

УДК 624.012.4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ МАЛОГАБАРИТНОЇ ВОГНЕВОЇ УСТАНОВКИ НА РІВНОМІРНІСТЬ НАГРІВАННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2.4-12>

Степаненко В.О., ORCID iD 0009-0001-0839-197X
E-mail: utihar30@gmail.com

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

21.08.2024

Пройшла рецензування:

03.10.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

моделювання,
сталезалізобетон, плита,
рівномірність, пожежа, піч,
конструкція, вогнестійкість,
випробування, температура

АНОТАЦІЯ

Мета роботи – перевірка можливості змодельовати тепломасоперенос усередині камери вогневої печі та аналіз якості роботи комп'ютерної моделі під час нагрівання сталезалізобетонних плит із гофрованим профілем. Проведено порівняння результатів з експериментальними даними. Для створення геометричних моделей використано CAD-програмний комплекс. Далі 3-D модель імпортовано у програмний комплекс CFD. Для відтворення процесу тепломасообміну у вогневій печі застосовані математичні методи, засновані на використанні системи диференціальних рівнянь на основі неперервних середовищ типу Нав'є-Стокса, рівнянь теплопровідності в умовах нагрівання під час пожежі та рівняння теплопровідності Фур'є. У комп'ютерній моделі камери вогневої печі створено розрахункову сітку. Розмір комірок визначено згідно з принципом розумної достатності. Відповідно до отриманих результатів зовнішня поверхня гофрованого сталевого профілю сталезалізобетонної конструкції прогрівалась відносно рівномірно. Вища температура спостерігалась у рівних частинах, нижча – на згинах. Максимальною була температура на обігрівній поверхні несучої стіни на останній хвилині моделювання і досягала 840 °С, а середня температура в цей момент часу на усій поверхні конструкції становила 820 °С. Розподіл температур по поверхні конструкції є рівномірним, відхилення у різних місцях поверхні не перевищує 5%. Здійснено порівняння температурних режимів у камері печі під час експериментальних досліджень та моделювання. Результати засвідчили достатньо високу їх відтворюваність.

Постановка проблеми. Одним з основних завдань під час проєктування будівель є гарантування пожежної безпеки та вогнестійкості будівельних конструкцій, яка має відповідати вимогам пожежних норм сьогодення. Межі вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій зазвичай досліджуються проведенням випробувань стандартним методом у спеціальних випробувальних установках. Але сукупність певних норм, правил та методів, що призначені для забезпечення достовірності вимірювань, і самі конструкції не є досконалими. З огляду на це їх необхідно поліпшувати. Також постійно вдосконалюють і підходи до будівництва, матеріали, будівельні конструкції. В умовах сьогодення часто використовують монолітне будівництво.

Зокрема, для облаштування перекриттів громадських будівель набули поширення сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем. Така плита достатньо міцна і не потребує створення додаткової опалубки з деревини. Проте досліджень з вогнестійкості таких виробів недостатньо. Це може спричинити помилкове оцінювання межі їхньої вогнестійкості та перешкодити безпечній евакуації людей внаслідок обвалення перекриття раніше запроєктованого терміну. Для вирішення цієї задачі доцільно проводити дослідження з використання вогневих установок і моделювання. У цій роботі змодельовано прогрів камери малогабаритної печі під час нагрівання сталезалізобетонної плити та проаналізовано адекватність обчислювального експерименту на основі

експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Є вимоги щодо вогнестійкості перекриттів і процесу її оцінювання, що регламентується нормативними документами [1–3]. У цих актах визначено можливість проведення випробування без використання навантаження на зразки будівельних конструкцій, зокрема плити, для яких неможливо під час випробувань відтворити умови навантаження в лабораторії через технічні причини. У стандартах зазначено, що можна досліджувати як фрагменти зразків будівельних конструкцій, так і конструкції запроєктованих розмірів. Випробування нестандартизованих і великогабаритних конструкцій є проблематичним, оскільки потребує великих фінансових вкладень та працевтрат, а випробувальні печі можуть бути меншими за габарити досліджуваних конструкцій. Крім того, вони є неекологічними. У роботах [4–5] втілено ідею проведення експерименту з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних конструкцій у малогабаритній вогневій печі за стандартним температурним режимом пожежі, описано процес верифікації експериментальних даних. З огляду на викладене вище з'являється можливість дослідити тепловий вплив пожежі на сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем за результатами експериментальних випробувань.

