]

№ з/п	Положення приміщення	Абсолютні відхилення, °С	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °С
1	Перший поверх	130,1	24,8	56,4
2	Другий поверх	145,5	27,4	44,8
Середні значення		137,8	26,1	50,6

Дані табл. 3 показали, що похибка, зумовлена різницею між розрахунковими та експериментальними даними, показує прийнятну точність визначеної середньооб'ємної температури за допомогою математичного моделювання. Відносна похибка не перевищує 28 %, а середньоквадратичне відхилення не перевищує 51°С. Це означає, що результати моделювання температури для повномасштабних випробувань у триповерховій будівлі мають достатню точність.

#### Висновки

1. Проведено чисельний експеримент з моделювання повномасштабних випробувань приміщень із пожежею триповерхової будівлі із застосуванням методів комп'ютерної газогідродинаміки. Визначено характер перебігу пожежі та часові залежності її основних параметрів, що у свою чергу дало змогу проаналізувати адекватність результатів моделювання і дослідити їх адекватність та точність.

2. Отримані результати досліджень точності моделювання повномасштабних випробувань приміщень із пожежею у триповерховій будівлі показали, що похибка, визначена при порівнянні експериментальних та розрахункових даних, не мала істотних значень. Відносна похибка не перевищувала 28 %, а середньоквадратичне відхилення не перевищувало 51°С. Це означає, що результати моделювання температури для повномасштабних випробувань у триповерховій будівлі є достатньо точними.

3. Показано, що величини статистичних критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера для

результатів моделювання, зумовлені різницею між розрахунковими та експериментальними даними, мають величини відповідно не більше 0,98; 0,84 та 1,008 і не перевищують табличних значень. Це означає, що результати моделювання є адекватними, що дає змогу використовувати цей підхід для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в реальних умовах пожежі.

#### Список літератури

1. Шналь Т., Синенько І., Стасюк М. Характеристика моделей розвитку пожеж. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва»*. 2011. № 697. С. 252–256.
2. Астахова І., Беляцкий В., Брушлинский Н. и др. (под общ. ред. Н. Н. Брушлинского, А. Я. Корольченко). *Моделирование пожаров и взрывов: монография*. М.: Ассоц. "Пожнаука", 2000. 482 с.
3. Семерак М., Юзьків Т. Математичне моделювання та дослідження термонапруженого стану огорожувальних конструкцій, обумовленого пожежею. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*. Львів: ЛПБ, 2005. № 7. С. 128–132.
4. Семерак М., Домінік А., Субота А. Теплові потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі. *Пожежна безпека: зб. наук. праць*. Львів: ЛДУ БЖД, 2011. № 19. С. 131–136.
5. EN 1991-1-2 (2002). Eurocode 1: Actions and Structures. Part 1-2: General Actions on Structures Exposed to Fire.
6. Шналь Т., Синенько І., Ясінський Д. Аналіз методів проведення натурних випробувань на вогнестійкість будівель і споруд. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва»*. 2010. № 664. С. 357–362.
7. Данкевич І., Шналь Т., Демчина Б. Дослідження температурного режиму пожежі у модельному приміщенні. *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва»*. 2012. № 742. С. 46–51.
8. Данкевич І., Прохоренко С., Шналь Т., Юзьків Т., Коваль О. Дослідження нагріву огорожувальних конструкцій під час пожежі у житловому приміщенні. *Науковий вісник УкрНДДПБ*. 2013. № 1 (27). С. 167–172.
9. Hietaniemi, J., Hostikka, S., Vaari. J. (2004). FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2004/W4.pdf>
10. Anderson, J., Jansson, R. (2013). Fire Dynamics in Facade Fire Tests: Measurement and Modeling, Proceedings of Interflam 2013, page 93, Royal Holloway College, University of London UK
11. Anderson, J., Jansson, R. (2013). Facade fire tests – measurements and modeling, MATEC Web of Conferences 9, 02003. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20130902003>



12. Anderson, J., Boström, L., Jansson, R., Milovanović, B. (2015). Fire dynamics in facade fire tests: Measurement, modeling and repeatability, Applications of Structural Fire Engineering, 15-16 October 2015. <https://doi.org/10.14311/asfe.2015.059>

13. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. (2016). Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPIR2 testing facility. MATEC Web of Conferences 46 03001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164603001>

14. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread - Horizontal projections or spandrels?, 14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK, Vol. 2, pp. 1163-1174. [https://www.researchgate.net/publication/306078631\\_Protection\\_against\\_external\\_fire\\_spread\\_-\\_Horizontal\\_projections\\_or\\_spandrels](https://www.researchgate.net/publication/306078631_Protection_against_external_fire_spread_-_Horizontal_projections_or_spandrels)

15. Nilsson, M., Nilsen, J., & Mossberg, A. (2016). Validating FDS against a large-scale fire test for facade systems, 3rd Fire and Evacuation Modelling Technical Conference (FEMTC), Melia Costa del Sol in Torremolinos, Spain. [https://www.researchgate.net/publication/311264945\\_Validating\\_FDS\\_against\\_a\\_large-scale\\_fire\\_test\\_for\\_facade\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/311264945_Validating_FDS_against_a_large-scale_fire_test_for_facade_systems)

16. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>

17. Nekora O., Slovynsky V., Pozdieiev S. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>

18. Semerak, M., Pozdeev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O., Sviatkevych, O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences 247, 00040 (2018). Fire and Environmental Safety Engineering 2018 (FESE 2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700040>

19. Pozdieiev, S., Nekora, O., Kryshthal, T., Zazhoma, V., Sidnei, S. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire (2018) MATEC Web of Conferences, 230, art. no. 02026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002026>

20. McGrattan, K., et al. (2015). Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.2.0, SVN Repository Revision: 22352, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA.

