

*А. В. Перегін, О. М. Нуянзін, канд. техн. наук, доцент,  
М. А. Кришталь, канд. психол. наук, професор, П. І. Заїка, канд. техн. наук, доцент  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України*

## **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОМАСООБМІНУ У КАМЕРАХ ВОГНЕВИХ ПЕЧЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Вдосконалення методів та засобів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій належить до актуальних питань, оскільки, як при експериментальних так і при розрахункових методах визначення існують похибки. За результатами даної роботи встановлено наступне:*

*Метою роботи була розробка комп'ютерної моделі вогневої печі в програмному комплексі FDS та аналіз результатів моделювання тепломасообміну для виявлення можливостей відтворення умов випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.*

*Було проаналізовано математичний апарат та можливості програмного комплексу FDS, які дозволяють створити установки з факельним горінням для моделювання тепломасообміну у камері вогневих печей. Розкрито алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням у вищезазначеному програмному комплексі. В даному програмному комплексі обчислювальної газогідродинаміки було створено дві Конфігурації, які відрізнялися геометричними розмірами та кількістю пальників для проведення обчислювальних експериментів. Перевірено розподіл температур по всій площі печі у створених Конфігураціях та проаналізовано отримані результати моделювання тепломасообміну у камерах вогневих печей. Математичний апарат та можливості програмного комплексу FDS дозволяють створити установки з факельним горінням для моделювання тепломасообміну у камері вогневих печей.*

*Проаналізувавши отримані результати стало можливим стверджувати, що існують суттєві недоліки у створенні моделей. Особливістю програмного комплексу є те, що в процесі розрахунку неможливо коригувати інтенсивність горіння факелів полум'я. Дані закладаються у препроцесор, задається час розрахунку, далі FDS працює автономно, що не дозволяє відтворити стандартний температурний режим у камері печі. Відбувається інтенсивне прогрівання камери печі. Вже через дві хвилини досягається стаціонарна температура, яка тримається протягом часу розрахунку.*

**Ключові слова:** несуча стіна, математичне моделювання, температурний режим пожежі, обчислювальна газогідродинаміка (CFD).

**Постановка проблеми.** Під час пожежі відбувається втрата несучої здатності будівельних конструкцій під впливом високих температур. Це залежить від ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій та тривалості теплового впливу. Людина може отримати механічні травми, опинитися під уламками завалених будівельних конструкцій. Також можуть просто бути зруйновані шляхи евакуації, завалені евакуаційні виходи. На відміну від забезпечення збереження будівельних конструкцій, в незалежності від

економічних міркувань, безпека людей має бути гарантована у всіх випадках. Одним з важливих аспектів в наш час, для забезпечення пожежної безпеки, є застосування будівельних конструкцій з гарантованою межею вогнестійкості. На сьогоднішній день є три відомі і основні методи визначення вогнестійкості: експериментальний метод, розрахунковий та експериментально-розрахунковий. Тому, питання вдосконалення і поліпшення характеристик установок даних методів є актуальними і важливими.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Встановлюються особливі вимоги до вогневих печей, які полягають в тому, що факел, який використовується в печах, повинен створюватися на рідкому паливі, тим самим, полум'я факела не повинне торкатися поверхонь елементів конструкцій, що нагріваються, внаслідок чого може бути інтенсивний вплив факелу полум'я на експериментальну конструкцію, та відповідно ми не зможемо отримати достовірні дані стосовно встановлення характеристик випробувального матеріалу, відповідно до процесу експерименту, нагрівальна камера повинна забезпечувати рівномірно розподілену температуру протягом випробування в об'ємі нагрівальної камери, відповідно температура повинна мінятися за температурним режимом пожежі, відносно до часу, відповідно до стандарту [1]. Управління паливною системою не може забезпечити рівномірність розподілу температури в печі для того, щоб забезпечити відповідність стандартного температурного режиму пожежі, тому існує певна похибка реалізації режиму нагріву елемента [2].

