

УДК 614.841.415

**Нуянзін Олександр Михайлович**

*кандидат технічних наук,  
начальник науково-дослідної лабораторії інновацій у сфері цивільної безпеки  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

**Nuianzin Oleksandr**

*кандидат технических наук,  
начальник научно-исследовательской лаборатории инноваций в сфере гражданской безопасности  
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля  
Национального университета гражданской защиты Украины*

**Nuianzin Oleksandr**

*PhD in Technical Sciences,  
Head of the Research Laboratory Innovations in the Field of Civil Security  
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of  
National University of Civil Protection of Ukraine*

**Гаркавий Сергій Федорович**

*кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри безпеки об'єктів будівництва та охорони праці  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

**Garkavii Sergii**

*кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры безопасности объектов строительства и охраны труда  
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля  
Национального университета гражданской защиты Украины*

**Garkavii Sergii**

*PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the  
Department of Safety of Construction and Labor Protection  
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of  
National University of Civil Protection of Ukraine*

**Самченко Тарас Васильович**

*науковий співробітник відділу речовин і матеріалів науково-випробувального центру  
Український науково-дослідний інститут цивільного захисту*

**Samchenko Taras**

*научный сотрудник отдела веществ и материалов научно-испытательного центра  
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты*

**Samchenko Taras**

*Researcher of the Department of Substances and  
Materials of the Scientific and Testing Center  
Ukrainian Civil Protection Research Institute*

**Кришталь Дмитро Олександрович**

*ад'юнкт  
Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України*

**Kryshchaliuk Dmitrii Oleksandrovich**

*адъюнкт  
Черкасского института пожарной безопасности имени Героев Чернобыля  
Национального университета гражданской защиты Украины*

**Kryshtal Dmytro**

*Adjunct of the*

*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of  
National University of Civil Protection of Ukraine*

## ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПРОГРІВУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ СТІНИ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПРОГРЕВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТЕН ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

## RESEARCH OF REFINED CONCRETE WALL HEATING UNEVENNESS DURING FIRE RESISTANCE TEST

**Анотація.** У даній статті розв'язано теплотехнічну задачу щодо визначення нерівномірності температурного розподілу у внутрішніх шарах залізобетонної несучої стіни при випробуваннях на вогнестійкість у спеціальних вогневих установках. Під час роботи застосовано обчислювальні експерименти з використанням CFD програм і методу кінцевих елементів. Для дослідження впливу дисперсії температур по поверхні несучих стін на їх межу вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності була розглянута залізобетонна стіна з відомими параметрами. Температурний режим пожежі було моделювалося у відповідності до стандартного температурного режиму пожежі.

**Ключові слова:** обчислювальний експеримент, дисперсія температури, несуча стіна, значення межі вогнестійкості.

**Аннотация.** В данной статье решена теплотехническая задача по определению неравномерности температурного распределения во внутренних слоях железобетонной несущей стены при испытаниях на огнестойкость в специальных огневых установках. Во время работы применены вычислительные эксперименты с использованием CFD программ и метода конечных элементов. Для исследования влияния дисперсии температур по поверхности несущих стен на их предел огнестойкости по предельному состоянию потери несущей способности была рассмотрена железобетонная стена с известными параметрами. Температурный режим пожара моделировался в соответствии со стандартным температурным режимом пожара.

**Ключевые слова:** вычислительный эксперимент, дисперсия температуры, несущая стена, значение предела огнестойкости.

**Summary.** In this article the heat engineering problem is solved concerning the determination of the unevenness of the temperature distribution in the inner layers of the reinforced concrete wall during tests on fire resistance in special fire units. During work, computational experiments using CFD programs and the finite element method were used. To study the influence of temperature dispersion on the surface of bearing walls on their fire resistance limit at the limiting state of loss of bearing capacity, a reinforced concrete wall with known parameters was considered. The temperature of the fire was modeled in accordance with the standard temperature regime of the fire.

