



НАУКОВИЙ ВІСНИК: Цивільний захист та пожежна безпека

№ 1 (17), 2024

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2518-1777

Редакційна колегія:

головний редактор –
голова редколегії
д-р техн. наук

Пруський А. В.

заступник
головного редактора
д-р техн. наук
відповідальний секретар
канд. техн. наук

Поздєєв С. В.

Огурцов С. Ю.

д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
д-р техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. техн. наук
канд. хім. наук
PhDEng.
PhDEng.

Тютюнник В. В.
Цапко Ю. В.
Ніжник В. В.
Єременко С. А.
Жартовський С. В.
Чумаченко С. М.
Яковчук Р. С.
Лавренюк О. І.
Нуянзін О. М.
Коваленко В. В.
Лоїк В. Б.
Новак С. В.
Пазен О. Ю.
Паснак І. В.
Сізіков О. О.
Ліхнівський Р. В.
Врублевський Д.
Самберг А.

Літературні
редактори:

Помазанова Т. І.
(укр. мова)
Івашина Н. О.
(англ. мова)
Борисова А. С.

Випусковий редактор

Адреса редакції:

04074, м. Київ, вул. Вишгородська, 21

Телефони:

(+380) (44) 430-02-85

<https://nvcz.undicz.org.ua>

e-mail: niv1966@ukr.net

Заснований у 2016 році
Виходить 2 рази на рік

Засновник

Інститут державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Видавець

Інститут державного управління та наукових
досліджень з цивільного захисту (ІДУ НД ЦЗ)

Журнал зареєстровано Міністерством юстиції
України
Свідоцтво від 20.07.2020
Серія КВ № 24507-14447 ПР
Ідентифікатор медіа R30-02071

Журнал включено до категорії «Б» Переліку
наукових фахових видань України в галузі
технічних наук за спеціальностями:
261 «Пожежна безпека»
263 «Цивільний захист»
Наказ Міністерства освіти і науки України від
02.07.2020 № 886
У разі передрукування матеріалів письмовий
дозвіл ІДУ НД ЦЗ є обов'язковим
Рекомендовано до видання рішенням
Вченої ради ІДУ НД ЦЗ

Протокол від 27.06.2024 № 6

Ідентифікатор випуску DOI:
<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.1>

Підписано до друку 27.06.2024

Формат 60 × 84/8

Наклад 50 прим.

ЗМІСТ

CONTENTS

**С. Семичаєвський, В. Присяжнюк,
М. Якіменко, М. Осадчук**

Визначення параметрів горіння
модельних вогнищ пожежі класу А для
подальшого їх застосування під час
моделювання пожежі колісних
транспортних засобів

4

**Т. Скоробагатько, А. Прусський,
І. Маловик, М. Прокоф'єв,
М. Якіменко, Д. Серєда**

Особливості діяльності
газодимозахисників в умовах можливого
бойового ураження

15

**С. Цимбалістий, О. Тесленко,
О. Доценко, О. Крикун**

Аналізування вимог нормативної бази
України для обґрунтування необхідної
чисельності інспекторського складу
сфери пожежної (техногенної) безпеки

29

**Н. Козяр, О. Кириченко, І. Романюк,
В. Ващенко, О. Дядюшенко, Я. Балло**

Закономірності процесу горіння
частинок металевих пального у
продуктах розкладання піротехнічних
багатокомпонентних нітратно-
цирконієвих сумішей

39

В. Коробкін, А. Слюсар

Нормування оцінювання спроможностей
у сфері цивільного захисту

47

**О. Тимошенко, В. Коваленко,
О. Добростан, Т. Самченко,
О. Ратушний, Л. Маладика**

Створення випробувального обладнання
для визначення поведінки покриттів для
підлог під час горіння з використанням
джерела теплового випромінювання

58

**С. Новак, О. Добростан, М. Пустовий,
М. Новак**

Коригування проміжку часу до досягнення
критичної температури для випробних
зразків захищених сталевих конструкцій

71

А. Березовський, Н. Саєнко, Б. Копил
Вплив інтумесцентних наповнювачів на
водопоглинання вогнезахисних покриттів
металевих конструкцій на основі
акрилової дисперсії

85

**S. Semychayevsky, V. Prisyajnyuk,
M. Yakimenko, M. Osadchuk**

Determination of combustion parameters of
class A fire models for their further application
during wheeled vehicle fire simulation

**T. Skorobahatko, A. Pruskyi, I. Malovyk,
M. Prokofiev, M. Yakimenko,
D. Sereda**

Features of the activities of gas smoke
protectors in the conditions of possible combat
damage

**S. Tsybalyistiy, O. Teslenko, O. Dotsenko,
O. Krykun**

Analysis of the requirements of the normative
base of Ukraine for justification of the
necessary number of inspectors in the sphere
of fire (technological) safety

**N. Koziar, O. Kyrychenko, I. Romaniuk,
V. Vaschenko O. Diadiushenko, Ya. Ballo**

Regularities of the combustion process
of metal fuel particles
in the decomposition products of pyrotechnic
multicomponent nitrate-zirconium mixtures

V. Korobkin, A. Slusar

Normalization of capabilities assessment in the
civil protection

**O. Tymoshenko, V. Kovalenko,
O. Dobrostan, T. Samchenko,
O. Ratushnyi, L. Maladyka**

Creation of test equipment for determining
the behavior of floor coatings during combustion
by using thermal radiation source

**S. Novak, O. Dobrostan, M. Pustovyi,
M. Novak**

Adjusting the time interval until the critical
temperature is reached for test samples of
protected steel structures

A. Berezovskyi, N. Saienko, B. Kopyl

Study of the influence of intumescent fillers on
water absorption of fireproof coatings
of metal structures based
on acrylic dispersion

С. Сідней

Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі

93

S. Sidnei

Study of the influence of the type of finite element mesh on temperature distribution over a hollow floor slab in fire simulation

Ю. Фещук, Я. Балло, О. Сізіков, А. Циганков

Обґрунтування можливості використання трубопроводів із полімерів у системі зовнішнього протипожежного водопостачання проммайданчика атомної електростанції

104

Yu. Feshchuk, Ya. Ballo, O. Sizikov, A. Tsyhankov

Justification of the possibility of using pipelines made of artificial polymers in the external fire water supply system of the NPP site