В роботі [3] засобами комп'ютерної газогідродинаміки Flow Vision були створені та досліджені дві конфігурації вогневих печей з габаритними розмірами: висота 3000 мм, ширина 3000 мм, глибина 1500 та 1200, та з пальниками в кількості 4 та 6 шт. В даній роботі продемонстровано результати чисельного моделювання ряду комп'ютерних конфігурацій установки для випробування будівельних конструкцій. З результатів цієї роботи стало відомо, що в даному програмному комплексі також можна побачити нерівномірність розподілу температур на обігрівальній поверхні конструкцій під час випробувань на вогнестійкість. Аналізуючи попередні розрахунки, висвітлені в роботі [3], можна зазначити, що вдосконалення установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій належить до актуальних питань, оскільки в наявних вогневих печах установки істотно відрізняються геометричною конфігурацією, видом паливно-форсункової системи, схемами

розташування й конструкцією вимірювальної арматури, економічними параметрами вогневих печей при експлуатації та побудові камер.

За результатами роботи [4], де проводилося моделювання повномасштабних вогневих випробувань, зазначено, що похибка, визначена при порівнянні експериментальних та розрахункових даних, не мала істотних значень. Це означає, що результати моделювання є адекватними, що дає змогу використовувати цей підхід, а саме моделювання за допомогою програмних комплексів, для прогнозування поведінки будівельних конструкцій в наближених до реальних умов пожежі.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Відповідно до проведених раніше досліджень [2–5], методи та засоби мають похибки, тому доцільно провести додаткове дослідження та встановити можливість моделювання тепломасообміну для виявлення ймовірності відтворення умов випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.

У існуючих наукових роботах не перевірялася можливість моделювання установок для випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій в програмному комплексі FDS.

З огляду на це, для проведення досліджень передбачається використання модельної печі, вогневих камер відповідних варіантів, із оглядом двох конфігурацій модельної печі, яка відповідно до програмного комплексу Fire Dynamics Simulator може бути змодельована з урахуванням основних вимог [1, 6].

**Постановка задачі та її розв'язання.** Для вирішення поставленої мети, а саме: розробка комп'ютерної моделі вогневої печі в програмному комплексі FDS та аналіз результатів моделювання тепломасообміну для виявлення можливостей відтворення умов випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій, було зазначено ряд задач:

- проаналізувати можливість програмного комплексу FDS, створити установки з факельним горінням для

випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій;

- розробити алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням у вищезазначеному програмному комплексі;

- створити установку для проведення випробування на вогнестійкість будівельних конструкцій;

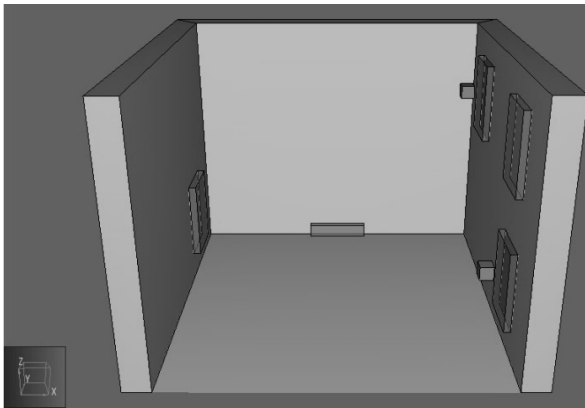
- проаналізувати отримані результати та можливість створення факельного горіння у випробувальній установці.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** Польові моделі, позначені в зарубіжній літературі

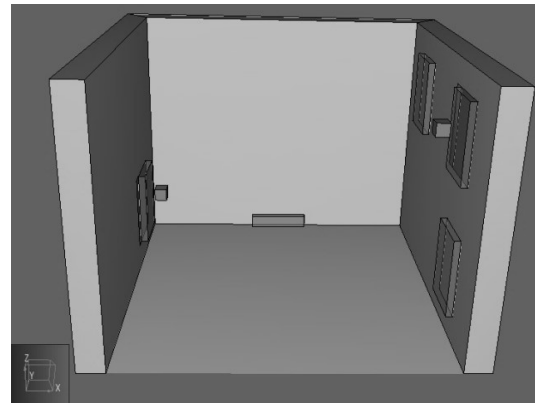
абревіатурою CFD (computational fluid dynamics – англ. обчислювальна гідродинаміка), є більш потужним та універсальним інструментом, ніж зональні та інтегральні, оскільки ґрунтовані на зовсім іншому принципі. Переваги вказаних моделей детально відображено у [2].