Під час виконання роботи [4] запропоновано дієвий спосіб застосування експериментально-розрахункового методу для оцінювання вогнестійкості всіх типів будівельних конструкцій. Проте у роботі [5] продемонстровано, що ці методи можна удосконалити на основі більш чіткого розміщення засобів метрології. У працях [6–8] наголошується на застосуванні монолітних сталезалізобетонних конструкцій через особливості навантаження та поведінки комбінованого матеріалу під час нагрівання. Процес переносу тепла у твердому тілі ускладнюється його неоднорідністю.

У зазначених роботах рекомендують враховувати цей фактор на етапі експериментальних досліджень. У науковій праці [9] досліджено вплив конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі, продемонстровано, що малогабаритна вогнева піч здатна забезпечити рівномірний прогрів. Проте поверхня конструкцій, що нагрівалась, була плоскою. У цій роботі відтворено процес проведення реального експерименту із нагрівання сталезалізобетонного фрагмента з гофрованим профілем у малогабаритній вогневій печі [10] за допомогою засобів комп'ютерної газогідродинаміки (далі – CFD). Дані експериментів і є підґрунтям для верифікації результатів, отриманих під час виконання комп'ютерного моделювання.

Формулювання цілей дослідження. Метою дослідження є аналіз роботи комп'ютерної моделі малогабаритної вогневої печі під час нагрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем та порівняння результатів з експериментальними даними. Зазначене допоможе підтвердити або спростувати можливість дослідження прогріву більш складних геометричних форм будівельних конструкцій під час моделювання за умов впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Для досягнення мети поставлено та розв'язано такі завдання:

- перевірити можливість відтворення температурного режиму пожежі за допомогою моделювання у вибраному програмному комплексі;
- проаналізувати розподіл температур на зовнішній поверхні гофрованого сталевого профілю сталезалізобетонної будівельної конструкції;
- проаналізувати розподіл температур по поверхні досліджуваної конструкції;
- провести порівняння температурних режимів у камері печі під

час експериментальних досліджень та моделювання;

– окреслити перспективи досліджень надалі.

Методи дослідження. З огляду на результати дослідження із застосуванням плити [4] орієнтація (розміщення) фрагмента будівельної конструкції не впливає на нагрівання поверхні, оскільки у малогабаритній установці забезпечується рівномірний прогрів поверхонь вертикальних і горизонтальних конструкцій з одnobічним обігрівом, а навантаження не застосовується. Ціллю нагрівання є розв'язання теплотехнічної задачі з прогріву матеріалу конструкції, тому плиту розміщено вертикально під час експериментальних досліджень [10], а під час моделювання це відтворено.

Для створення геометричних моделей використано CAD-програмний комплекс. Винайдено модель вогневої печі та будівельної конструкції. Загальний вигляд наведено на рис. 1.

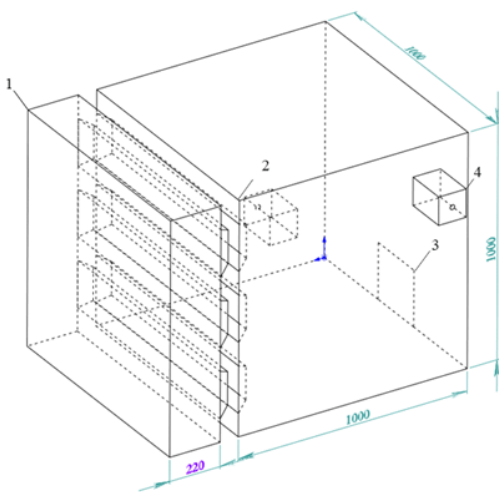
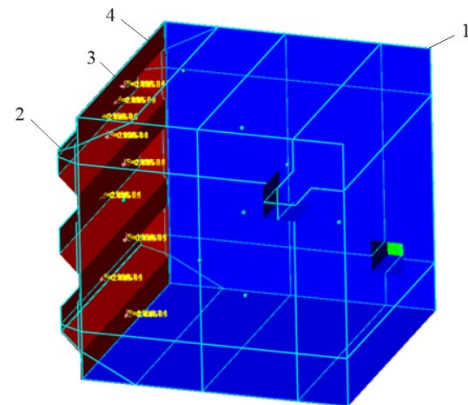