УДК 614.841.343

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ СІТКИ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ПОРОЖНИСТІЙ ПЛИТІ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ПОЖЕЖІ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.1.93-103>

Сідней С. О.*, ORCID iD 0000-0002-7664-6620

*E-mail: sidney-1980@ukr.net

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

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 29.04.2024

Пройшла рецензування: 14.05.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогнестійкість, залізобетонна порожниста плита, теплотехнічна задача, скінченний елемент, стандартний температурний режим пожежі

АНОТАЦІЯ

Проведено обчислювальні експерименти з розв'язання теплотехнічної задачі щодо залізобетонної порожнистої плити за допомогою методу скінченних елементів у разі використання трьох типів згенерованих скінченно-елементних сіток. Метою роботи є визначення залежності впливу скінченно-елементної сітки на показники розподілу температури по залізобетонній порожнистій плиті під час розв'язання теплотехнічної задачі. Реалізацію розрахунків розподілу температури у досліджуваній залізобетонній конструкції під час впливу стандартного температурного режиму пожежі здійснено за рекомендаціями Єврокоду 2. Для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури по залізобетонній порожнистій плиті під час впливу стандартного температурного режиму пожежі створено моделі матеріалів бетону та арматури із теплофізичними характеристиками, що змінюються під час зміни температури. За результатами досліджень встановлено, що нерівномірний обігрів обігрівної поверхні плити, а також нехарактерний розподіл температури на необігрівній поверхні у разі використання згенерованої автоматичної скінченно-елементної сітки вказують на низьку якість цієї сітки порівняно з сітками, згенерованими методами MultiZone та Sweep. Порівнюючи результати теплотехнічного розрахунку із використанням методів Sweep та MultiZone, встановлено, що характер температурного розподілу обігрівної поверхні плити майже однаковий. Однак необігрівна поверхня плити має температурний розподіл більш рівномірний у разі використання методу Sweep, порівнюючи результати, що отримано за допомогою методу MultiZone. Крім того, встановлено, що прогрівання лівого крайнього стрижня арматури відбувається більш інтенсивно порівняно з крайнім правим стрижнем. Такі результати доводять, що найбільш оптимальною скінченно-елементною сіткою з трьох типів, наведених у цій роботі, є модель із гексаедральними скінченними елементами, згенерована за допомогою методу Sweep.

Постановка проблеми. Плити перекриттів є одними з основних конструкційних елементів у будівлях, які виконують важливу функцію у забезпеченні надійності та функціональності споруд.

До основних функцій плит перекриттів належить перенесення

навантажень від верхніх поверхів до опорних стін або колон. Розділення будівлі за вертикальним напрямком на протипожежні відсіки забезпечується завдяки плитам перекриттів. Залежно від типу протипожежної перешкоди, що вимагається за табл. 2 [1], використовується плита з необхідним

мінімальним класом вогнестійкості. Визначення вогнестійкості будівельних конструкцій передбачається здійснити за допомогою натурних або експериментальних вогневих випробувань [2–3]. Крім практичних методів визначення вогнестійкості конструктивних елементів, є розрахункові методи, які поділяються за ієрархічним принципом, зокрема табличний, спрощений та уточнений [4–5]. Табличний метод реалізується за умови порівняння геометричних параметрів конструкції із показниками, вказаними у відповідних таблицях [5]. Принципи уточненого та спрощеного методу полягають у визначенні розподілу температури по перерізу залізобетонних конструктивних елементів під час впливу стандартного температурного режиму пожежі, внаслідок чого під час проведення розрахунків урахують погіршені механічні властивості арматури та бетону [5–6]. Отже, за результатами, отриманими під час розв'язання теплотехнічної задачі, вирішується статична задача, що пов'язана з визначенням напружено-деформованого стану конструкції під час впливу пожежі. Розв'язання теплотехнічної і статичної задач відбувається за допомогою програмних комплексів із застосуванням методу скінченних елементів.

Під час заміни диференціальних рівнянь у часткових похідних їхніми дискретними аналогами, що описують поведінку будівельної конструкції, виникають нові параметри – часові та просторові кроки розрахункової скінченно-елементної сітки [7–8]. Побудова цієї сітки є одним з найважливіших етапів у розв'язанні теплотехнічної та статичної задач методами скінченних елементів. Якісна розрахункова скінченно-елементна сітка у більшості випадків є одним з ключових аспектів отримання достовірних результатів числового розв'язання [7–8]. Крім того, розрахунок на сітці, що недостатньо добре відповідає конкретній задачі, може призвести до зниження точності розв'язку, відсутності збіжності, виникнення різних нестійкостей та припинення числового розв'язання [7–8].

З огляду на це розв'язання теплотехнічної задачі є важливою

складовою на початковому етапі під час проведення оцінювання вогнестійкості будь-яких будівельних конструкцій. Таким чином, дослідження впливу скінченно-елементної сітки на показники розподілу температури по порожнистій плиті під час впливу стандартного температурного режиму пожежі є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведення практичних експериментів щодо визначення межі вогнестійкості плит перекриттів з настанням граничного стану втрати цілісності, ускладнюються, оскільки до 16% площі необігрівної поверхні покриваються вантажами для відтворення умов механічного навантаження [2–3]. Таким чином, зафіксувати ознаки настання цього граничного стану в місцях, де встановлене навантаження, стає неможливим.

З огляду на роботу [9] встановлено, що передумови настання граничного стану з вогнестійкості втрати цілісності у порожнистій плиті фіксуються на 678 с раніше за втрату несучої здатності.

Аналізуючи роботи [10–12], можна зазначити, що настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності спостерігається пізніше за втрати несучої здатності.

Оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за допомогою табличного методу надають можливість перевірити відповідність нормованому класу вогнестійкості без урахування матеріалу, з якого виготовлена конструкція, перерізу арматури й бетону та рівня прикладеного навантаження [5–6]. За цим методом для плит перекриттів необхідно перевірити лише два або три геометричні параметри – товщину, ширину конструкції та відстань до осі арматури [5–6]. Зважаючи на це, результати оцінювання вогнестійкості за вказаним методом надають показники із запасом. Під час використання спрощеного (зонного) методу враховуються матеріал, переріз та рівень прикладеного навантаження, однак визначення температури для плит перекриттів відбувається за допомогою температурних кривих [5], розрахованих для перерізів

лише 200 мм. Тобто використовувати ці температурні криві [5] для залізобетонних порожнистих плит товщиною 220 мм не можна. Таким чином, для проведення об'єктивного оцінювання вогнестійкості залізобетонних пустотних плит доцільно використовувати комп'ютерне моделювання за допомогою методу скінченних елементів [7–8]. Крім того, проведення обчислювальних експериментів надає можливість відтворити будь-які геометричні особливості досліджуваної конструкції, враховуючи будь-який матеріал з відповідними теплофізичними характеристиками та механічними властивостями, що змінюються у разі зміни температури [7–8]. Також у разі створення коректної математичної моделі оцінювання вогнестійкості під час проведення математичного моделювання передбачається можливість дослідити вогнестійкість за різних рівнів навантажень, що суттєво впливає на вогнестійкість [9–11].

Таким чином, дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури порожнистою плитою у разі впливу стандартного температурного режиму пожежі є актуальною науково-технічною задачею.

Формулювання цілей дослідження. Мета роботи полягає у визначенні залежності впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті перекриття під час розв'язання теплотехнічної задачі.

Для досягнення мети сформовані такі задачі:

1. Побудувати у геометричному модулі фрагмент тривимірної залізобетонної порожнистої плити із відтворенням робочого армування плити –

4-х сталевих стрижнів, що піддаватиметься впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. В обчислювальному модулі Transient Thermal програмного комплексу ANSYS WB створити 3 типи скінченно-елементної моделі фрагмента залізобетонної порожнистої плити, зокрема:

- 1-й тип: автоматична за замовчуванням налаштувань із використанням тетраїдальних скінченних елементів;

- 2-й тип: за допомогою методу MultiZone із використанням тетраїдальних та гексаедральних скінченних елементів;

- 3-й тип: за допомогою методу Sweep із використанням гексаедральних скінченних елементів.

3. Розв'язати теплотехнічну задачу розподілу температури по залізобетонній порожнистій плиті під час впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 9000 с за допомогою згенерованих скінченно-елементних моделей.

4. Проаналізувати показники розподілу температури по залізобетонній порожнистій плиті, що отримані за результатами математичного моделювання із використанням трьох типів скінченно-елементних моделей, та визначити найбільш оптимальну з них для подальшого застосування під час розв'язання статичної задачі.

Методи дослідження. У геометричному модулі для розв'язання теплотехнічної задачі побудовано фрагмент геометричної моделі залізобетонної порожнистої плити у тривимірному просторі, зменшену удвічі у повздовжньому напрямку. Досліджувана конструкція повністю наведена на рис. 1.

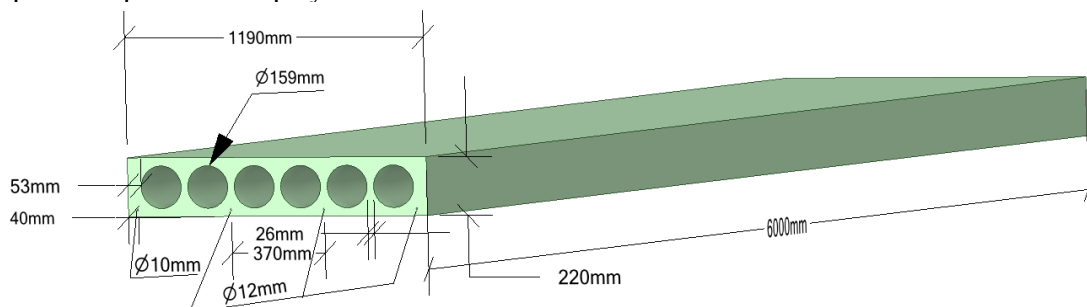


Рисунок 1 – Залізобетонна порожниста плита для розв’язання теплотехнічної задачі

Оскільки реалізація мети роботи передбачає розв’язання тільки теплотехнічної задачі, для збільшення продуктивності під час проведення розрахунків використано половину конструкції, зменшену вдвічі по довжині (3000 мм).

На рис. 2 відображені три типи скінченно-елементних сіток залізобетонної порожнистої плити, що використано під час розв’язання теплотехнічної задачі. Скінченно-елементна модель досліджуваної плити, що наведена на

рис. 2 а, згенерована за замовчуванням налаштувань, тобто автоматично із використанням тетраїдальних скінченних елементів. На рис. 2 б зображена скінченно-елементна модель, що згенерована за допомогою методу MultiZone із використанням тетраїдальних та гексадральних скінченних елементів. На рис. 2 в наведена скінченно-елементна модель, що згенерована за допомогою методу Sweep із використанням гексадральних скінченних елементів.

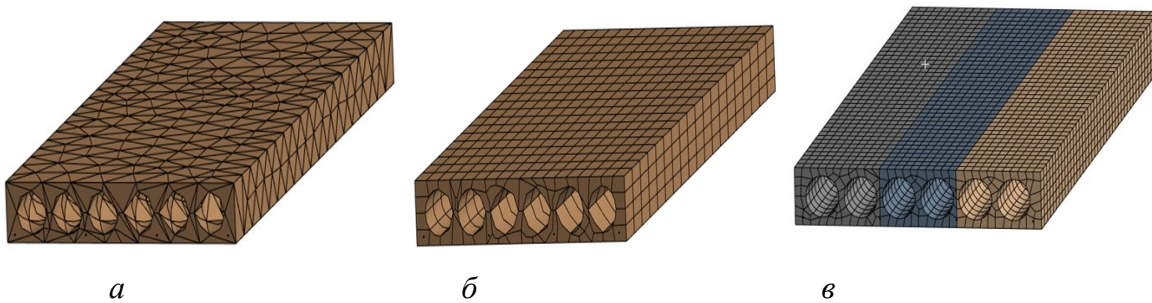


Рисунок 2 – Згенеровані скінченно-елементні сітки залізобетонної порожнистої плити: а – автоматична, б – за допомогою методу MultiZone, в – за допомогою методу Sweep

Загальна кількість елементів та вузлів з кожного типу скінченної сітки наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичні показники скінченно-елементних сіток

№ з/п	Тип згенерованої скінченно-елементної сітки	Кількість скінченних елементів (од.)	Кількість вузлів (од.)	Геометрична форма скінченного елемента
1	Автоматична	3456	6458	Тетраїдальна
2	Метод MultiZone	1220	6951	Тетраїдальна та гекседральна
3	Метод Sweep	5240	29404	Гекседральна

Унаслідок аналізування отриманих скінченно-елементних сіток можна зрозуміти, що перетинання ребер зі сталевими стрижнями арматури спостерігаються лише у згенерованій сітці за допомогою методу Sweep, що передбачає отримання більш точних результатів, на відміну від створених сіток автоматично та за допомогою методу MultiZone.