На першому етапі роботи було розроблено алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням та розглянуто дві конфігурації вогневих печей для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.

Геометричні конфігурації печей зображені на рис. 1., а габаритні розміри камер зазначені – в табл. 1.



а



б

Рисунок 1 – Геометричні конфігурації вогневих печей: а – Конфігурація 1 та б – Конфігурація 2.

Основні принципи побудови математичної моделі, створення сіткової моделі печі показано на рис. 2.

Для створення моделей вогневих печей за стандартними розмірами,

необхідно створити сітку та зазначити її границі: довжину, ширину та висоту, та зазначити кількість комірок по X, Y, та Z. Кількість комірок можна встановлювати самостійно.

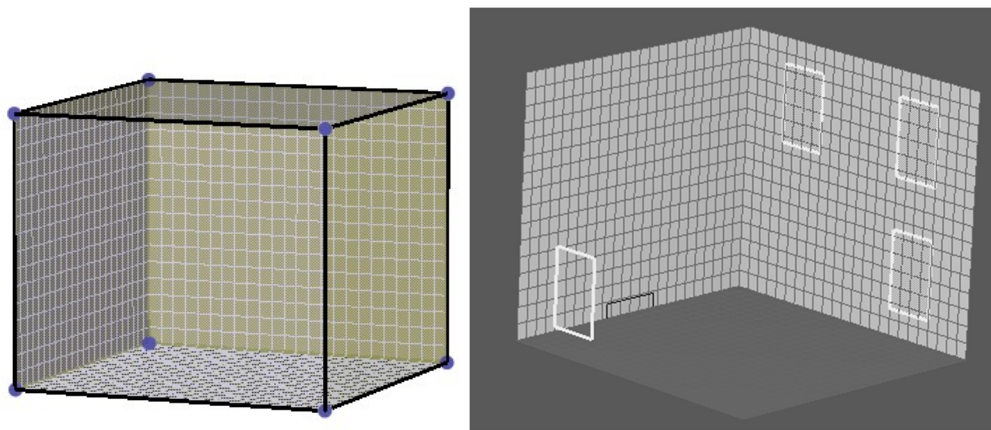


Рисунок 2 – Сіткова модель розрахункової області конфігурацій вогневих печей 1 та 2.

*«Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 4 № 1 (2020)*

Відповідно до поставлених завдань було обрано один із інструментів CFD, а саме: програма Fire Dynamics Simulator (далі – FDS), яка була розроблена Національним інститутом стандартів і технологій (НІСТ) міністерством торгівлі США за сприяння Технічного науково-дослідного центру VTT

(Фінляндія). FDS - безкоштовне програмне забезпечення. Авторські права розробників не захищені, програма є загальнодоступним програмним забезпеченням. Тому, було обрано для моделювання польових моделей саме FDS.

Таблиця 1 – Габаритні розміри установок для випробувань на вогнестійкість будівельних конструкцій.

Назва печі	Розміри вогневої камери, мм			Кількість пальників у печі	Кількість отворів для виходу продуктів горіння
	ширина	висота	глибина		
Випробувальна піч Конфігурації 1	1000	1000	1000	2	1
Випробувальна піч Конфігурації 2	1200	1000	1200	2	1

Відповідно до габаритів вогневих печей було обрано дев'ять термопар, які представлені на рис. 3. З урахувань можливостей програмного забезпечення FDS додатково були створені площини, які зможуть графічно висвітлити розподіл

температур по площинам відповідно до рис. 4.

