УДК 614.841.343
DOI: https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.121.132

Станіслав СІДНЕЙ, *канд. техн. наук, доцент (ORCID: 0000-0002-7664-6620),*
Ірина РУДЕШКО *(ORCID: 0000-0003-3294-2214),*
Іван ІЩЕНКО *(ORCID: 0009-0000-5050-4926),*
Олександр ІВАНЕНКО, *канд. пед. наук (ORCID: 0009-0006-8566-0084),*
Віталій СТЕПАНЕНКО *(ORCID: 0009-0001-0839-197X),*
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ СІТКИ НА РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРИ ПО РЕБРИСТІЙ ПЛИТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПОЖЕЖІ

У статті досліджено вплив типу скінченно-елементної сітки на розподіл температури в залізобетонних ребристих плитах покриття під час моделювання пожежі. Для вирішення теплотехнічної задачі використано три типи сіток: автоматичну, MultiZone та Body Sizing. Аналіз результатів показав, що метод Body Sizing забезпечує найбільш фізично достовірний розподіл температури у бетоні та арматурі, максимально наближений до стандартного температурного режиму пожежі, уникаючи нефізичних від'ємних значень температури в арматурі. З'ясовано, що оптимізація скінченно-елементної моделі є критичною для підвищення точності моделювання, оскільки температура впливає на механічні властивості матеріалів, а отже, і на вогнестійкість конструкцій. Отримані результати сприяють вдосконаленню методик оцінювання рівня пожежної безпеки на об'єктах, що є важливим для гарантування безпечної експлуатації будівель.

Ключові слова: *теплотехнічна задача, моделювання пожежі, залізобетонна ребриста плита, скінченна-елемента сітка, вогнестійкість.*

Виробничі та складські будівлі потребують відкритий простір для влаштування обладнання, приладів, тощо а також у зв'язку із необхідністю реалізовувати технологічні процеси в середині будівлі [1]. Це призводить до потреби влаштування будівель із великим простором у середині. Для реалізації такого типу об'ємно-планувального рішення необхідні полегшені плити покриття з великими прольотом, що можливо виконати завдяки ребристим залізобетонним плитам покриття [1]. Такі конструкції завдяки своїм особливостям конфігурації за наявності поперечних та повздовжніх ребер, як раз підходять для влаштування покриття в промислових будівлях.

Однією з основних задач під час проєктування будівель та споруд є забезпечення пожежної безпеки [2]. Умови забезпечення пожежної безпеки для плит покриття є їхня вогнестійкість. Гарантований клас вогнестійкості будь-якої будівельної конструкції є запорука безпечної евакуації людей під час пожежі, а також сприяння створення умов для ефективного гасіння пожеж аварійно-рятувальними підрозділами.

Тому проведення досліджень, пов'язаних із розподілом температури у ребристих плитах покриття, є актуальним, оскільки розв'язання теплотехнічної

задачі є передумовою визначення достовірних значень вогнестійкості таких конструкцій.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для плит покриття основними граничними станами з вогнестійкості за якими проводиться оцінювання вогнестійкості є несуча здатність та цілісність табл. 1 [3]. Відповідно до [4] передбачається оцінювання вогнестійкості за допомогою проведення вогневих випробувань у спеціальних вогневих печах або проведення розрахунку. Під час проведення вогневих випробувань фрагменту конструкції або в повному її розміру відслідкувати втрату несучої здатності передбачається можливим за рахунок визначення настання критичного прогину конструкції в залежності від прольоту та висоти перерізу конструкції [5, 6]. Однак провести ідентифікацію утворення тріщин відповідних критичних розмірів [5, 6], скрізь які можливе поширення небезпечних чинників пожежі суттєво ускладнюється, оскільки необігрівна поверхня плити покривається вантажами для відтворення умов механічного навантаження [7]. Таким чином, зафіксувати ознаки настання граничного стану втрати цілісності в місцях де встановлене навантаження стає неможливим. У роботі [8] проведено аналіз теплової дії вогню на залізобетонні плити на основі їхнього нагрівання за стандартним пожежним температурним режимом в малогабаритній установці для дослідження теплової дії вогню на будівельні конструкції. Безумовно, застосована методика у [8] суттєво спрощує проведення експериментальних досліджень на відміну від проведення масштабних вогневих випробовувань у габаритних установках, але під час проведення таких досліджень не враховується процеси пов’язані з утворенням тріщин у бетоні, що не дає можливість ідентифікувати настання граничного стану втрати цілісності під час оцінювання на вогнестійкість.