Для розв’язання теплотехнічної задачі розподілу температури по

залізобетонній порожнистій плиті під час впливу стандартного температурного режиму пожежі створено моделі матеріалів бетону та арматури із теплофізичними характеристиками, що змінюються під час зміни температури за рекомендаціями [4–5].

Прикладання граничних умов теплообміну досліджуваної залізобетонної порожнистої плити з приміщенням, де відтворюється стандартний температурний режим пожежі, наведені на рис. 3.

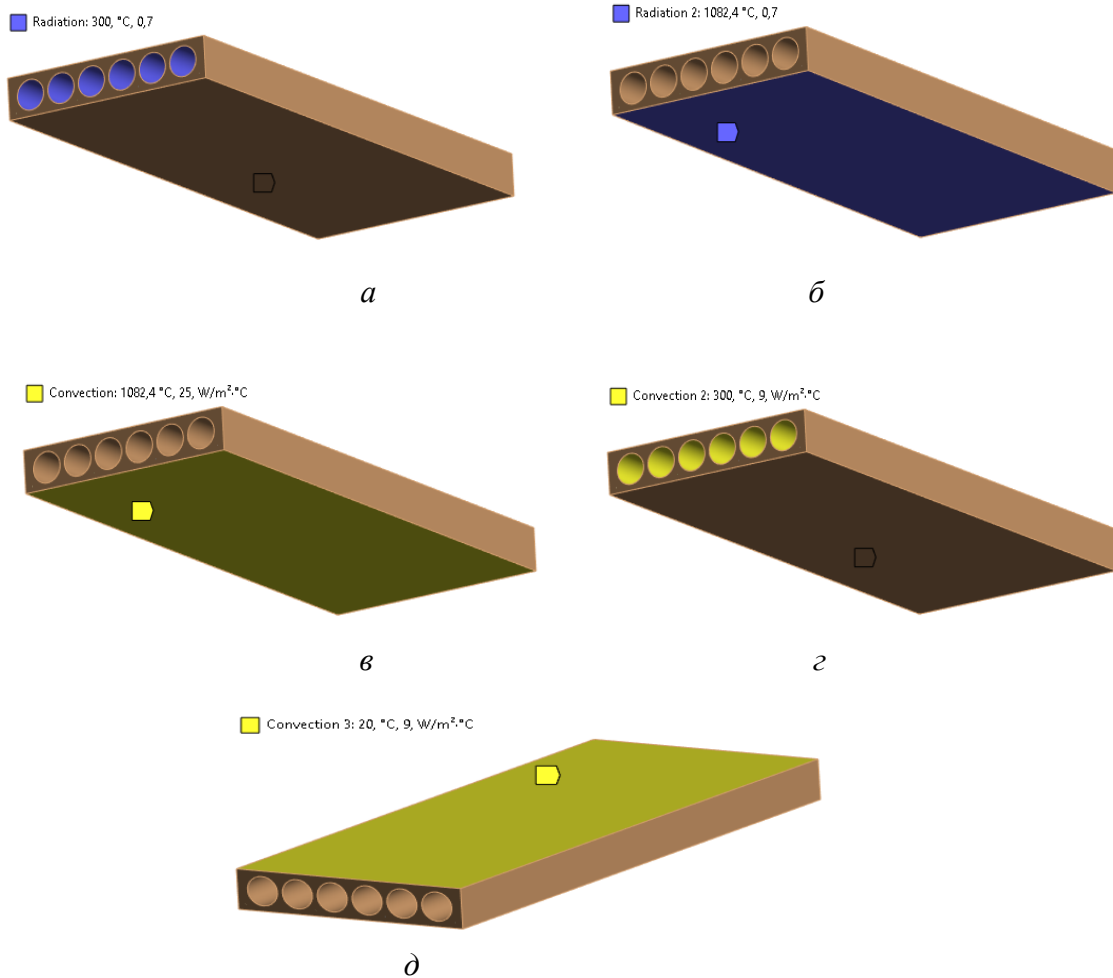


Рисунок 3 – Прикладання граничних умов теплообміну досліджуваної залізобетонної порожнистої плити під час прикладання стандартного температурного режиму пожежі: а, б – радіаційний теплообмін у порожнинах та обігрівній поверхні плити; в, г – конвекційний теплообмін у порожнинах та обігрівній поверхні плити; д – конвекційний теплообмін у необігрівній поверхні плити

Номінальний тепловий вплив стандартного температурного режиму пожежі прикладено до нижньої поверхні досліджуваної конструкції за рекомендаціями [2–3]:

$$\Theta = 345 \lg(8t+1) + 20 \quad (1)$$

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв;

Θ – температура, яка відповідає часу t , °C.

Термін прикладання температурного режиму пожежі становить 9000 с для визначення часу настання граничного стану з вогнестійкості втрати теплоізолювальної здатності, що відповідає класу вогнестійкості плити перекриття REI 150.

З огляду на наявність отворів у порожнистих плитах згідно з рекомендаціями [10–11] та [12–13] враховано конвекційний та радіаційний теплообмін у відповідних порожнинах (рис. 3 а, 3 г).

Результати. Показники розподілу температури досліджуваною залізобетонною порожнистою плитою у разі впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 9000 с із використанням різних скінчено-елементних сіток наведені на рис. 4.