Даний програмний комплекс дає змогу працювати як в 2D, 3D так і в текстовому режимі.

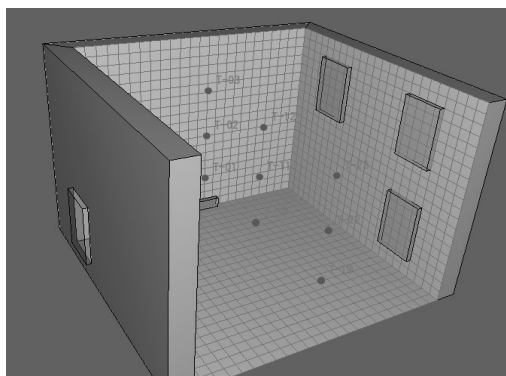
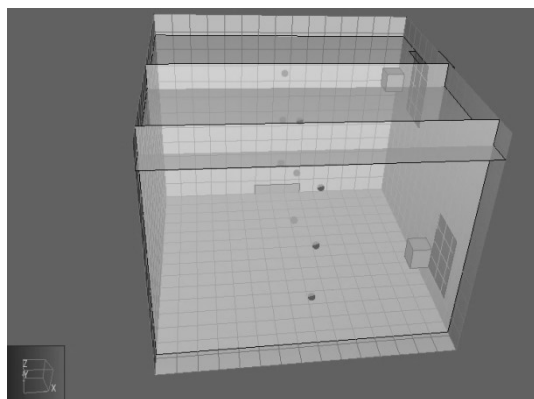


Рисунок 3 – Розташування термопар в 3D моделях конфігурацій вогневих печей.



а



б

Рисунок 4 – Розташування температурних площин в 3D моделях конфігурацій вогневих печей: а – Конфігурація 1; б – Конфігурація 2.

У наступному етапі роботи було проаналізовано розподіл температур по поверхні конструкції на 60-й хвилині випробувань [7].

На рис. 5 показано розподіл температур по площині у раніше

висвітлених місцях розташування (див. рис. 4), біля поверхонь конструкцій вогневої печі, фрагменту несучої стіни, біля форсунок та виходів продуктів горіння у кожній з конфігурацій на 10-й та 60-й хвилині випробувань.

