

С.О. Сідней¹, О.М. Тищенко², А.І. Ковальов¹, К.В. Григоренко¹

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, Україна

²Черкаський державний технологічний університет, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОРОЖНИСТИХ ПЛИТ ЗА ВТРАТОЮ ЦІЛІСНОСТІ

За результатами обчислювальних експериментів фрагменту залізобетонної порожнистої плити під час впливу сумісного термосилового навантаження визначений параметр утворення наскрізних тріщин за рахунок видалення скінченних елементів у бетоні конструкції. Це ідентифікується як настання граничного стану втрати цілісності. Це спрямовано на розробку методу оцінювання вогнестійкості таких конструкцій за настанням граничного стану втрати цілісності.

Ключові слова: вогнестійкість, цілісність, порожниста плита, продукти згорання, наскрізні тріщини, скінченно-елементна модель.

Вступ

Оптимальний вибір ґрунтів для будівництва різноманітних споруд і будівель є одним із пріоритетів сучасного будівництва. Це обумовлено обмеженістю можливостей при використанні важких будівельних конструкцій виготовлених із залізобетону. Отже, зменшення ваги будівлі сприяє більшому вибору ґрунту, а також може призвести до скорочення обсягу будівельних робіт, зниження їх вартості та спрощення виконання, що дозволяє швидше реалізувати задумане проектно рішення.

Один з найбільш оригінальних рішень щодо влаштування міцного і в той же час полегшеного міжповерхового перекриття є залізобетонні порожнисті плити [1, 2]. Оригінальність залізобетонних порожнистих плит перекриття полягає в їхній конструкції, яка поєднує міцність і легкість. Вони мають порожнини, що знижують вагу плити, але зберігають її здатність витримувати значні навантаження. Це рішення дозволяє зменшити масу конструкції без втрати її несучої здатності, що знижує навантаження на фундамент і зменшує витрати на матеріали, зберігаючи при цьому необхідні експлуатаційні характеристики. Крім того залізобетонні порожнисті плити також покращують тепло- та звукоізоляційні властивості міжповерхові перекриття, що робить ці плити популярним вибором для сучасного будівництва. Виробництво порожнистих плит з отворами може вимагати менше матеріалів порівняно з традиційними плитами, що може зменшити екологічний слід будівельних проєктів [3].

Отже, розробка розрахункового методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних

порожнистих плит за граничним станом втрати цілісності є важливим кроком у підвищенні пожежної безпеки будівельних конструкцій та будівель у цілому. Це пояснюється тим, що у разі проведення досліджень за цим напрямком, є можливість визначити, якій граничний стан з вогнестійкості настане першим, тобто визначити час настання втрати цілісності у залізобетонних порожнистих плитах, а після цього порівняти отримані результати із часом настання решти граничних станів. Такі дані дозволять отримати інформацію про утворення «критичних» тріщин, скрізь які можливе поширення небезпечних чинників пожежі. Це загрожує життю та здоров'ю людини, а також чине перешкоди під час проведення рятувальних робіт.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним із основних аспектів щодо забезпечення безпеки людству під час експлуатації будівель є застосування будівельних конструкцій необхідного класу вогнестійкості [4, 5]. Найбільш достовірне визначення цього показника прийнято здійснювати за допомогою натурних вогневих випробувань, оскільки при проведенні таких робіт відображається ні фрагмент конструкції, або окремо конструкція, а будівля у цілому [4]. Але зафіксувати ознаки настання граничного стану втрати цілісності під час проведення практичних випробувань відповідно до EN 1363-1:2020 ускладнюються, оскільки необігрівна поверхня залізобетонних плит перекриттів покрита вантажами для відтворення умов механічного навантаження при експлуатації реальної конструкції [6]. Крім того, важливо

враховувати, що під час цих робіт у навколишнє середовище виділяється значна концентрація CO₂ та шкідливі продукти згорання [7]. Це призводить до забруднення атмосфери та може суттєво впливати на екологічну безпеку місць, де проводяться подібні роботи [7]. Крім того, проведення таких випробувань є значно витратним та вимагає великих зусиль. Існує також експериментальний метод вогневих випробувань, який також має вплив на екологічну безпеку довкілля.