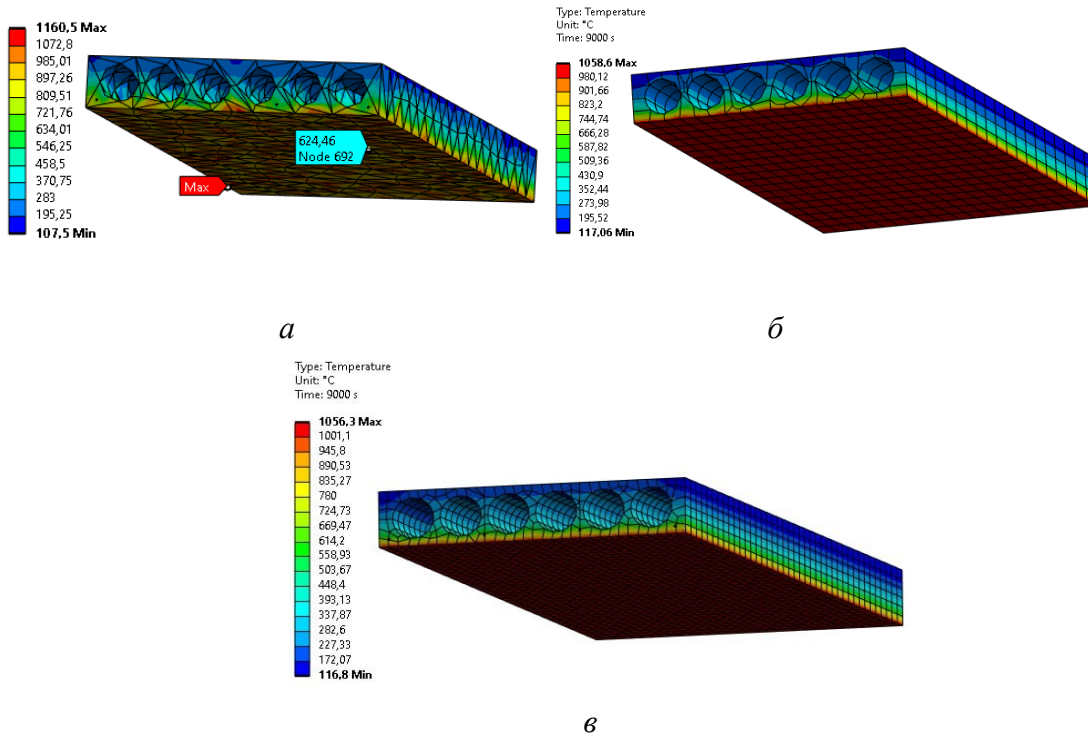


Рисунок 4 – Результати розв’язання теплотехнічної задачі щодо залізобетонної порожнистої плити у разі впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 9000 с під час застосування різних скінченно-елементних сіток: *а* – автоматична, *б* – за допомогою методу MultiZone, *в* – за допомогою методу Sweep

Аналізуючи отримані результати, наведені на рис. 4, спостерігається тенденція зменшення максимальної температури на обігрівній поверхні плити (*а* – 1160,5 °С, *б* – 1058,6 °С та *в* – 1056,3 °С), що можна побачити з градієнтів температур. Крім цього, на рис. 4-а можна помітити нерівномірний прогрів обігрівного боку, причому різниця показників температури в різних місцях становить більше 500 °С, що не може бути, та вказує на сумні результати, оскільки за граничними умовами прикладено вплив стандартного температурного режиму до всієї обігрівної поверхні плити. Отже на рис. 4 б, в сітка більш якісна ніж 4 а.

На рис. 5 наведений розподіл температури на необігрівній поверхні досліджуваної плити в момент настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності.

Відповідно до вимог [2] ознаки настання граничного стану з вогнестійкості за втрати теплоізолювальної здатності полягають у фіксації зміни температури на необігрівній поверхні конструкції, зокрема підвищенні середньої температури понад 140 °С, або підвищенні температури в будь-якій точці більше ніж на 180 °С. Початкову температуру в разі проведення моделювання стандартного температурного режиму пожежі взято 20°С.

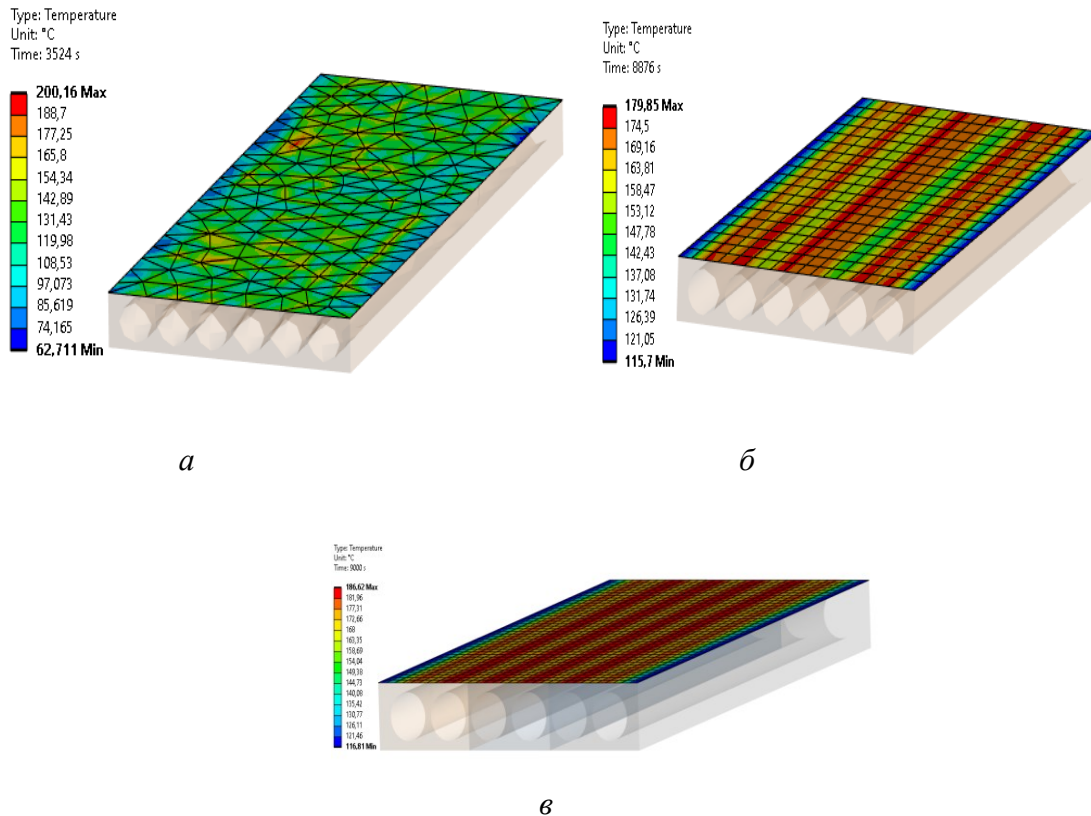


Рисунок 5 – Розподіл температури на необігрівній поверхні досліджуваної залізобетонної порожнистої плити в момент настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності