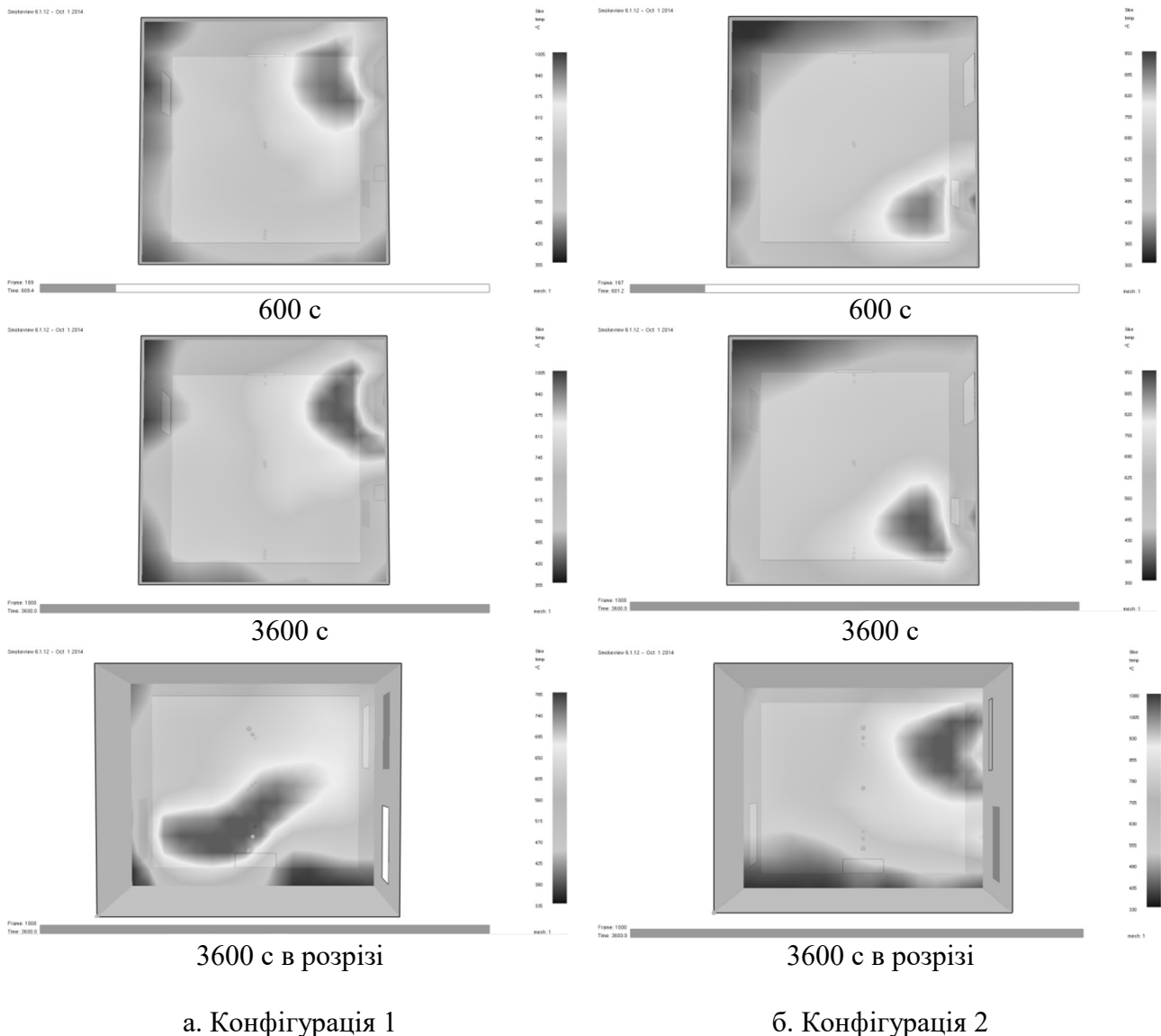


Рисунок 5 – Площини температурного розподілу в змодельованих вогневих печах.

Основними недоліками «Конфігурації 1» (рис. 1-а) є, порівняно з іншими конфігураціями, невеликий розмір печі, недосконале розташування отворів для відведення продуктів горіння та розташування форсунок. За рахунок цього, фрагмент конструкції прогривається нерівномірно. Конструкція прогривається слабше у лівій крайній частині камери печі та над отворами для відведення продуктів горіння.

Змінюючи конструкцію внутрішнього простору камери установки «Конфігурації 2» (рис. 1-б) та змінюючи розміщення 2-х пальників, температура рівномірно розподілилась по обігрівальній поверхні фрагменту (рис. 1-б). Відбувся більш характерний розподіл температур по вертикалі внаслідок правильного розміщення отворів для відведення продуктів горіння, біля яких конвективні потоки були направлені у бік означених

отворів і температура рівномірно розподілилася саме по поверхні фрагменту.

Відповідно до проведених розрахунків було експериментально

визначено температуру на дев'яти встановлених термопарах в печі, які представлені на рисунку 6.