У роботі [9] проводились дослідження розподілу температури по ребристій залізобетонній плити під час моделювання пожежі в програмному комплексі ANSYS WB. Однак у цій роботі було використано 1 200 000 одиниць скінченних елементів для створення математичної моделі, що формує надмірно велику розрахункову область з точки зору продуктивності. Це, своєю чергою, створює умови, які призводять до проблем із збіжністю при розв'язанні статичної задачі. Крім того, використання навіть такої кількості скінченних елементів із тетраїдальною формою не гарантує достовірності результатів, які описують фізичну поведінку конструкції в умовах пожежі.

У зв’язку з цим, дослідження впливу параметрів скінченно-елементної сітки на результати математичного моделювання розподілу температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі є актуальною науково-технічною задачею, що має значний практичний інтерес.

Постановка завдання.Мета роботи полягає у визначенні залежності впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по залізобетонній ребристий плиті покриття під час розв’язання теплотехнічної задачі.

Для досягнення мети сформовані наступні задачі:

1. В обчислювальному модулі Transient Thermal програмного комплексу ANSYS WB розв’язати теплотехнічну задачу розподілу температури по фрагменту залізобетонній ребристій плиті в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі, використовуючи 3 типи скінченно-елементної моделі конструкції, зокрема:

- 1-й тип: автоматична за замовченням 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 Body Syzing із використанням гексаедральних скінченних елементів.

2. Проаналізувати показники розподілу температури по фрагменту залізобетонній ребристий плиті, за результатами проведених розрахунків із використанням трьох типів скінченно-елементних сіток, та визначити найбільш оптимальну з них, для подальшого використання під час вирішення статичної задачі.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Одним із ключових напрямків у математичному моделюванні будь-яких процесів є спрощення моделі. Це забезпечує підвищення продуктивності обчислень і знижує ймовірність виникнення проблем із незбіжністю розв'язувача. Отже з метою зменшення розрахункової області під час проведення розрахунків у геометричному модулі побудовано фрагмент ¼ залізобетонної ребристої плити у тривимірному просторі, зменшену удвічі у повздовжньому та поперечному напрямках (рис. 1). В повному розмірі конструкція представлена у [9].

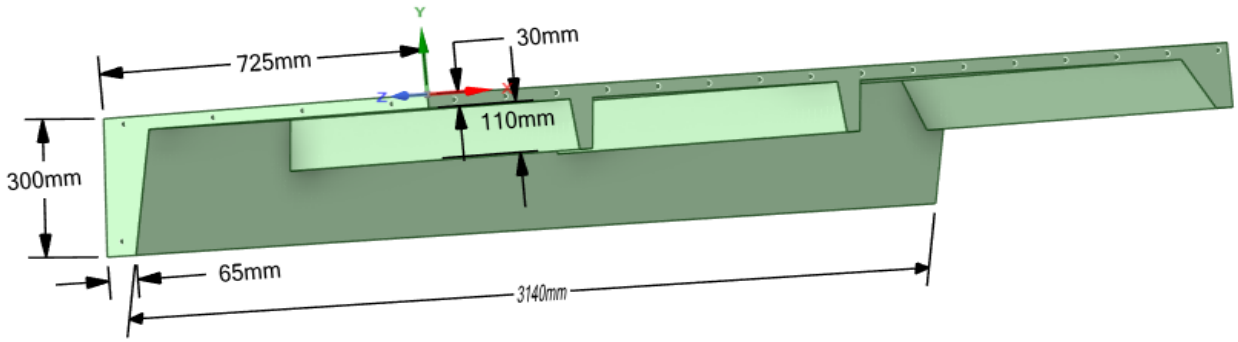
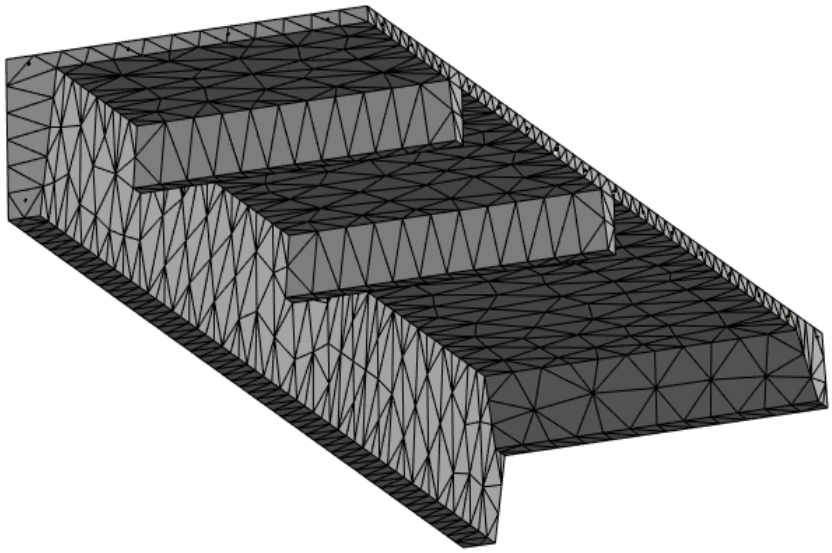
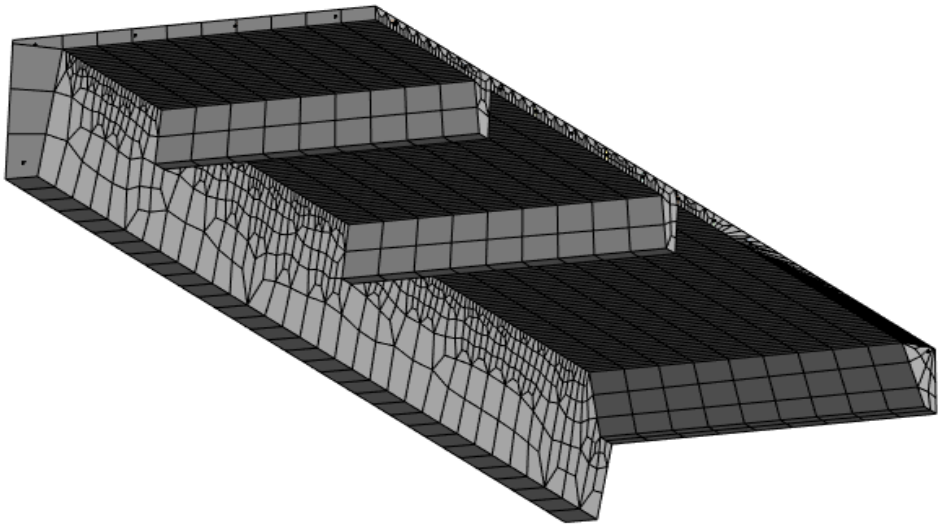