Аналізуючи отримані температурні показники, встановлено, що у разі застосування 1-го типу скінченно-елементної сітки настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності спостерігаються на 3524 с під час моделювання випробовувань за ознаками збільшення температури в будь-якій точці на 180 °С, водночас середнє збільшення температури на необігрівній поверхні плити відбувається лише на 102,92°С. Тобто розподіл температури на необігрівній поверхні плити відбувається нефізично, оскільки під час збільшення температури в якійсь точці на 180 °С на вказаний час середня температура мала приблизно також відповідати критичній середній під час настання теплоізолювальної здатності – 140 °С, але на той час середня температура збільшилась лише на 103 °С. Таким чином, нерівномірний обігрів обігрівної поверхні плити, а також нехарактерний розподіл температури на необігрівній поверхні плити вказують на низьку якість автоматичної скінченно-елементної моделі

(рис. 2 а, 4 а, 5 а) порівняно з методами MultiZone та Sweep. Час настання втрати теплоізолювальної здатності для 2 та 3 типів скінченно-елементних сіток зафіксовано на 8876 с та 7880 с відповідно за результатами збільшення середньої температури на 140 °С. Водночас максимальна температура на необігрівній поверхні становить лише 179,85 °С та 177,21°С відповідно, що вище більше ніж на 20 °С під час проведення досліджень за автоматичною скінченно-елементною сіткою, і пізніше за цим типом на 89,2 хв для сумісної сітки та 72,6 хв для гексадральної. Зазначене вкотре підтверджує низьку якість автоматичної скінченно-елементної сітки із використанням тетраїдальних скінченних елементів.

Аналізуючи поширення температури арматурними стрижнями встановлено, що під час застосування сітки 3-го типу спостерігається тенденція різного прогрівання сталевих стрижнів арматури (рис. 6).

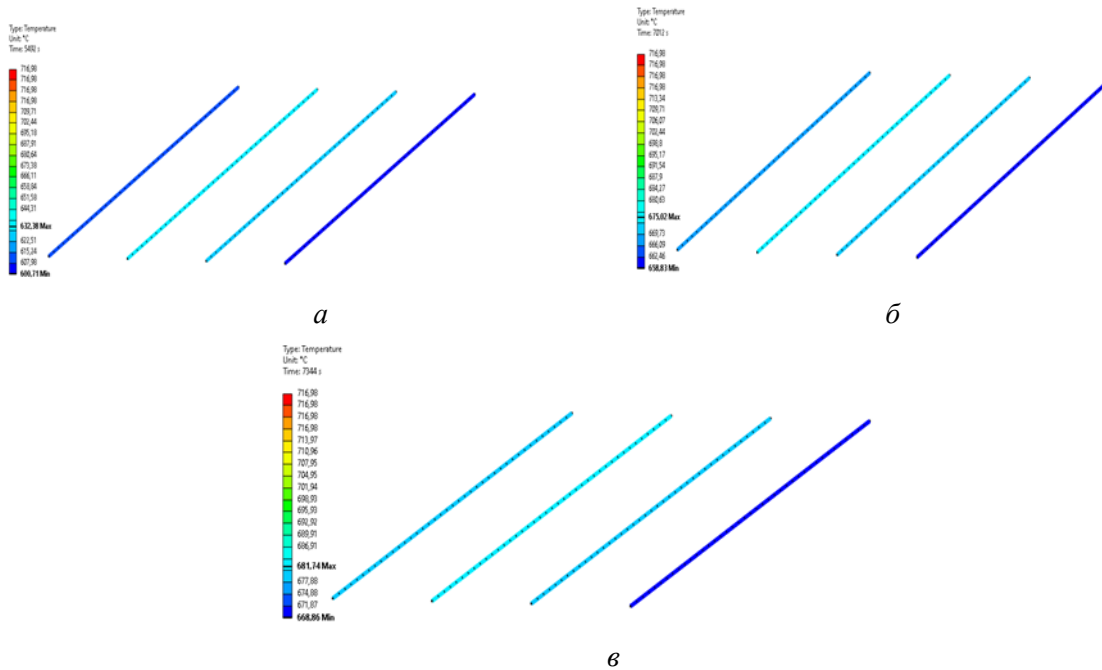


Рисунок 6 – Прогрівання арматурних стрижнів у різні моменти часу в разі моделювання теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі з використанням скінченно-елементної сітки 3 типу: а – 5492 с, б – 7012 с, в – 7344 с

На рис. 6 в спостерігається, що прогрівання лівого крайнього стрижня арматури вказує на вищу температуру порівняно з крайнім правим стрижнем. Це пояснюється тим, що для нагрівання лівого крайнього стрижня арматури з діаметром 10 мм необхідно менше теплової енергії, ніж для арматурних стрижнів з діаметром

12 мм (рис. 1). Такий тепловий процес не виявлено у разі застосування сумісної скінченно-елементної сітки 2-го типу (рис. 7), оскільки в цій моделі вузли таких елементів не перетинають місця контакту бетону зі сталевими стрижнями арматури, що унеможливорює отримання більш точних показників прогріву армування.

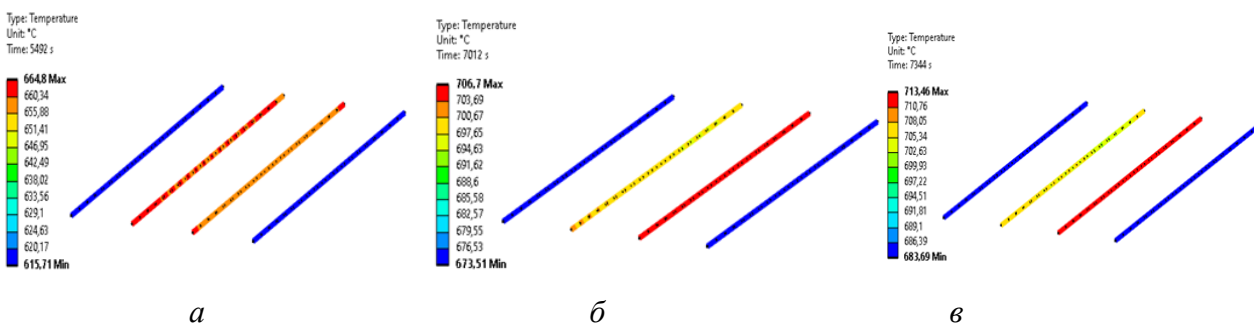


Рисунок 7 – Прогрівання арматурних стрижнів у різні моменти часу в разі моделювання теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі з використанням скінченно-елементної сітки 2 типу: а – 5492 с, б – 7012 с, в – 7344 с