**Key words:** computational experiment, temperature dispersion, bearing wall, fire resistance value.

**Постановка проблеми.** В умовах пожежі порушення загальної стійкості будівлі завжди відбувається внаслідок руйнування окремих елементів в каркасі споруди. Зважаючи на це, одним із важливих аспектів забезпечення пожежної безпеки у наш час є застосування будівельних конструкцій із гарантованою межею вогнестійкості.

Для визначення меж вогнестійкості найбільш поширеним є метод випробувань у спеціальних вогневих випробувальних печах. Проте, вогневі випробування та параметри сучасних випробувальних

установок далекі від досконалості, оскільки існують похибки, внаслідок того, що управління паливною системою та конфігурація вогневих печей не забезпечують повну відповідність умов проведення експерименту вимогам стандартів у даній галузі [1].

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** У роботі [2] проведено аналіз метрологічних особливостей та роботи печей для випробувань вертикальних будівельних конструкцій на вогнестійкість, який показав недосконалість конструкції, метрологічного забезпечення та методів управління паливно-форсуновою

системою. Однак слід зазначити, що в даній роботі не розглядався процес випробування горизонтальних будівельних конструкцій.

У роботі [3] показано, що через нерівномірність прогріву залізобетонної будівельної конструкції відбувається відшарування бетону від сталюї арматури. Проте, не проведено досліджень, яким чином це впливає на вогнестійкість.

Відповідно до [4] геометричні розміри будівельної конструкції впливають на межі її вогнестійкості. Це показує, що випробування на вогнестійкість мають похибку пов'язану з обмеженістю геометричних розмірів елементів, що випробуються. Відтак, необхідно корелювати результати зважаючи на даний факт. На сьогоднішній день дослідження для забезпечення рівномірного прогріву конструкції під час випробування, як це вимагає [1] не проводились. Провівши їх та розробивши алгоритм уточнення результатів, можливо зменшити похибку у визначенні значення межі вогнестійкості будівельних конструкцій.

Існує дослідження [5], що присвячене питання вивченню вогнестійкості залізобетонних конструкцій під різними силовими навантаженнями. Автор описав залежність значення межі вогнестійкості від рівня механічного навантаження на конструкції. При цьому не було враховано вплив дисперсії температур, що могло б розширити і покращити дослідження.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** У роботах вчених недостатньо уваги було приділено впливу на значення межі вогнестійкості несучих стін дисперсії температур по їх обігрівальній поверхні, тому розв'язання цієї задачі є актуальним і сприятиме підвищенню ефективності випробувань з оцінювання вогнестійкості несучих стін.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Метою роботи є визначення нерівномірності температурного розподілу у внутрішніх шарах залізобетонної несучої стіни при випробуваннях на вогнестійкість

у спеціальних вогневих установках. Для цього ми розв'язали теплотехнічну задачу щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни.

Для дослідження впливу дисперсії температур по поверхні несучих стін на їх межу вогнестійкості за граничним станом втрати несучої здатності була розглянута залізобетонна стіна, що представлена на рис. 1.

Залізобетонна стіна, що наведена на рис. 1 має конструкцію, яка широко застосовується для огороження шляхів евакуації. Тому саме така конструкція вибрана нами для досліджень.

При визначенні межі вогнестійкості даної стіни за настанням втрати несучої здатності нами була застосована методика, запропонована в роботах [1–3]. Алгоритм даної методики наведений на рис. 2 та рис. 3 у вигляді блок-схем.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.** Теплова задач вирішувалася з використанням даних розподілення температури по обігрівній поверхні стіни, що були визначені нами у попередній роботі [3].

Згідно із рис. 2 та рис. 3 для чисельного моделювання теплової дії на залізобетонну стіну був використаний метод кінцевих елементів (МКЕ).

При розв'язку теплотехнічної задачі як першого етапу нами були прийняті такі основні положення.