Рисунок 1 - Залізобетонна ребриста плита для розв’язання теплотехнічної задачі

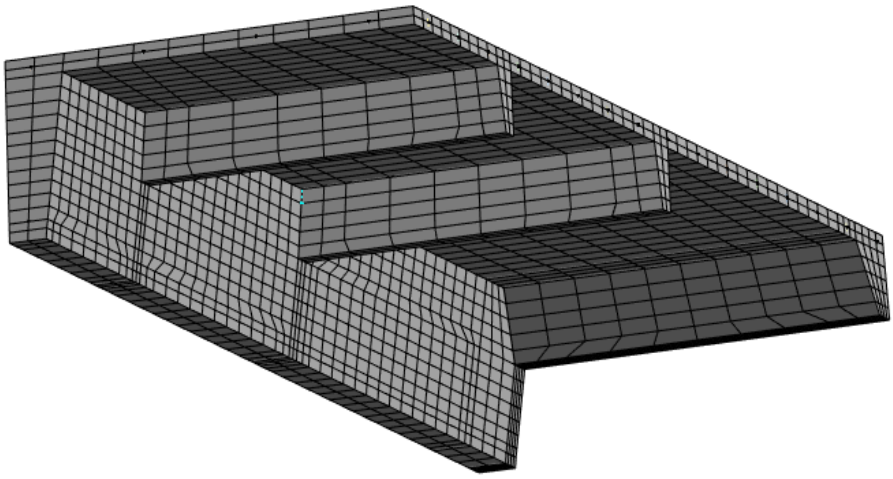
На рис. 2 відображені обрані три типи скінченно-елементних моделі залізобетонної ребристої плити, що використано під час вирішення теплотехнічної задачі. Скінченно-елементна модель досліджуваної плити, що наведена на рис. 2-*а*, згенерована автоматично із використанням тетраїдальних скінченних елементів. На рис. 2-*б* зображена скінченно-елементна модель, що згенерована за допомогою методу MultiZone із використанням тетраїдальних та гексаедральних скінченних елементів. На рис. 2-*в* наведена скінченно-елементна модель, що згенерована за допомогою методу із використанням гексаедральних скінченних елементів.