Тенденцію більшого прогрівання центральних двох стрижнів можна пояснити так. Крім впливу стандартного температурного режиму пожежі на арматурні стрижні, ще діє конвекційний та радіаційний теплообмін із порожнини плити, що відбувається у разі прикладання граничних умов до досліджуваної плити

(рис. 3 – а, з). Такий теплообмін призводить до того, що центральні стрижні, які розташовані ближче до центра порожнини плити, можуть нагріватися більш інтенсивно, оскільки вони більше піддаються впливу тепла, яке випромінюється з порожнини і передається

шляхом конвекційного та радіаційного теплообміну.

Висновки та напрями подальших досліджень. Побудовано геометричну тривимірну модель фрагмента залізобетонної порожнистої плити перекриття з відображенням робочого армування – 4-х сталевих стрижнів – для імпортування у модуль Transient Thermal програмного комплексу ANSYS WB. У цьому модулі згенеровано такі три типи скінченно-елементної моделі фрагмента залізобетонної порожнистої плити:

- автоматичну за замовченням налаштувань із використанням тетраїдальних скінченних елементів;

- за допомогою методу MultiZone із використанням тетраїдальних та гексадральних скінченних елементів;

- за допомогою методу Sweep із використанням гексадральних скінченних елементів.

За результатами розв'язання теплотехнічної задачі щодо залізобетонної порожнистої плити за допомогою згенерованих скінченно-елементних моделей встановлено, що з настанням граничного стану з вогнестійкості втрата теплоізолювальної здатності спостерігається для 1-го типу моделі на 3524 с, 2-го типу на 8876 с, 3-го типу на 7880 с.

За результатами аналізу згенерованих скінченно-елементних сіток встановлено, що теплофізичні процеси під час моделювання із використанням скінченно-елементної моделі 3-го типу відтворюють розподіл температури більш реалістично, на відміну від 1-го та 2-го типів. Це зумовлено використанням найбільш оптимальної форми скінченних елементів, їх кількістю та перетину їхніми вузлами в місцях контакту бетону зі сталевую арматурою.

Встановлено, що нерівномірний обігрів обігрівної поверхні плити, а також

нехарактерний розподіл температури на необігрівній поверхні плити (рис. рис. 4 а, 5 а) під час використання згенерованої автоматичної скінченно-елементної сітки (рис. 2 а) вказують на низьку її якість порівняно з отриманими результатами у разі застосування методів MultiZone та Sweep (рис. 4 б, в; 5 б, в). Порівнюючи результати теплотехнічного розрахунку із використанням методу Sweep із методом MultiZone, встановлено, що характер температурного розподілу обігрівної поверхні плити майже однаковий (рис. 4 б, в). Однак необігрівна поверхня плити має температурний розподіл більш рівномірний у разі використання методу Sweep (рис. 5-в), порівнюючи результати, що отримано за допомогою методу MultiZone. Крім того, на рис. 6 в відображено, що прогрівання лівого крайнього стрижня арматури відбувається більш інтенсивно порівняно з крайнім правим стрижнем. Такі результати обґрунтовують те, що найбільш оптимальною скінченно-елементною сіткою з трьох типів, наведених у цій роботі, є модель із гексадральними скінченними елементами, що згенерована за допомогою методу Sweep.

Оскільки для статичної задачі зниження механічних властивостей сталевих стрижнів арматури суттєво впливає на напружено-деформований стан залізобетонних плит перекриттів, вибір найбільш оптимальної скінченно-елементної моделі має велике значення для отримання достовірних результатів під час оцінювання їхньої вогнестійкості. Однак необхідно враховувати, що у разі підбирання необхідного розміру скінченних елементів вказане перетинання можна забезпечити для будь-якої сітки із певними налаштуваннями, тому використання тетраїдальних та сумісних сіток потребує додаткових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги : ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ : ДП «УкрНДЦЗ», 2016. 35 с.
2. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT) : ДСТУ EN 1363-1:2023 [Чинний з 01.03.2024]. Київ : Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2023. 26 с.

3. Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 2. Перекриття та покриття (EN 1365-2:2014, IDT) : ДСТУ EN 1365-2:2023 [Чинний з 01.05.2024]. Київ : Технічний комітет «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2023. 16 с.
4. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. Зміна № 1 (EN 1992-1-1:2004, IDT) : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-1:2010 Єврокод 2 [Чинний з 01.07.2014]. Київ : ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2013. 312 с.
5. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Зміна № 1 : ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2 [Чинний з 01.07.2014]. Київ : Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій, 2013. 131 с.
6. Сідней С., Кобко В., Федченко С., Змага М., Заїка Н. Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. *Надзвичайні ситуації : попередження та ліквідація*. 2022. № 6(1). С. 95–103.
7. Madier D. An Introduction to the Fundamentals of Mesh Generation in Finite Element Analysis. *FEA Academy*, <https://www.fea-academy.com> 2023. 65 с.
8. Wang Yanbo. Finite Element Method Analysis for Differential Case on Vehicles Based on ANSYS Software. *Journal of Physics : Conference Series*. 2022. № 2303. 012072. P. 1 – 8.
9. Sidnei S., Nuianzin O., Kostenko T., Berezovskyi A., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. № 10(2). P. D1–D7.
10. Круковський П. Г., Ковалев А. І., Черненко, К. А., Метель, М. А., Абрамов, А. А. Моделювання теплового стану та вогнестійкості багатопустотного залізобетонного перекриття. *Пожежна безпека*. 2012. № 21. С. 85–94.
11. Renkas A. Забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття із застосуванням листових будівельних матеріалів. *Пожежна безпека*. 2019. № 34. С. 72–77. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.12>.
12. Ковальов А. І. Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 «Пожежна безпека» / УкрНДІЦЗ. Київ, 2012. 24 арк.
13. Поздеев С. В. Развитие научных основ визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних конструкцій: дис. ... докт. техн. наук: 21.06.02 «Пожежна безпека» / НУЦЗ України. Харків, 2012. 360 арк.