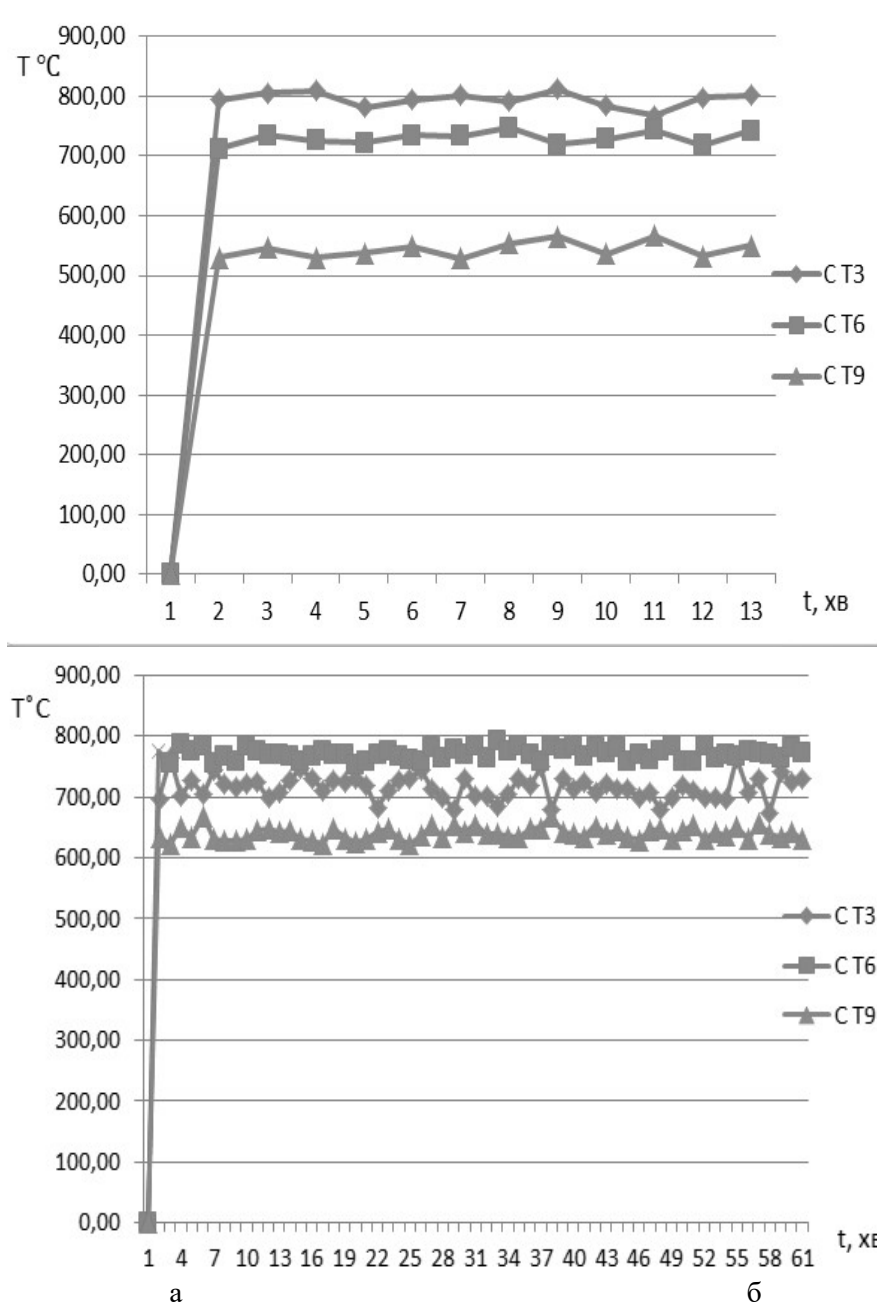


Рисунок 6 – Графіки температур термопар Т3, Т6, Т9 в площині печей під час обчислювального експерименту: а – Конфігурація 1, б – Конфігурація 2.

Відповідно до проведення моделювання печей з конфігураціями 1 та 2, було отримано наступні дані термопар, які представлені на рис. 6, що свідчать про рівномірний розподіл температур по всій площі печі. Через малі габарити печі та неможливість змінювати початкові дані подачі газу для нагрівання камери. Максимальна температура в обох

конфігураціях була досягнута вже на 3-й хвилині і склала в Конфігурації 1 – 810 °С, а в Конфігурації 2 – 790 °С у верхній частині печей, та 520 °С і 620 °С відповідно у нижній частині. Абсолютне відхилення температури у горизонтальних площинах не перевищило 30 °С. Проте, температурний режим, що створюється в печі, не відповідає стандартному [1].