а



б



в

Рисунок 2 - Згенеровані скінченно-елементні моделі залізобетонної ребристої плити: *а* – автоматична, *б* – за допомогою методу MultiZone, *в* – за допомогою методу Body Sizing

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

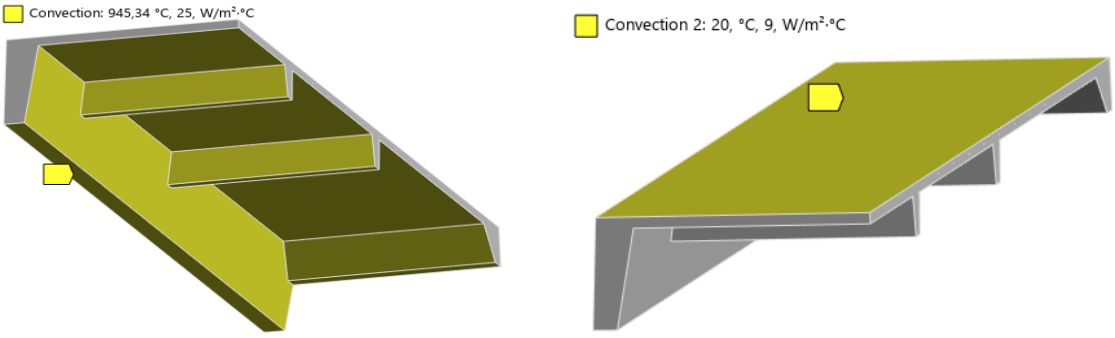
Таблиця 1 – Статистичні показники скінченно-елементних сіток

№ з/п	Тип згенерованої скінченно-елементної сітки	Геометрична форма скінченного елементу	Кількість скінченних елементів (од.)	Кількість вузлів (од.)
1	Автоматична	Тетраїдальна	3374	7073
2	Метод MultiZone	Тетраїдальна та гекседральна	3426	18766
3	Метод Body Sizing	Гекседральна	3390	17610

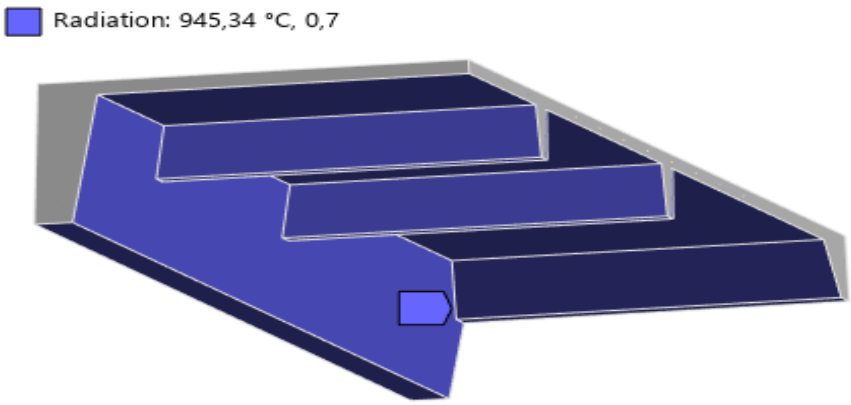
Аналізуючи отримані скінченно-елементні моделі можна побачити, що перетинання вузлів сіток зі сталевими стрижнями арматури спостерігаються лише у згенерованої моделі при використанні методу Body Sizing, що передбачає отримання більш точних результатів, на відміну від створених сіток автоматично та за допомогою методу MultiZone.

Для розв'язання теплотехнічної задачі розподілу температури по залізобетонній порожнистій плити під час впливу стандартного температурного режиму пожежі створено моделі матеріалів бетону та арматури із теплофізичними характеристиками, що змінюються під час зміни температури за рекомендаціями [10, 11].

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



а *б*



в

Рисунок 3. Прикладання граничних умов теплообміну досліджуваної залізобетонної порожнистої плити під час прикладання стандартного температурного режиму пожежі: *а* – конвекційний теплообмін обігрівної поверхні плити; *б* – конвекційний теплообмін у необігрівній поверхні плити; *в* – радіаційний теплообмін обігрівної поверхні плити.

Номінальний тепловий вплив стандартного температурного режиму пожежі прикладено до нижньої поверхні досліджуваної конструкції за рекомендаціями [5, 6]:

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

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв;
Θ – температура, яка відповідає часу t, °C.

Термін прикладання температурного режиму пожежі складає 60 хв, оскільки для таких типів конструкцій найвищий клас вогнестійкості складає RE 60.

Показники розподілу температури по ребристій залізобетонній плити в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв із використанням різних скінчено-елементних сіток наведені на рис. 4.