1. Для розрахунку використовується квазілінійне параболічне рівняння теплопровідності з граничними умовами (ГУ) III роду при обліку конвекційного і радіаційного теплообміну із середовищем пожежі.

2. Температурний режим пожежного середовища збігається зі стандартною температурною кривою пожежі.

3. У силу великої різниці в температуропровідності арматурної сталі і бетону, теплообмін враховується тільки в бетоні.

4. Внаслідок невеликого впливу теплообміну конвекцією в порожнинах елементів, враховується тільки його радіаційна складова.

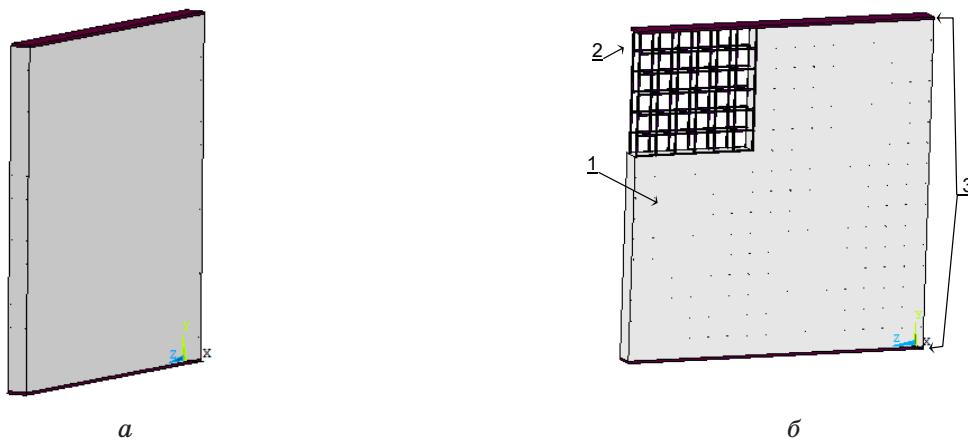


Рис. 1. Схема розрахункової області залізобетонної несучої стіни для проведення розрахунку межі вогнестійкості (а – загальний вигляд, що використовують під час обчислювального експерименту, б – схема армування): 1 – бетон, 2 – робочий арматурний каркас  $d = 16$  мм, 3 – траверси навантажувальної рами