Рисунок 1 – Геометричні параметри камери вогневої печі та фрагмента сталезалізобетонної плити (мм): 1 – сталезалізобетонна плита; 2 – камера печі; 3 – отвір для відведення продуктів горіння; 4 – пальник

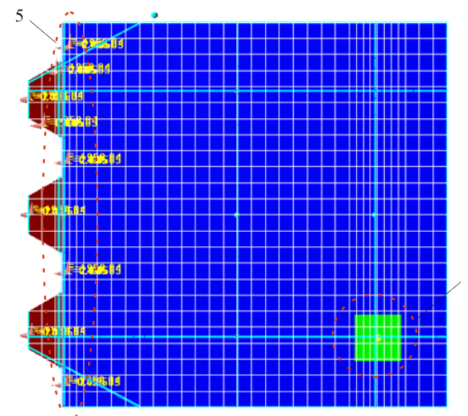
3-D модель, яку наведено на рис. 1, імпортовано у програмний комплекс CFD. Для відтворення процесу теплообміну у вогневій печі застосовані математичні методи, засновані на використанні

систем диференціальних рівнянь на основі неперервних середовищ типу Нав'є-Стокса, рівнянь теплопровідності в умовах нагрівання під час пожежі та рівняння теплопровідності Фур'є.

Процес створення комп'ютерної моделі камери вогневої печі та накладення комірок для розрахунку відображено на рис. 2.



а



б

Рисунок 2 – Вигляд імпортованої у CFD-програмний комплекс камери вогневої печі (а) та її сіткової моделі (б): 1 – камера печі; 2 – підобласть сполучення камери та будівельної конструкції; 3 – місця заміру температури безпосередньо біля поверхні гофрованого профілю; 4 – місця контролю температури у камері печі; 5 – область згущення розрахункової сітки біля фрагмента; 6 – область згущення розрахункової сітки в місці розташування пальників

У комп'ютерній моделі камери вогневої печі створено розрахункову сітку. Розмір комірок визначено із принципу

розумної достатності, тобто вибрано баланс між достатньою точністю і продуктивністю. Для цього більш «густу» розрахункову сітку створено у місцях розташування пальників та сполучення камери із фрагментом конструкції, що дало змогу врахувати особливості інтенсивних турбулентних потоків у місцях горіння,

а також теплообмін поблизу поверхні твердого тіла. Із метою візуалізації процесу розрахунку та отриманих результатів створено заливку кольорів усередині камери печі та на поверхні конструкцій. Загальний вигляд початку розрахунку наведено на рис. 3.

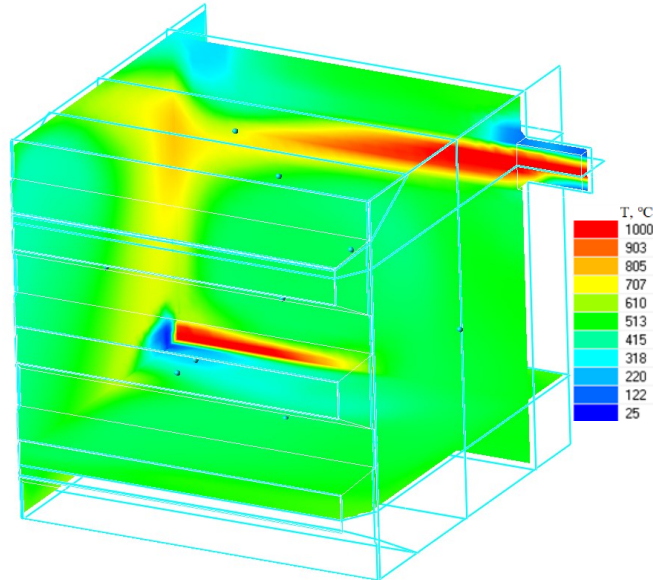


Рисунок 3 – Візуалізація процесу розрахунку

Під час моделювання температурний режим пожежі відповідав стандартному [1]. З цією метою у процесі розрахунку корегувалася інтенсивність подавання горючої речовини.