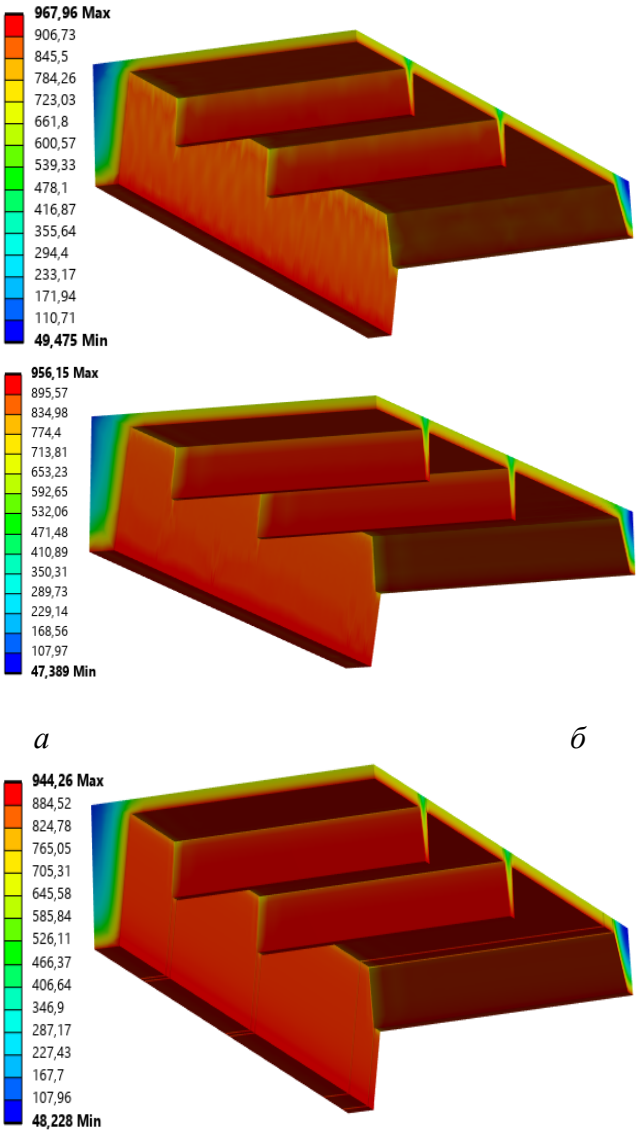
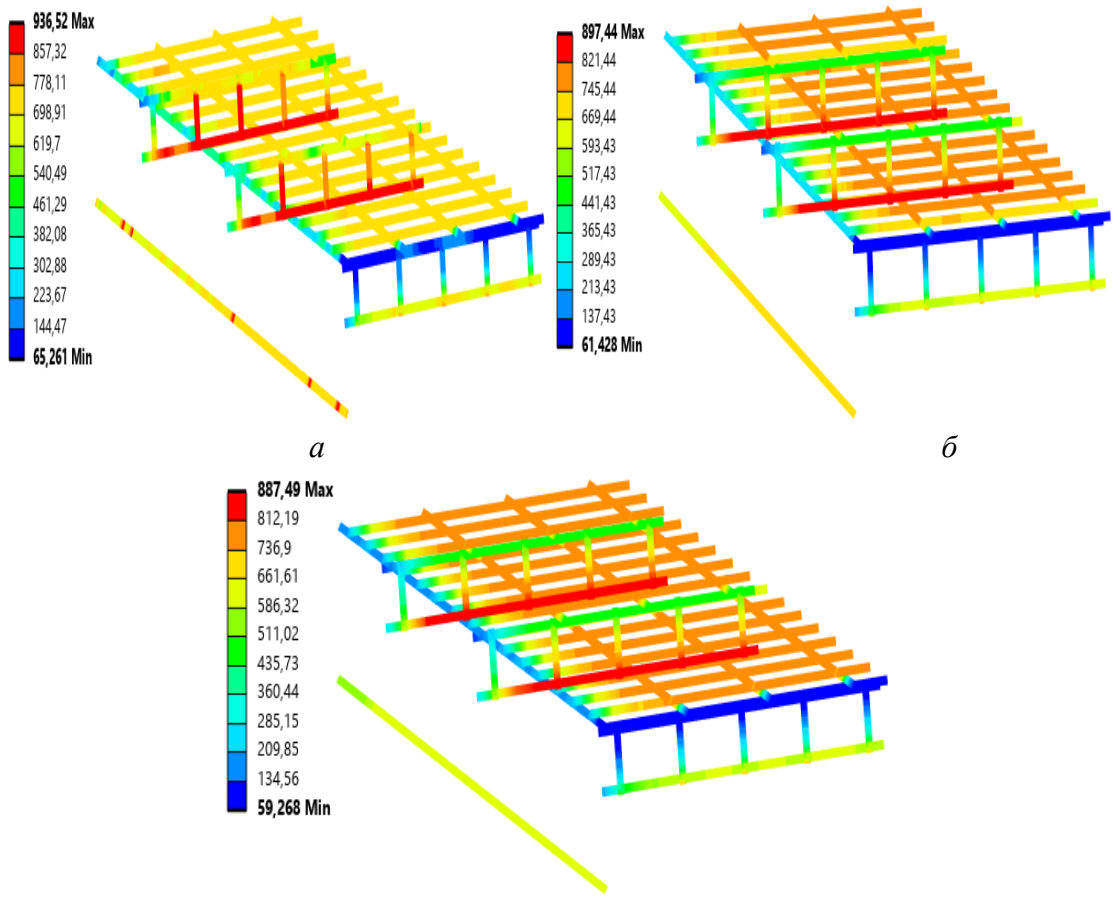