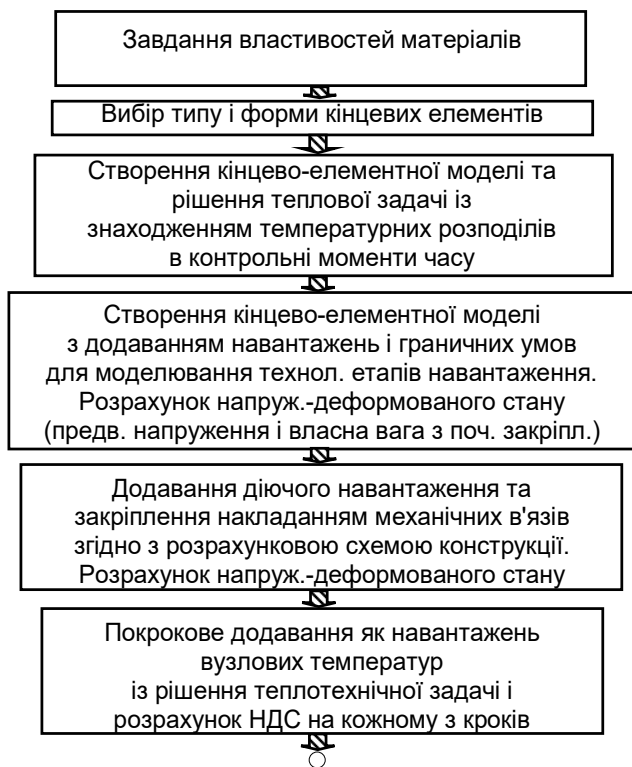


Рис. 2. Структурна схема розрахункових процедур

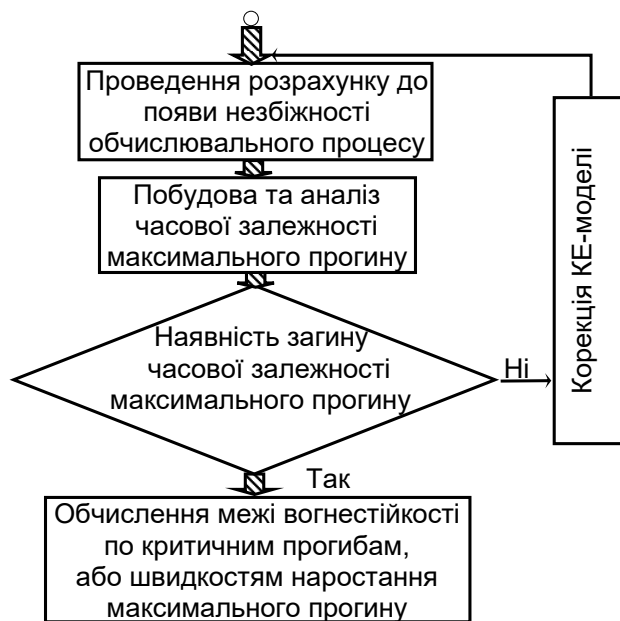


Рис. 3. Структурна схема визначення межі вогнестійкості за розрахованими параметрами

5. Теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону представляються температурними залежностями згідно [4].

6. Рівняння теплопровідності вирішується із застосуванням методу кінцевих елементів (МКЕ) з використанням комп'ютерної системи ANSYS Mechanical.

На рис. 4 показана геометрична схема перерізу плити.

Рівняння теплопровідності має наступний вигляд [4; 5]:

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(T)\nabla T) \quad (1)$$

де  $r(T)$  — густина,  $C_p(T)$  — питома теплоємність,  $l(T)$  — коефіцієнт теплопровідності, залежні від температури  $T$ .

При вирішенні рівняння теплопровідності на обігрівальній стороні стіни були використані граничні умови I роду:

$$T_w|_{y=b} = T_\Gamma \quad (2)$$

В даному випадку у кожній вузловій точці обігрівної поверхні прикладається температура, що визначена у результаті розрахунку температури розрахункової області вогневої печі у [3].

Для необігрівальної сторони стіни використовуються граничні умови III роду:

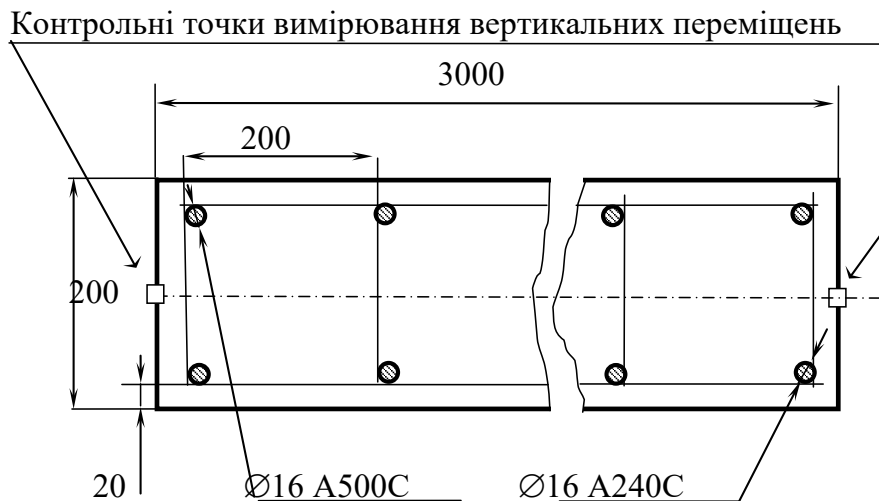
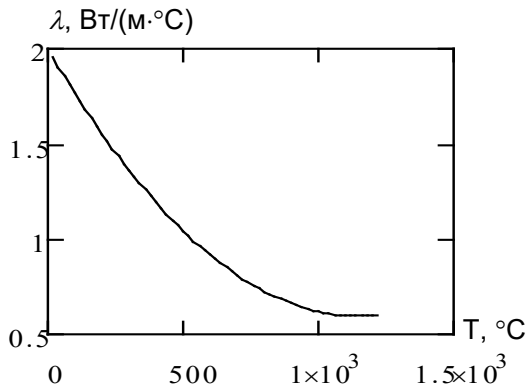