Для дослідження достовірності та адекватності отриманих результатів застосовані методи математичної статистики з використанням розрахункових та експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до проведеного дослідження відбувся контроль температури у камері печі та на обігрівальній поверхні несучої стіни (рис. 2), дані наведені на рис. 4–5 як графіки.

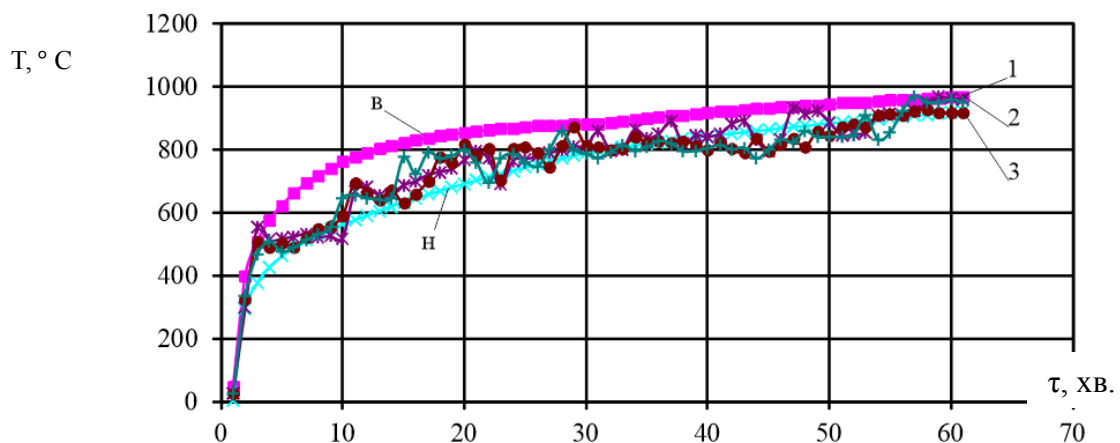


Рисунок 4 – Температурний режим у камері печі під час моделювання: в, н – верхня та нижня межі стін; 1–3 – середня температура у різних зонах камери печі (рис. 2)

Відповідно до отриманих даних (рис. 4) середня температура у камері вогневої печі перебувала у межах стандартного температурного режиму пожеж. У місцях контролю в нижній частині камери печі та у місцях більш віддалених (порівняно з іншими) від пальників отримано нижчу (до 5%) температуру, ніж у протилежних їм.