Рисунок 4 - Розподіл температури по бетону залізобетонній ребристої плити під час впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв із використанням різних скінченно-елементних сіток: *а* – автоматична, *б* – за допомогою методу MultiZone, *в* – за допомогою методу Body Sizing

Аналізуючи отримані результати, наведені на рис. 4, спостерігається тенденція зменшення максимальної температури бетону на обігрівній поверхні плити в залежності від обраного методу побудови скінченно-елементної сітки: автоматичний – 967,96 °С, MultiZone – 956,15 °С та Body Sizing – 944,26 °С, що можна побачити з градієнтів температур.

На рис. 5 відображений розподіл температури по арматурі залізобетонної ребристої плити.



а *б* *в*

Рисунок 4 - Розподіл температури по арматурі залізобетонній ребристої плити під час впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв із використанням різних скінченно-елементних сіток: *а* – автоматична, *б* – за допомогою методу MultiZone, *в* – за допомогою методу Body Sizing

Аналізуючи отримані результати, що наведено на рис. 5, спостерігається така ж тенденція зменшення максимальної температури арматури як і у бетону (рис. 4) в залежності від обраного методу побудови скінченно-елементної сітки: автоматичний – 936,52 °С, MultiZone – 897,44 °С та Body Sizing – 887,49 °С, що можна побачити з градієнтів температур.

Відповідно до (1) максимальна температура впливу стандартного температурного режиму відповідає температурі 945,34°С, що відображено при прикладанні граничних умов на рис. 3-*а,в*. Таким чином максимальна температура у бетоні не повинна перевищувати вказане значення, однак відповідно до отриманих результатів, що відображено на рис. 4-*а, б* спостерігається температура більша за температуру пожежі, при автоматичному – 967,96 °С, та MultiZone – 956,15 °С відповідно. Це вказує на нефізичний розподіл температури у досліджуваній залізобетонній ребристий плиті при використанні таких сіток. При застосуванні методу Body Sizing для створення скінченно-елементної сітки температура в бетоні складає 944,26 °С, що дуже наближено до температури стандартного температурного режиму пожежі та є логічним. Аналізуючи розподіл мінімальної температури арматури (рис. 5), спостерігається тенденція зменшення температури нижче початкової. Зокрема, при використанні автоматичного методу побудови скінченно-елементної сітки максимальна від'ємна температура складає –26,493 °С, за методом MultiZone –1,5186 °С. Водночас, при застосуванні методу

Body Sizing така тенденція не спостерігається, що підтверджує фізичний характер розподілу температури в арматурі в умовах впливу пожежі за цим методом.