REFERENCES

1. Pozhezhna bezpeka ob'iektiv budivnytstva. Zahal'ni vymohy [Fire safety of construction objects. General requirements]. (2016). DBN V.1.1-7:2016 from 1st June 2017. Kyiv: DBN [in Ukrainian].
2. Vyprobuvannya na vohnestiikist'. Chastyna 1. Zahal'ni vymohy (EN 1363-1:2020, IDT) [Fire resistance tests. Part 1. General requirements]. (2023). DSTU EN 1363-1:2023 from 1st Murch 2023. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
3. Vyprobuvannya nesuchykh budivel'nykh konstruksii na vohnestiikist'. Chastyna 2. Perekryttya ta pokryttya (EN 1365-2:2014, IDT) [Testing load-bearing building structures for fire resistance. Part 2. Overlays and coverings]. (2023). DSTU EN 1365-2:2023 from 1st May 2023. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
4. Proektuvannya zalizobetonnykh konstruksiy. Chastyna 1-1. Zahalni pravyla i pravyla dlya sporud. Zmina № 1 (EN 1992-1-1:2004, IDT) [Design of concrete structures General rules and rules for buildings. Amendment № 1]. (2013). DSTU-N B EN 1992-1-1:2010. Eurocode 2 from 1st July 2014. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
5. Proektuvannya zalizobetonnykh konstruksiy. Chastyna 1-2. Zahalni polozhennya. Rozrakhunok konstruksiy na vohnestiikist' (EN 1992-1-2:2004, IDT). Zmina №1 [Design of concrete structures– Part 1–2: General rules – Structural fire design. Amendment № 1]. (2013). DSTU-NB EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2 from 1st July 2014. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
6. Sidnei, S., Kobko, V., Fedchenko, S., Zmaga, M., Zaika, N. (2022). Udokonalennya zonnogo metodu perevirky vohnestiikosti pustotnoyi plyty [Improvement of the zone method of checking the fire resistance of a hollow slab]. *Emergency situations: prevention and elimination*, 6 (1), 95–103. doi: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.95-102> [in Ukrainian].
7. Dominique Madier. (2023) *An Introduction to the Fundamentals of Mesh Generation in Finite Element Analysis*. [FEA Academy]. Retrieved from <https://www.fea-academy.com>
8. Wang, Yanbo. (2022). [Finite Element Method Analysis for Differential Case on Vehicles Based on ANSYS Software]. *Journal of Physics: Conference Series*, № 2303 012072, 1–8. doi:10.1088/1742-6596/2303/1/012072 [in China].
9. Sidnei, S., Nuianzin, O., Kostenko, T. V., Berezovskyi, A. I., Wąsik, W. (2023). [A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance]. *Journal of Engineering Sciences*, 10 (2), D1–D7. doi: 10.21272/jes.2023.10(2).d1 [in Ukrainian].
10. Krukovsky, P., Kovalev, A., Chernenko, K., Metel, M., Abramov, A. (2012). Modelyuvannya teploвого стану та vohnestiikosti bahatopustotnoho zalizobetonnoho perekryttya [Modeling of the thermal state and fire resistance of a multi-hollow reinforced concrete floor]. *Fire Security*, 21, 85–94. [in Ukrainian].
11. Renkas, A. (2019). Zabezpechennya vohnestiikosti zalizobetonnykh bahatopustotnykh plyt perekryttya iz zastosuvannyam lystovykh budivel'nykh materialiv [Ensuring fire resistance of reinforced concrete multi-hollow floor plates using sheet building materials]. *Fire safety*, (34), 72–77. doi: <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.12> [in Ukrainian].
12. Kovalev, A. I. (2012). *Udokonalennya metodu otsiniuvannya vohnezakhysnoi zdatnosti pokryviv zalizobetonnykh perekryttiv* [Improvement of the method of evaluating the fire protection ability of reinforced concrete floor coverings]. (Extended abstract of candidate's thesis). Ukrainian advanced scientific institute of civil protection. Kyiv [in Ukrainian].
13. Pozdieiev, S. V. (2012). *Rozvytok naukovykh osnov vyznachennia mezh vohnestiikosti nesuchykh zalizobetonnykh konstruksii* [Development of the scientific basis for determining the limits of fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures]. (Doctore's thesis). National University of Civil Defense of Ukraine. Harkiv [in Ukrainian].

**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE TYPE OF FINITE ELEMENT MESH ON
TEMPERATURE DISTRIBUTION OVER A HOLLOW FLOOR SLAB IN FIRE
SIMULATION**

S. Sidnei

Cherkasy Institute of Fire Safety of National University of Civil Defence of Ukraine, Ukraine

KEYWORDS:

fire resistance,
reinforced concrete
hollow core slab,
thermal response,
finite element,
standard fire
temperature regime

ANNOTATION

Computational experiments were conducted to solve the thermal engineering problem for a reinforced concrete hollow slab using the finite element method in the case of using three types of generated finite element grids. The purpose of the work is to determine the dependence of the influence of the finite-element grid on the parameters of temperature distribution on a reinforced concrete hollow slab during the solution of a heat engineering problem. Calculations of the temperature distribution of the investigated reinforced concrete structures during exposure to the standard fire temperature regime were carried out according to the recommendations of Eurocode 2. To solve the thermotechnical problem of temperature distribution in a reinforced concrete hollow slab under the influence of a standard fire temperature regime, models of concrete and reinforcement materials with thermophysical properties that change with temperature variations were created. According to the research results, it was found that the uneven heating of the heated surface of the plate, as well as the atypical temperature distribution on the unheated surface when using the generated automatic finite element mesh, indicate the low quality of this mesh compared to the meshes generated by the MultiZone and Sweep methods. Comparing the results of the thermal calculation using the Sweep and MultiZone methods, it was found that the temperature distribution pattern on the heated surface of the plate is almost identical. However, the unheated surface of the plate has a more uniform temperature distribution when using the Sweep method, comparing the results obtained using the MultiZone method. In addition, it was established that the heating of the leftmost rod of the armature is more intensive compared to the rightmost rod. These results justify that the most optimal finite element mesh among the three types presented in this work is the model with hexahedral finite elements, generated using the Sweep method.