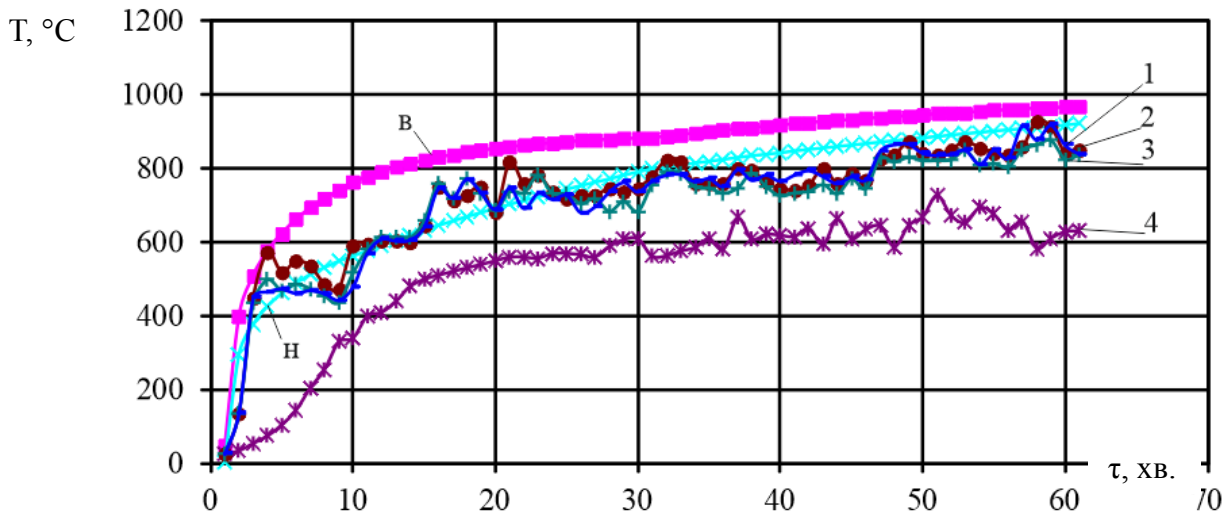


Рисунок 5 – Температурний режим на поверхні гофрованого профілю в, н – верхня та нижня межі стін; 1 – середня температура у верхній частині поверхні сталюого профілю; 2 – середня температура у середній частині поверхні сталюого профілю; 3 – середня температура у нижній частині поверхні сталюого профілю; 4 – температура шару бетону, що прилягає до профілю (рис. 2)

Відповідно до отриманих даних (рис. 5) зовнішня поверхня гофрованого сталюого профілю прогрівалась відносно рівномірно. Дещо вища температура спостерігалась у рівних частинах, нижча (у межах 5%) – на згинах. Це можливо пояснити, використовуючи закон Ламберта: взаємне розташування джерела та обігрівної поверхні.

Крива 4 з рис. 5 показує температуру шару бетону, що прилягає до профілю. Засоби розрахункового комплексу дають

змогу проводити подібний розрахунок, але його точність є низькою, тому їх показано лише для загальної картини. Надалі використовувати ці дані для досліджень не є доцільним. Проте вони вказують на правильність роботи моделі.

На рис. 6 заливкою кольорів (градієнт температур) відображено розподіл температур на поверхні фрагмента сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання.