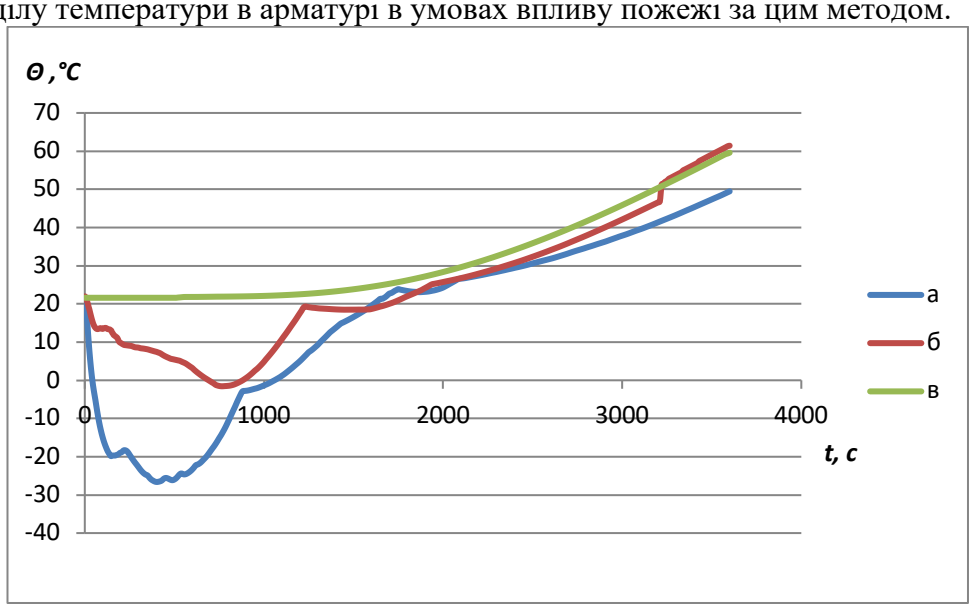


Рисунок 5 - Розподіл мінімальної температури в арматурі залізобетонної ребристої плити із використанням різних скінченно-елементних сіток: *а* – автоматична, *б* – за допомогою методу MultiZone, *в* – за допомогою методу Body Sizing

Визначення розподілу температури по бетону та арматури впливають на достовірність результатів під час розв'язання статичної задачі, оскільки зменшення механічних властивостей цих матеріалів в залежності від температури впливають на показники вогнестійкості будь-якої будівельної конструкції.

Таким чином, дослідження впливу різних скінченно-елементних сіток на розподіл температури в залізобетонній ребристій плиті в умовах пожежі показало важливість вибору оптимальної методики побудови скінченно-елемепнтної моделі. Порівняння трьох типів сіток (автоматичної, MultiZone та Body Sizing) виявило суттєві відмінності в точності результатів теплотехнічного моделювання.

Висновки. Результати дослідження підтвердили, що метод створення скінченно-елементної моделі Body Sizing є найоптимальнішим для задач теплотехнічного моделювання залізобетонних ребристих плит, оскільки забезпечує високу точність.

1. За результатами розв'язаної теплотехнічної задачі розподілу температури по фрагменту залізобетонної ребристої плити в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі встановлено: максимальна температура у бетоні та арматурі складає 967,96 °С та 936,52 °С за автоматичним методом, 956,15 °С та 897,44 °С за методом MultiZone, а також 944,26 °С та 887,49 °С за методом Body Sizing відповідно.

2. Метод Body Sizing із використанням гексаедричних скінченних елементів забезпечує найбільш фізично достовірний розподіл температури в бетоні (944,26 °С), що відповідає стандартному температурному режиму пожежі (1). Розподіл температури в арматурі при цьому методі також демонструє найбільш точні результати, оскільки від'ємних температур, характерних для автоматичного методу та MultiZone, не спостерігається.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Yahya, Yahya & Galeb, Alaa. (2024). Key effects on the structural behavior of fiber- reinforced lightweight concrete-ribbed slabs: A review. Volume 14.

2. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.

3. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об`єктів будівництва. Загальні вимоги.

4. Nuianzin, O., Kryshtal, D., Zemlianskyi, O., Nesterenko, A., Samchenko, T. (2020). Study of the Heat and Mass Transfer in Special Furnaces During Fire Resistance Tests of Building Construction. In: Makovicka Osvaldova, L., Markert, F., Zelinka, S. (eds) Wood & Fire Safety. WFS 2020. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_27.

5. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT).

6. ДСТУ EN 1365-2:2023 Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 2. Перекриття та покриття (EN 1365-2:2014, IDT).

7. Sidnei, S., Gonchar, S., Zhuravskij, M., Matsyk, I., Nozhko, I., Petukhova, O., Shnal, T., & Vykhrystenko, V. (2024). Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *5*(7 (131), 15–24. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313935.

8. O Nuianzin, A Kozak, V Kostenko, M Kryshtal, V Nuianzin, O Nekora. The research of the fire resistance limits of a reinforced concrete slab according to the results of fire tests without mechanical load. Strength of Materials and Theory of Structures, Issue №110 (2023) 264-276.

9. РУДЕШКО Ірина, ЗАЇКА Наталія, КУЛІЦА Олег, **СІДНЕЙ Станіслав**. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕБРИСТОЇ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПАНЕЛІ ПОКРИТТЯ ЗА УМОВАМИ СТАНДАРТНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 2022, 6.2: 94-101. DOI:https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.94-101.

10. 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.

11. 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: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2013. 131 с.

REFERENCES

1. Yahya, Yahya & Galeb, Alaa. (2024). Key effects on the structural behavior of fiber-reinforced lightweight concrete-ribbed slabs: A review. *Volume 14*.