Згідно з рекомендаціями EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2 передбачається визначення або перевірка межі (класу) вогнестійкості будівельних конструкцій за допомогою розрахункових методів [9, 10]. Але в цих стандартах для залізобетонних порожнистих плит перекриття не описано методики оцінювання їхньої вогнестійкості ні за табличним методом, ні за уточненим. У роботі [10] описаний зонний метод оцінювання вогнестійкості таких конструкцій, але за настанням лише втрати несучої здатності, що не дає можливість врахувати настання граничного стану втрати цілісності. У роботі [11] показано, що утворення наскрізних тріщин унаслідок утворення призми руйнування не може бути ідентифіковано, оскільки за визначеними ознаками появи тріщин у точках інтегрування не дозволяють однозначно їх інтерпретувати. Ознаки настання граничного стану втрати цілісності не беруться до уваги, один з них – це утворення тріщин, в які може зануритись шуп діаметром 25 мм згідно EN 1363-1:2020. Однак статистичні дані [12] показують, що найбільша кількість людей загинула внаслідок отруєння синильною кислотою та продуктами згорання. Ці продукти можуть проникати через утворені тріщини в міжповерхових перекриттях під час пожежі, що загрожує життю та здоров'ю людини. У роботі [13] представлені результати досліджень математичного моделювання залізобетонної порожнистої плити при оцінюванні її на вогнестійкість за граничним станом втрати цілісності. Однак настання цього граничного стану фіксувалося при моменті зупинки проведення обчислень через набуття пластичних деформацій у великої кількості скінченних елементів матриці бетону та їхнього видалення. Наскрізних тріщин у [13], що є критерієм настання граничного стану втрати цілісності, зафіксовано не було. Це пояснюється застосуванням теорії міцності бетону Друкера-Прагера, яка розширює критерії пластичності та добре підходить для моделювання пластичної деформації [14]. Проте вказана теорія міцності може бути менш точною для крихких матеріалів, які зазнають тріщин [14]. Більш точною для моделювання утворення та розвитку тріщин у бетоні порівнюючи з теорією міцності Друкера-Прагера є теорія міцності Вільяма-Варнке, тому що

вона враховує нелінійні поведінкові властивості бетону [14]. Отже, для більш точного моделювання утворення та розвитку тріщин у бетоні доцільно використовувати теорію міцності Вільяма-Варнке. Це зумовлено тим, що ця теорія враховує нелінійні поведінкові властивості бетону, що дозволяє краще прогнозувати настання граничного стану втрати цілісності, порівняно з теорією міцності Друкера-Прагера.

У роботі [15] описані критерії для ідентифікації утворення наскрізних тріщин, з подальшою можливістю застосування уточненого підходу для оцінювання вогнестійкості порожнистих плит за граничним станом втрати цілісності при використанні математичного моделювання. Проте в даній роботі відсутній опис розв'язання теплотехнічної задачі, що є недостатнім для повного обґрунтування загального методу оцінки вогнестійкості за критерієм граничного стану втрати цілісності. Водночас у роботі [15] представлені досліджувані критерії, що дозволили отримати критерій для ідентифікації даного стану.

Мета та задачі дослідження

Метою роботи є створення методу оцінювання вогнестійкості для залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це надасть можливість забезпечити надійність конструкцій під час пожежі, зменшити ризик загрози здоров'ю та життю людей, а також підвищити ефективність аварійно-рятувальних робіт.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розв'язати теплотехнічну задачу розподілу температури по фрагменту залізобетонної порожнистої плити протягом 1 год;

- провести розрахунок напружено-деформованого стану фрагменту залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу;

- за результатами теплотехнічного та статичного розрахунків обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності.

Більшість плит перекриттів проєктують з врахуванням впливу 50% рівня навантаження від несучої спроможності. У зв'язку з чим це припущення було прийнято при завданні граничних умов.

Для проведення математичного моделювання було прийнято бетон класу С30/35 з густиною 2400 кг/м³. Основна сталева арматура прийнята класу А500 з густиною 7850 кг/м³. Теплофізичні характеристики бетону та арматури прийнято згідно EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2. Для врахування їхніх деформативних характеристик використовуються діаграми «деформації-напруження», що також рекомендовані EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2.

Оскільки характер поведінки плити та балки однаковий, було прийнято рішення використовувати для досліджень фрагмент замість цілої плити. Це дозволило підвищити продуктивність розрахунків без втрати достовірності результатів. Для моделювання використовували прямокутну трубу з циліндричною внутрішньою порожниною та робочими арматурними стержнями.

Для опису складного напружено-деформованого стану фрагмента залізобетонної порожнистої плити в умовах термосилового впливу було обрано програмний комплекс ANSYS, який дозволяє виконувати складні обчислення та моделювання таких ситуацій.

Для проведення досліджень щодо визначення моменту настання граничного стану з вогнестійкості втрати цілісності було розглянуто фрагмент залізобетонної порожнистої плити [15]. Це було зроблено з метою зменшення розрахункової області конструкції та обрано найбільш небезпечну частину плити – симетричну половину циклічного фрагменту конструкції у формі прямокутної труби з циліндричною внутрішньою порожниною та робочими арматурними стержнями [15] (рис. 1).