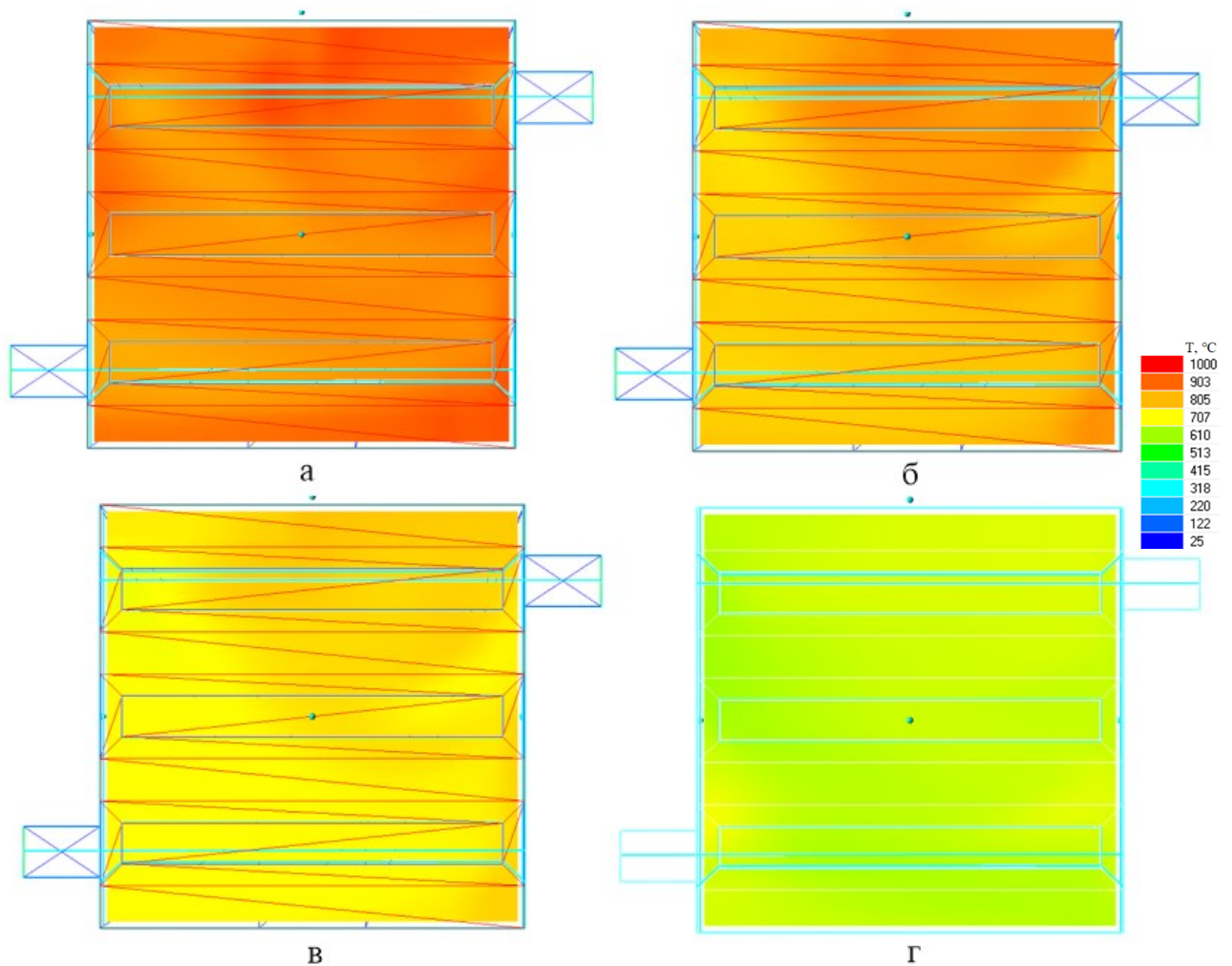


Рисунок 6 – Градієнт температур на обігрівальній поверхні фрагмента сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем у різні моменти часу нагрівання: а – 60 хвилини; б – 45 хвилини; в – 30 хвилини; г – 10 хвилини

Відповідно до отриманих даних контролю температури на обігрівальній поверхні сталевих профілів та розподілів температури, показаних на рис. 6, а також результатів, наведених на рис. 4–5, стало можливим констатувати:

- температурний вплив пожежі на обігрівальну поверхню несучої стіни засобами комп'ютерної газогідродинаміки та зростання температур у камері печі відповідало стандартній температурній кривій пожежі (рис. 4);

- максимальна температура на обігрівальній поверхні несучої стіни на останній хвилині моделювання досягла

840 °C, а середня температура в цей момент часу на всій поверхні конструкції становила 820 °C (рис. 5);

- розподіл температур по поверхні конструкції є рівномірним, відхилення у різних місцях поверхні не перевищує 5% (рис. 5–6).

Додатково проведено зіставлення результатів моделювання температурного режиму в камері вогневої печі та результатів експериментальних досліджень в аналогічній реальній установці [10], що наведено на рис. 7.

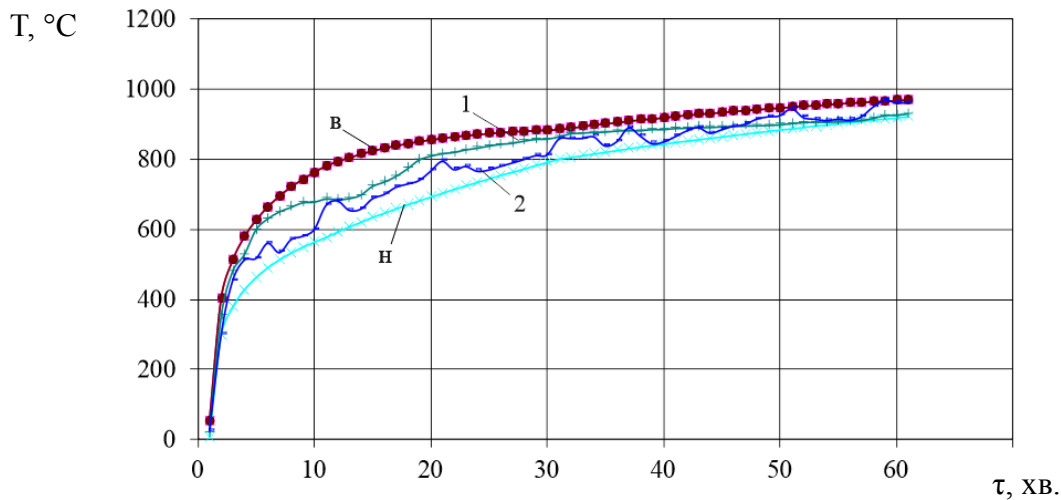


Рисунок 7 – Середня температура під час експериментальних досліджень та моделювання: в, н – верхня та нижня межі стін; 1 – середня температура у камері вогневої печі під час експерименту [10]; 2 – середня температура місць контролю у камері змодельованої печі (рис. 2)