Виходячи з отриманих даних, можемо зробити наступні висновки.

**Висновки.** Вдосконалення методів та засобів оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій належить до актуальних питань, оскільки, як при експериментальних так і при розрахункових методах визначення існують похибки. За результатами даної роботи встановлено наступне:

1. Математичний апарат та можливості програмного комплексу FDS дозволяють створити установки з факельним горінням для моделювання тепломасообміну у камері вогневих печей.

2. Описано алгоритм створення моделі вогневої печі з факельним горінням у вищезазначеному програмному комплексі. Показані особливості створення геометричної та сіткової моделей. Було обрано дві конфігурації вогневих печей, що відрізнялись геометричними характеристиками для проведення обчислювальних експериментів.

3. Відповідно до проведених обчислювальних експериментів з моделюванням тепломасообміну у камері вогневих печей відбувається рівномірний розподіл температур по всій площі печі,

максимальна досягнута температура в конфігурації була досягнута на 810 °С, а в 2 конфігурації 790 °С. Розбіжність температур в різних площинах не перевищувала 30 °С;

4. Проаналізувавши отримані результати можливо стверджувати, що існують суттєві недоліки. Особливістю програмного комплексу є те, що в процесі розрахунку неможливо коригувати інтенсивність горіння факелів полум'я. Дані закладаються у препроцесор, задається час розрахунку, далі FDS працює автономно, що не дозволяє відтворити стандартний температурний режим у камері печі. Відбувається інтенсивне прогрівання камери печі. Вже через одну хвилину досягається стаціонарна температура, яка тримається протягом часу розрахунку.

5. З результатів проведеної роботи та вище описаних у п.4 недоліків, зазначаємо, що використання програмного комплексу FDS має обмеження. Вони зумовлені неможливістю задати температурний режим нагріву камери печі, можна визначити лише рівномірність прогрівання камери печі та обігрівальної поверхні конструкцій у ній.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975): ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Чинний від 1998-10-28]. - К.: Укрархбудинформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).

2. Аналіз існуючих математичних моделей тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін / Нуянзін О. М., Поздєєв С. В., Сідней С. О. [та ін.] // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси: АПБ, 2015. – № 18. – С. 91 – 100.

3. Математичне моделювання процесу тепломасообміну у камерах вогневих печей установок для випробувань на вогнестійкість несучих стін / Нуянзін О. М., Поздєєв С.В., Нуянзін В. М., Сідней

С. О., // Пожежна безпека: теорія і практика, 2015. – № 20.

4. Математичне моделювання розвитку пожежі у триповерховій житловій будівлі при проведенні у ній повномасштабних вогневих випробувань / Т. М. Шналь, С. В. Поздєєв, Р. С. Яковчук, О. В. Некора, С. О. Сідней, // Пожежна безпека, 2020

5. Вплив конструктивних особливостей вогневих печей на достовірність результатів випробувань стін на вогнестійкість / Сідней С. О., Нуянзін О. М., Поздєєв С.В.// Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки : зб. наук. праць. – Київ : УкрНДІЦЗ, 2015. – № 1 (31). – С. 4–12.

6. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2016.

7. Руководство пользователя программы FDS(Версия 5) / Кэвин МсГраттан, Брайн Клейн, Симо Хостикка, Джейсон Флойд в сотрудничестве с Техническим научно-исследовательским центром VTT - М.: НИСТ, 2007. – 15 с.