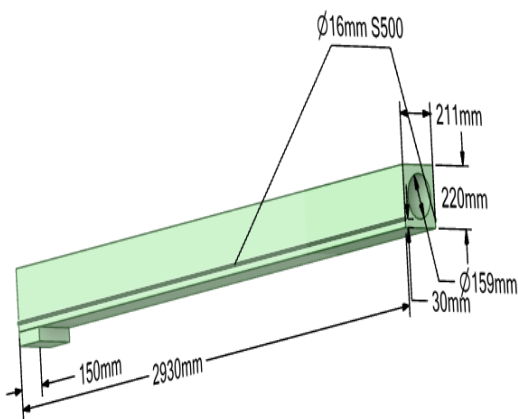


Рис. 1. Досліджуваний фрагмент залізобетонної порожнистої плити [15].

За результатами створення скінченно-елементної сітки з кількістю скінченних елементів 1890 одиниць було розв'язано теплотехнічну задачу розподілу температури по фрагменту залізобетонної

порожнистої плити протягом впливу 3600 с від стандартного температурного режиму пожежі. Скінченні елементи для бетону було прийнято гексаедричними типу SOLID, для арматури балкові типу LINK. На рис. 2 наведені результати розв'язання теплотехнічної задачі.

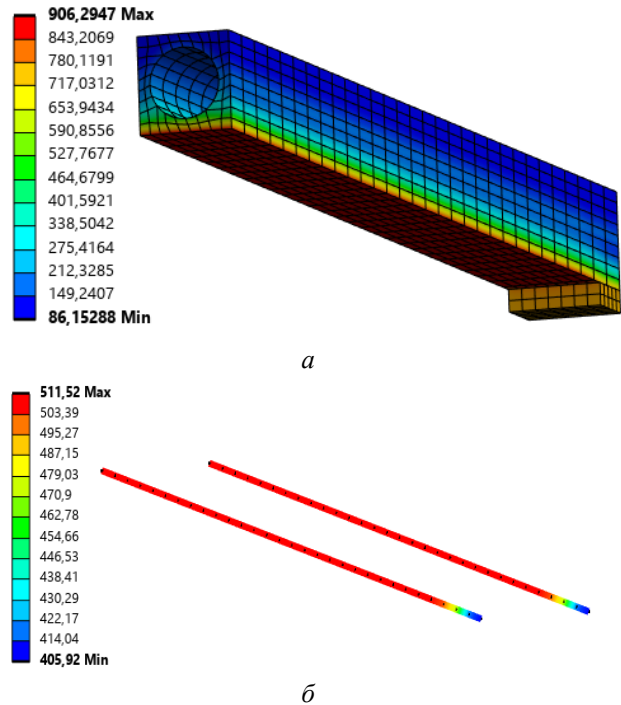


Рис. 2. Розподіл температури по фрагменту залізобетонної порожнистої плити за результатами впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 3600 с: а – по бетону, б – по арматурним стержням.

Математичні моделі для проведення розрахунку поведінки залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу засновані на застосуванні неявного методу інтегрування диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану із використанням методу скінченних елементів.

Таким чином, процес обчислення триває, доки не буде досягнуто прийнятної точності шуканого рішення.

Для отримання збіжності ітераційного процесу механічне навантаження прикладалось покроково. Після чого результати показників розподілу температури імпортовані для розв'язання сумісної термосилової задачі пов'язаної з фіксуванням настання граничного стану з вогнестійкості втрати цілісності за визначеними параметрами.

За результатами проведеного розрахунку напружено-деформованого стану фрагменту залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу було встановлено, що при набутті критичних пластичних деформацій у

матриці бетону спостерігається видалення скінченних елементів, що отримали значення $2,5 \cdot 10^{-3}$. На рис. 3 показані положення вилучених зруйнованих СЕ, які досягли критичної пластичної деформації $2,5 \cdot 10^{-3}$, з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити при різних моментах впливу стандартного температурного режиму пожежі. Таким чином було ідентифіковано на 44 хв утворення наскрізної тріщини, що інтерпретується, як настання граничного стану з вогнестійкості, зокрема втрати цілісності (рис. 3-в).