Відповідно до аналізу результатів порівняння температурних режимів у камері печі під час експериментальних досліджень та моделювання (рис. 7) є підстави стверджувати про достатню високу відтворюваність результатів. Водночас:

- в обох випадках температурний режим перебував у рамках стандартного [1];

- під час експериментальних досліджень відбувалася більш плавна зміна температури (крива 1, рис. 7). Це зумовлено інерційністю термопар та фактом того, що вони були у металевих кожухах. Крім того, дані щодо температури, за допомогою яких побудовано криві, взято на початку кожної хвилини, а не їхнє середнє значення за хвилину. Отже, під час моделювання суттєвий вплив мав турбулентний потік;

- висока збіжність даних дає змогу зробити висновок, що під час експериментальних досліджень розподіл температур на поверхні гофрованого профілю відповідав представленому в моделюванні та був рівномірним.

Висновки та напрями подальших досліджень. Досліджено вплив конфігурації малогабаритної вогневої установки на рівномірність нагрівання поверхні сталезалізобетонної

плити. Отримані дані проаналізовано та порівняно з експериментальними. За результатами цієї роботи встановлено:

1. Математичний апарат вибраного програмного комплексу забезпечує необхідну якість прогрівання внутрішнього простору камери вогневої печі, відтворює необхідний температурний режим пожежі та дає змогу проводити дослідження теплового впливу пожежі на нерівні обігрівні поверхні будівельних конструкцій.

2. Зовнішня поверхня гофрованого сталевого профілю сталезалізобетонної конструкції прогрівалась відносно рівномірно. Дещо вища температура спостерігалась у рівних частинах, нижча (у межах 5%) – на згинах. Це можна пояснити взаємним розташуванням джерела та обігрівної поверхні.

3. Максимальна температура на обігрівальній поверхні несучої стіни на останній хвилині моделювання досягла 840 °C, а середня температура в цей момент часу на всій поверхні конструкції становила 820 °C. Розподіл температур по поверхні конструкції є рівномірним, відхилення у різних місцях поверхні не перевищує 5%.

4. Порівняння температурних режимів у камері печі під час експериментальних досліджень та

моделювання свідчать про достатньо високу відтворюваність результатів і спонукають до висновку, що під час експериментальних досліджень розподіл температур на поверхні гофрованого профілю відповідав представленому у моделюванні та був рівномірним.

Перспективою наукових розвідок є використання даних моделювання для дослідження більш складних варіантів будівельних конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Ч. 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT).
2. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги».
3. ДСТУ Б В.1.1-20:2007 Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ).
4. Нуянзін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей : дис. ... д-р. техн. наук : 21.06.02, Львів : Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2023, 418 с.
5. Перегін А. В. Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін : дис. ... д-р філософії : 261, Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024, 162 с.
6. Nuianzin O. et al. Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 2024. № 112. P. 202–208.
7. Перегін А. В., Нуянзін О. М. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування* : зб. наук. праць. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. Т. 5. № 2. С. 75–82.
8. Нуянзін О. М., Борисова А. С. Розрахункове оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної плити за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. *Civil security : Public administration and crisis management*, 2023. № 1 (2). С. 25–40.
9. Перегін А. В. Дослідження впливу конфігурації та параметрів вогневих печей на умови нагрівання несучих стін за стандартним температурним режимом пожежі. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування* : зб. наук. праць. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. Т. 6. № 2. С. 85–94.
10. Степаненко В. О., Нуянзін О. М., Перегін А. В. та ін. Дослідження теплового впливу пожежі на сталезалізобетонні плити з гофрованим профілем. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування: зб. наук. праць*. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. Т. 8. № 2. С. 71–80.