21. ООО «СИТИС». TP-5078. Перевод технической документации к программе Fire Dynamics Simulator (FDS) Версия 6. Техническое руководство к программе моделирования динамики пожара. Математическая модель.

22. Guan H. Y., Kwok K. Y. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering // Theory, Modeling and Practice, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science and Technology, ISBN: 978-0-7506-8589-4, 2009. – 530 p.

23. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, Теоретическая физика, том VI, 1988. 736 с.

24. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Методические рекомендации. ВНИИПО. М., 2003. 35 с.

25. Шналь Т., Коваль М., Демчина Б., Коваль П., Кархут І. Повномасштабні пожежні випробування фрагменту великопанельної будівлі. Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва». 2008. № 600. С. 208–212.

## References

1. Shnal T., Synenko I., Stasyuk M. (2011). Characteristics of fires development models. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic Theory and Building Practice*, 697, 252–256.

2. Brushlinsky N.N., Korolchenko A.Ya., Astahova, I.F., Belyatsky V.P. and Vogman L.P., eds. (2000). *Modelirovaniya pozharov i vzryvov* [Design of fires explosions]. Moskva: "Pozhnauka", 482 p. (in Russian).

3. Semerak M., Yuzkiv T. (2005). Mathematical modeling and investigation of the thermal stress condition of enclosures constructed by fire. *Fire Safety*, 7, 128-132.

4. Semerak M., Dominik A., & Subota A. (2011). Thermal flows caused by fire fakel waves. *Fire Safety*, 19, 131-136.

5. EN 1991-1-2 (2002). Eurocode 1: Actions and Structures. Part 1-2: General Actions on Structures Exposed to Fire.

6. Shnal T., Synenko I., Yasinsky D. (2010). Analysis of methods of conducting field tests for fire resistance of buildings and structures. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic Theory and Building Practice*, 664, 357–362.

7. Dankevich I., Schnal T., Demchina B. (2012). Investigation of the temperature regime of fire in a model room. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic Theory and Building Practice*, 742, 46–51.

8. Dankevich I., Prokhorenko S., Shnal T., Yuzkiv T., Koval O. (2013). Research of the heating process of fencing constructions at the time of fire within a living space. *Scientific bulletin of the Ukrainian Research Institute of Civil Protection*, 27, 167–172.

9. Hietaniemi, J., Hostikka, S., Vaari. J. (2004). FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2004/W4.pdf>

10. Anderson, J., Jansson, R. (2013). Fire Dynamics in Facade Fire Tests: Measurement and Modeling, Proceedings of Interflam 2013, page 93, Royal Holloway College, University of London UK

11. Anderson, J., Jansson, R. (2013). Facade fire tests – measurements and modeling, MATEC Web of Conferences 9, 02003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130902003>
12. Anderson, J., Boström, L., Jansson, R., Milovanović, B. (2015). Fire dynamics in facade fire tests: Measurement, modeling and repeatability, Applications of Structural Fire Engineering, 15-16 October 2015. <https://doi.org/10.14311/asfe.2015.059>
13. Dréan V., Schillinger R., Auguin G. (2016). Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPiR2 testing facility. MATEC Web of Conferences 46 03001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164603001>
14. Nilsson, M., Mossberg, A., Husted, B., & Anderson, J. (2016). Protection against external fire spread - Horizontal projections or spandrels?, 14th International Fire Science & Engineering Conference, Royal Holloway College, University of London, UK, Vol. 2, pp. 1163-1174. [https://www.researchgate.net/publication/306078631\\_Protection\\_against\\_external\\_fire\\_spread\\_-\\_Horizontal\\_projections\\_or\\_spandrels](https://www.researchgate.net/publication/306078631_Protection_against_external_fire_spread_-_Horizontal_projections_or_spandrels)
15. Nilsson, M., Nilsen, J., & Mossberg, A. (2016). Validating FDS against a large-scale fire test for facade systems, 3rd Fire and Evacuation Modelling Technical Conference (FEMTC), Melia Costa del Sol in Torremolinos, Spain. [https://www.researchgate.net/publication/311264945\\_Validating\\_FDS\\_against\\_a\\_large-scale\\_fire\\_test\\_for\\_facade\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/311264945_Validating_FDS_against_a_large-scale_fire_test_for_facade_systems)
16. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02027. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602027>
17. Nekora O., Slovynsky V., Pozdieiev S. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711602024>
18. Semerak, M., Pozdeev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O., Sviatkevych, O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences 247, 00040 (2018). Fire and Environmental Safety Engineering 2018 (FESE 2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824700040>
19. Pozdieiev, S., Nekora, O., Kryshchal, T., Zazhoma, V., Sidnei, S. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire (2018) MATEC Web of Conferences, 230, art. no. 02026. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002026>
20. McGrattan, K., et al. (2015). Fire Dynamics Simulator User's Guide, FDS Version 6.2.0, SVN Repository Revision: 22352, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA.
21. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018. Sixth Edition
22. Guan H. Y., Kwok K. Y. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering // Theory, Modeling and Practice, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science and Technology, ISBN: 978-0-7506-8589-4, 2009. – 530 p.
23. Landau L., Lifshitz E. (1988). Hydrodynamics. Moskva: "Nauka, Teoretycheskaya fizyka ", VI, 736 p. (in Russian).
24. Application of a field method of mathematical modeling of the fire in rooms. (2003). Recommended Practice. Moskva: "VNIPO", 35 p. (in Russian).
25. Shnal T., Koval M., Demchina B., Koval P., Karchut I. (2008). Full-scale fire tests of a large-panel building fragment. *Bulletin of the National University of Lviv Polytechnic Theory and Building Practice*, 600, 208–212.

**\*Науково-методична стаття**