Рис. 4. Геометрична конфігурація перерізу залізобетонної стіни

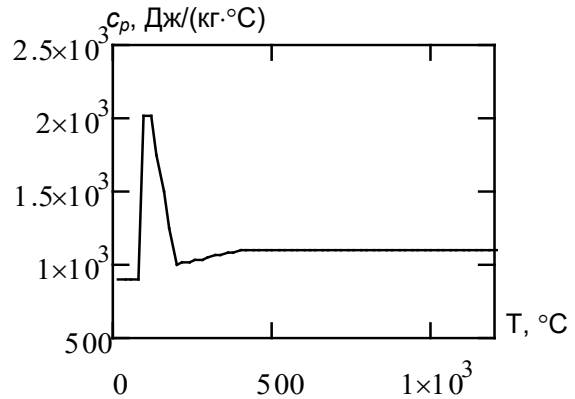
Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів зовнішньої стіни та плити перекриття

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \times \rho$ , Дж/(м³·°С)	Густина, кг/м³
Важкий бетон на силікатному заповнювачі [4]		
$2 - 0,2451 \frac{\theta}{100} + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100}\right)^2$	900ρ при 20 °С ≤ θ ≤ 100 °С, (900+(θ - 100))ρ при 100 °С < θ ≤ 200 °С, (1000+0,5(θ-100))ρ при 200 °С < θ ≤ 400 °С, 1100ρ при 400 °С < θ ≤ 1200 °С	2300



a



b

Рис. 5. Теплофізичні характеристики бетону:  
a — коефіцієнт теплопровідності; б — питома теплоємність

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w) \quad (3)$$

де  $T$  — температура повітря біля необігрівальної сторони стіни,  $T_w$  — температура поверхні елемента,  $\alpha = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  — коефіцієнт теплообміну за [5],  $T_p$  — температура середовища пожежі.

Для розв'язку задачі теплопровідності за методом кінцевих різниць необхідно задатись початковими даними. Згідно із розробленою нами методикою нами були встановлені такі початкові дані:

- початкова температура  $q_0 = 20 \text{ °С}$ ;
- просторовий крок інтегрування  $\Delta h \sim 0.02 \text{ м}$ ;
- часовий крок інтегрування —  $\Delta t = 60 \text{ с}$ .

Теплофізичні властивості наведені у табл. 1. Дані теплофізичні властивості рекомендовані у стандарті [5], що є чинним в Україні.

На рис. 5 подані графіки температурних залежностей теплофізичних характеристик бетону, що були побудовані при використанні даних, наведених у табл. 1.

Для розв'язку теплотехнічної задачі прогрівання досліджуваної залізобетонної стіни була побудована кінцево-різницева схема, яка наведена на рис. 6. На даній схемі показані типи граничних умов, що були накладені для здійснення розрахунку.

Для здійснення розрахунку був використаний програмний комплекс ANSYS. При цьому були встановлені параметри обчислювального блоку, подані на рис. 2 і рис. 3.

**Результати розв'язку теплотехнічної задачі:**  
Після розв'язку теплотехнічної задачі нами були отримані температурні розподіли у залізобетонній стіні, що представлені на рис. 7.