REFERENCES

1. DSTU EN 1363-1:2023 Vyprobuvannya na vohnestiykist'. Chastyna 1. Zahal'ni vymohy [Fire resistance test. Part 1. General requirements] (EN 1363-1:2020, IDT). [in Ukrainian].
2. DBN V.1.1-7-2016 «Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva. Zahal'ni vymohy» [Fire safety of construction sites. General requirements]. [in Ukrainian].
3. DSTU B V.1.1-20:2007 Zakhyst vid pozhezhi. Perekryttya ta pokryttya. Metod vyprobuvannya na vohnestiykist' [Fire protection. Overlap and covering. Fire resistance test method] (EN 1365-2:1999, NEQ). [in Ukrainian].
4. Nuianzin, O. M. (2023). Development of the scientific basis for evaluating the fire resistance of reinforced concrete building structures using small-sized modular fire furnaces. *Dys. ... Dr.Sc* : 21.06.02, Lviv: Lviv State University of Life Safety, 418. [in Ukrainian].
5. Perehin, A. V. (2024). Improvement of the experimental and calculation method of estimating the fire resistance limit of load-bearing reinforced concrete walls. *Dys. ... PhD*: 261, Cherkasy: Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of NUCP of Ukraine, 162.
6. Nuianzin, O., Kozak, A., Yanishevskiy, V., & Kryshstal, V. (2024). Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (112), 202–208. [in English].
7. Perehin, A., & Nuianzin, O. (2021). Stages of creating a prototype fire installation for determining temperature distributions of small-sized fragments of reinforced concrete structures. *Emergency situations: prevention and elimination*, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of NUCP of Ukraine, 5(2), 75–82. [in English].
8. Nuianzin, O., & Borysova, A. (2023). Estimated assessment of the fire resistance limit of a reinforced concrete slab based on the results of fire tests without mechanical load. *Civil security: Public administration and crisis management*, (1 (2)), 25–40. [in English].
9. Perehin, A. (2022). Study of the influence of the configuration and parameters of fire furnaces on the heating conditions of load-bearing walls according to the standard fire temperature regime. *Emergency situations: prevention and elimination*, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of NUCP of Ukraine, 6(1), 85–94. [in English].
10. Stepanenko, V. O., Nuianzin, O. M., & Perehin A. V. (2024). Study of the thermal effect of fire on steel-reinforced concrete slabs with a corrugated profile. *Emergency situations: prevention and elimination*, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of NUCP of Ukraine, 8(2), 71–80. [in English].

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CONFIGURATION OF A SMALL-DIMENSIONED FIRE INSTALLATION ON THE UNIFORMITY OF HEATING OF THE SURFACE OF A STEEL-REINFORCED CONCRETE SLAB

V. Stepanenko

Cherkasy Institute of Fire Safety named after the Heroes of Chornobyl, National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS

modeling, steel-reinforced concrete, uniformity, furnace, construction, resistance, testing, temperature

ANNOTATION

During the design of buildings, important aspects are the guarantee of fire safety and fire resistance of building structures, which must meet today's requirements. The limits of fire resistance of reinforced concrete building structures are usually investigated by conducting tests using a standard method in special test facilities. However, the set of certain norms, rules and methods designed to ensure the reliability of measurements and the designs themselves are not perfect, so they need to be improved. The purpose of the work was to check the possibility of simulating heat and mass transfer inside the furnace chamber and analyzing the quality of the computer model during heating of steel-reinforced concrete slabs with a corrugated profile. The results were compared with experimental data. CAD software was used to create geometric models. Next, the 3-D model was imported into the CFD software package. Mathematical methods based on systems of differential equations which use continuous media of the Navier-Stokes type, heat conduction equations, under conditions of heating during a fire and Fourier heat conduction equations are used to reproduce the process of heat and mass transfer in a fire furnace. A calculation grid has been created in the computer model of the furnace chamber. The size of the cells is determined based on the principle of reasonable sufficiency. According to the obtained results, the outer surface of the corrugated ceiling profile of the steel-reinforced concrete structure was heated relatively uniformly. The higher temperature was observed in the flat parts, the lower temperature was observed in the bends. The maximum temperature on the heating surface of the load-bearing wall at the last minute of the simulation reached 840 °C, and the average temperature at this time over the entire surface of the structure was 820 °C. The temperature distribution on the surface of the structure is uniform, the deviation in different places of the surface does not exceed 5%. A comparison of temperature regimes in the furnace chamber during experimental studies and modeling was carried out. The results showed a sufficiently high reproducibility of the results.