## REFERENCES

1. Zakhyst vid pozhezhi. Budivel'ni konstruktsiyi. Metody vyprobuvannya na vohnestiykist'. Zahal'ni vymohy (ISO 834:1975): DSTU B V.1.1-4-98. – [Chynnyu vid 1998-10-28]. - K.: Ukrarkhbudynform, 1999. – 21s. – (Derzhavnyy standart Ukrainy).
2. Analiz isnuuyuchykh matematychnykh modeley teplomasoobminu u kamerakh vohnovykh pechey ustanovok dlya vyprobuvan' na vohnestiykist' nesuchykh stin / Nuyanzin O. M., Pozdyeyev S. V., Sidney S. O. [ta in.] // Pozhezhna bezpeka : teoriya i praktyka : zb. nauk. prats'. – Cherkasy: APB, 2015. – № 18. – S. 91 – 100.
3. Matematyчне modelyuvannya protsesu teplomasoobminu u kamerakh vohnovykh pechey ustanovok dlya vyprobuvan' na vohnestiykist' nesuchykh stin / Nuyanzin O. M., Pozdyeyev S.V., Nuyanzin V. M., Sidney S. O., // Pozhezhna bezpeka: teoriya i praktyka, 2015. – № 20.
4. Matematyчне modelyuvannya rozvytku pozhezhi u trypoverkhoviy zhytloviy budivli pry provedenni u niy povnomasshtabnykh vohnovykh vyprobuvan' / T. M. Shnal' , S. V. Pozdyeyev , R. S. Yakovchuk , O. V. Nekora , S. O. Sidney, // Pozhezhna bezpeka, 2020.
5. Vplyv konstruktivnykh osoblyvostey vohnovykh pechey na dostovirnist' rezul'tativ vyprobuvan' stin na vohnestiykist' / Sidney S. O., Nuyanzin O. M., Pozdyeyev S.V.// Naukovyy visnyk Ukrayins'koho naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky : zb. nauk. prats'. – Kyiv : UkrNDITSZ, 2015. – № 1 (31). – S. 4–12.
6. Zakhyst vid pozhezhi. Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva. DBN V.1.1-7-2016.
7. Rukovodstvo pol'zovatelya programy FDS(Versiya 5) / Kevin MsGrattan, Brayn Kleyn, Simo Khostikka, Dzheyson Floyd v sotrudnichestve s Tekhnicheskim nauchno-issledovatel'skim tsentrom VTT - М.: NIST, 2007. – 15 s.

*A. V. Peregin, O. M. Nuianzin, Candidate of technical science, docent,  
M. A. Krystal, Candidate of psychological science, professor  
P. I. Zaika, Candidate of technical science, docent  
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes  
of National University of Civil Defence of Ukraine*

## COMPUTER SIMULATION OF HEAT EXCHANGE IN FIRE STOVE FURNACE INSTALLATIONS FOR FIRE RESISTANCE TESTS OF BUILDING CONSTRUCTION

*Improving the methods and means of assessing the fire resistance of building structures is a topical issue, because both experimental and computational methods of determination there are errors. According to the results of this work, the following is established:*

*The aim of the work was to develop a computer model of a fire furnace in the FDS software package and to analyze the results of heat and mass transfer modeling to identify the possibility of reproducing the test conditions for fire resistance of building structures.*

*The mathematical apparatus and possibilities of the FDS software package were analyzed, which allow to create flame-burning installations for modeling heat and mass transfer in the furnace chamber. An algorithm for creating a model of a fire furnace with flame combustion in the above software package is revealed. In this software package of computational gas hydrodynamics, 2 configurations were created, which differed in geometric dimensions and the number of burners for computational experiments. The distribution of temperatures over the entire*



*area of the furnace in the created Configurations is checked and the obtained results of heat and mass transfer modeling in fire furnace chambers are analyzed.*

*After analyzing the results, it became possible to say that there are significant shortcomings in the creation of models. The peculiarity of the software package is that in the process of calculation it is impossible to adjust the intensity of the flame flares. The data is stored in the preprocessor, the calculation*

*time is set, then the FDS works autonomously, which does not allow to reproduce the standard temperature in the furnace chamber. There is an intense heating of the furnace chamber. After 2 minutes, a steady state temperature is reached, which is maintained during the calculation time.*

**Keywords:** *load-bearing wall, mathematical modeling, fire temperature regime, computational fluid dynamics (CFD).*