Дані, що були нами отримані у результаті теплотехнічного розрахунку були отримані при при-

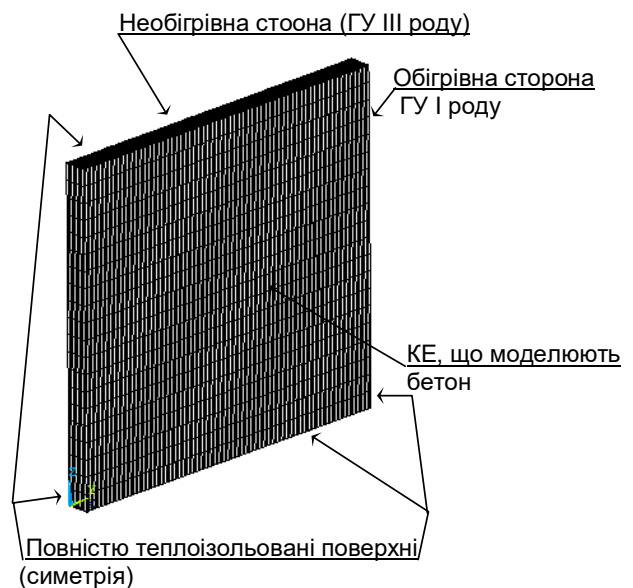


Рис. 6. Кінцево-різницева схема залізобетонної стіни для вирішення теплотехнічної задачі



Таблиця 2

Параметри обчислювального процесу

Параметр обчислювального процесу	Одиниці виміру	Значення
Тип аналізу		Нестаціонарний
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
Спосіб прикладання навантаження		Ступінчастий
Тип обчислювальної схеми		Неявна
Точність збіжності обчислень	(%)	0.005 (0,5)
Максимальний час випробування	с (хв.)	320 (19200)

кладанні температур на нову сіткову модель при проведенні лінійної інтерполяції. Це пояснює те, що картина поверхневого розподілення не обігрівної сторони дещо відрізняється від вихідних розподілів.

Подібні розподіли були визначені нами при вирішенні теплотехнічної задачі для інших модифікацій вогневих печей, що показані у [3]. Отримані дані будуть використані для розв’язку міцнісної задачі