2. DSTU 8828:2019 Fire Safety. General Provisions.

3. DBN V.1.1-7:2016 Fire Safety of Construction Facilities. General Requirements.

4. Nuianzin, O., Kryshtal, D., Zemlianskyi, O., Nesterenko, A., Samchenko, T. (2020). Study of the Heat and Mass Transfer in Special Furnaces During Fire Resistance Tests of Building Construction. In: Makovicka Osvaldova, L., Markert, F., Zelinka, S. (eds) *Wood & Fire Safety. WFS 2020*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_27.

5. DSTU EN 1363-1:2023 Fire Resistance Tests. Part 1. General Requirements (EN 1363-1:2020, IDT).

6. DSTU EN 1365-2:2023 Tests for the Fire Resistance of Load-Bearing Building Structures. Part 2. Floors and Roofs (EN 1365-2:2014, IDT).

7. Sidnei, S., Gonchar, S., Zhuravskij, M., Matsyk, I., Nozhko, I., Petukhova, O., Shnal, T., & Vykhrystenko, V. (2024). Defining a pattern in the loss of integrity by ribbed plates under fire conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5*(7 (131)), 15–24. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313935.

8. Nuianzin, O., Kozak, A., Kostenko, V., Kryshtal, M., Nekora, O. (2023). The research of the fire resistance limits of a reinforced concrete slab according to the results of fire tests without mechanical load. *Strength of Materials and Theory of Structures, 110*, 264–276.

9. Rudeshko, I., Zaika, N., Kulitsa, O., Sidnei, S. (2022). Research on ribbed reinforced concrete panels under standard fire temperature conditions. *Emergency Situations: Prevention and Elimination, 6.2*, 94–101. https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.94-101.

10. Design of Reinforced Concrete Structures. Part 1-1. General Rules and Rules for Structures. Amendment No. 1 (EN 1992-1-1:2004, IDT): DSTU-N B EN 1992-1-1:2010 Eurocode 2 [Effective from 01.07.2014]. Kyiv: State Research Institute of Building Structures, 2013, 312 p.

11. Design of Reinforced Concrete Structures. Part 1-2. General Provisions. Fire Resistance Calculation (EN 1992-1-2:2004, IDT). Amendment No. 1: DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2 [Effective from 01.07.2014]. Kyiv: State Research Institute of Building Structures, 2013, 131 p.

Stanislav SIDNEI, *PhD in technical sciences, assistant professor*
(ORCID: 0000-0002-7664-6620),
Iryna RUDESHKO *(ORCID: 0000-0003-3294-2214),*
Ivan ISHCHENKO *(ORCID: 0009-0000-5050-4926),*
Oleksandr IVANENKO, *PhD in pedagogical sciences*
(ORCID: 0009-0006-8566-0084),
Vitalii STEPANENKO *(ORCID: 0009-0001-0839-197X),*
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes
National University of Civil Protection of Ukraine

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE FINITE ELEMENT MESH ON THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OVER THE RIBBED PLATE IN FIRE MODELING

The article investigates the influence of finite element mesh type on the temperature distribution in reinforced concrete ribbed slabs during fire modeling. The thermal task was solved using three mesh generation methods: Automatic, MultiZone, and Body Sizing. The results revealed significant differences in the accuracy of temperature modeling depending on the mesh type. The Body Sizing method demonstrated the most physically accurate temperature distribution in concrete and reinforcement, closely aligning with the standard fire temperature regime. Unlike the other methods, it avoided non-physical negative temperature values in the reinforcement, which were observed with Automatic and MultiZone meshes.

Key findings indicate that mesh optimization is critical for improving the reliability of thermal modeling results. A correct temperature distribution model ensures a more accurate representation of material properties, particularly their mechanical behavior under fire conditions. For instance, the maximum concrete temperature observed with the Body Sizing method was 944.26 °C, which is consistent with the standard temperature regime, compared to 967.96 °C and 956.15 °C for the Automatic and MultiZone methods, respectively. Similarly, reinforcement temperatures followed the same trend: 887.49 °C for Body Sizing versus 936.52 °C for Automatic and 897.44 °C for MultiZone.

The study emphasizes the importance of selecting an optimal finite element model to evaluate fire resistance accurately. This research contributes to improving fire safety assessments by enabling more precise predictions of the thermal behavior of reinforced concrete structures. Such findings are essential for designing safe and efficient structural systems, ensuring compliance with fire resistance standards, and enhancing the performance of building components under fire exposure.

The results are valuable for professionals involved in structural design and fire safety engineering, offering a foundation for developing advanced modeling techniques to predict and improve the fire resistance of ribbed slabs and similar constructions.