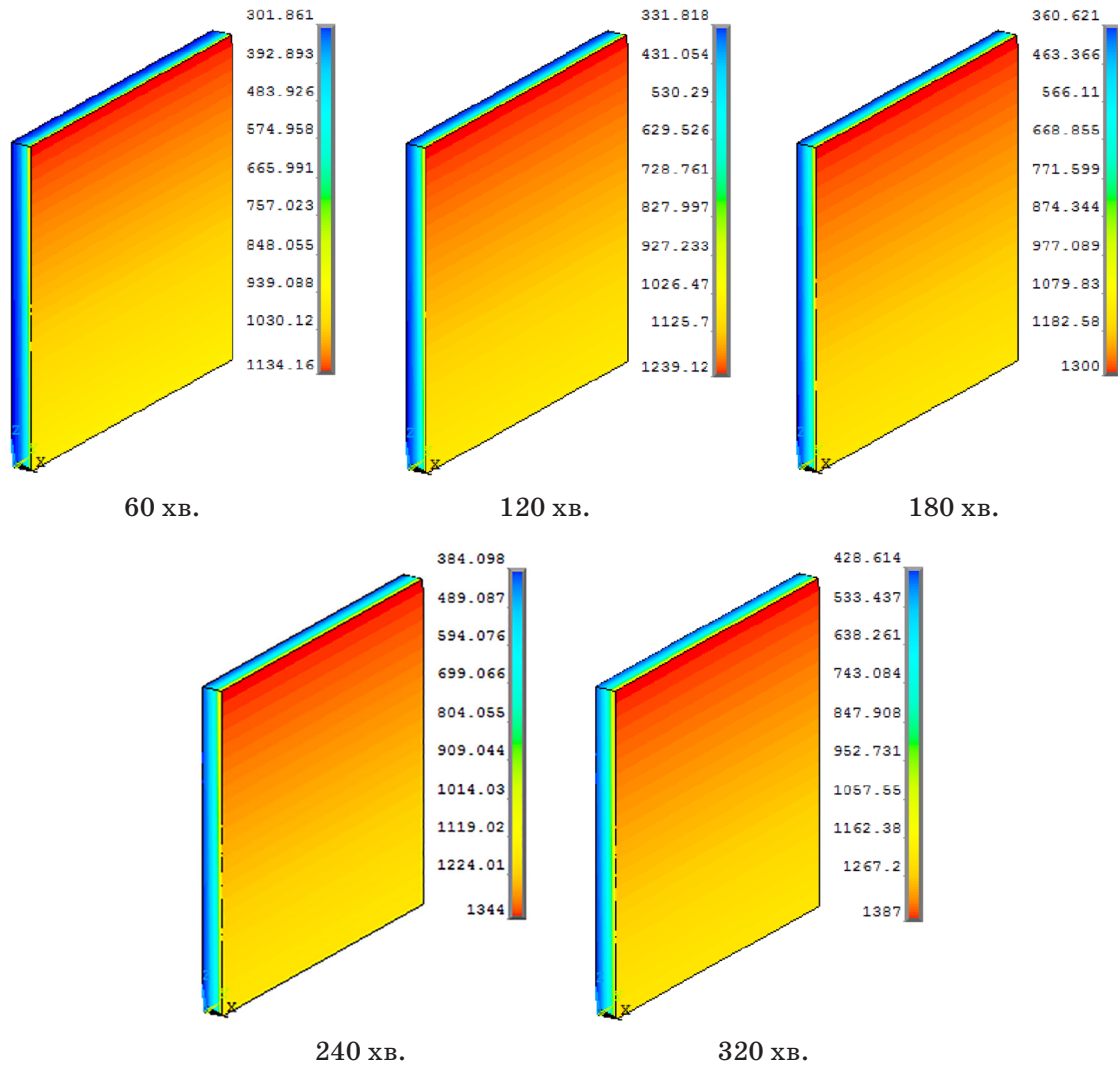


Рис. 7. Температурні розподіли (К) у залізобетонній стіні, що були отримані у результаті теплотехнічного розрахунку, у різні моменти часу її вогневого випробування

щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі і визначено залежність значень межі вогнестійкості несучих стін від дисперсії температур на їхніх обігрівальних поверхнях.

**Висновки.** У даній статті розв'язано теплотехнічну задачу щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі. Це необхідно для продовження досліджень з визначення залежності

значень межі вогнестійкості несучих стін від дисперсії температур на їхніх обігрівальних поверхнях як наукового підґрунтя для підвищення ефективності оцінювання результатів таких випробувань.

Наступним етапом є вирішення міцнісної задачі щодо визначення несучої здатності залізобетонної стіни в умовах пожежі.

#### Література

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. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій / Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздєєв С. В. [та ін.] / Монографія. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. — 120 с.
3. Asif H. Shah, U. K. Sharma. Fire resistance and spalling performance of confined concrete columns. *Construction and Building Materials*, Volume 156, 15 December 2017. — Pages 161-174.
4. Dronnadula V. Reddy, Khaled Sobhan, Lixian Liu, Jody D. Young Jr., Size effect on fire resistance of structural concrete. *Engineering Structures* Volume 99, 15 September 2015. — Pages 468-478.
5. Piotr Turkowski, Marek Łukomski, Paweł Sulik, Paweł Roszkowski. Fire Resistance of CFRP-strengthened Reinforced Concrete Beams under Various Load Levels. *Procedia Engineering*. Volume 172. — 2017. — Pages 1176-1183.
6. ТЕСИС, «Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision Версия 2.5.4.» / ТЕСИС // Руководство пользователя. — 2008. — С. 284.