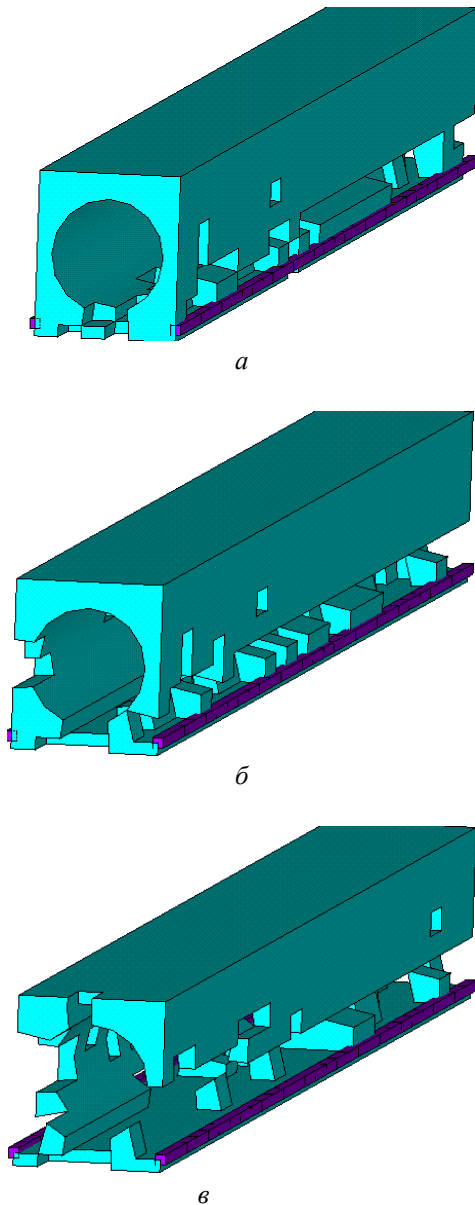


Рис. 3. Положення вилучених зруйнованих СЕ з розрахункової схеми залізобетонної порожнистої плити при впливі стандартного температурного режиму пожежі: а – 15 хв; б – 30 хв; в – 44 хв

Отже, завдяки отриманим результатам

передбачається можливість обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності, який викладається наступним чином:

1. Створення геометричної моделі фрагменту конструкції, який підлягає дослідженню, з метою максимального зменшення розрахункової області для проведення обчислювальних експериментів.

2. Побудова скінченної елементної моделі з використанням скінченних елементів гексаедричної форми типу SOLID для бетону, та лінійні скінченні елементи типу LINK для моделювання арматури. Такий тип скінченних елементів надасть можливість більш реалістично описати фізичні процеси під час сумісного термосилового впливу на фрагмент такого типу конструкцій.

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.

3. Теплофізичні та механічні характеристики бетону та арматури встановити за рекомендаціями EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2. Теорію міцності бетону прийняти Вільяма-Варнке. А також для можливості ідентифікації утворення наскрізних тріщин у бетону фрагменту конструкції передбачити налаштування стосовно виявлення критичної пластичної деформації $2,5 \cdot 10^{-3}$ у скінченних елементах бетону з подальшим їхнім вилученням із загальної схеми конструкції.

4. Завдання граничних умов конвективного та радіаційного теплообміну відповідно до [13] для розв'язання теплотехнічної задачі. Завдання граничних умов закріплення та механічного навантаження відповідно до [13] для розв'язання статичної задачі.

5. За результатами отриманих показників розподілу температури імпортувати їх для розв'язання статичної задачі, що передбачає деградацію бетону під час вже сумісного термосилового впливу.

6. Встановлення видалених скінченних елементів, що утворюють наскрізні тріщини у фрагменті залізобетонної порожнистої плити, що інтерпретується як настання граничного стану з вогнестійкості – втрата цілісності.

Таким чином, забезпечуючи цілісність у порожнистих плитах протягом необхідного часу, шкідливі продукти згорання, полум'я, дим, підвищена температура не будуть проникати через утворені тріщини, що дозволить не поширювати пожежу у будівлях. Це зменшує ризик загрози

життю та здоров'ю людей і надає можливість аварійно-рятувальним підрозділам виконувати функціональні обов'язки під час організації евакуації людей та матеріальних цінностей, а також ефективно діяти під час гасіння пожежі.

Застосований метод у роботі є універсальним, практично осяжним і таким, що може враховувати всі конструктивні особливості та сполучення граничних умов. Це дозволяє розв'язувати такі задачі, проте існують певні недоліки, що ставить під сумнів повсюдне застосування цього розрахункового-теоретичного підходу у такій модифікації. Указані недоліки полягають у трудомістких методиках підготовки розрахункових моделей, мають бути детально пророблені теоретичні аспекти їхнього застосування, необхідність експериментальної верифікації даних моделей та висока вартість програмного забезпечення та проведення розрахунків.

Перспективним розвитком цього дослідження є створення табличного методу оцінювання вогнестійкості залізобетонних порожнистих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це може суттєво спростити застосування методу під час перевірки відповідності класу вогнестійкості таких конструкцій.

Висновки

1. За результатами розв'язаної теплотехнічної задачі отримано розподіл температури по бетону та арматури фрагменту залізобетонної порожнистої плити.

2. За результатами розрахунку напружено-деформованого стану фрагменту залізобетонної порожнистої плити в умовах сумісного термосилового впливу було зафіксовано утворення наскрізної тріщини у бетоні конструкції на 44 хв.

3. За результатами проведених досліджень обґрунтований метод оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності для залізобетонних порожнистих плит.

Література

1. Мельник І. В. *Напружено-деформований стан та експериментальне впровадження порожнистих бетонних і залізобетонних конструкцій*: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.23.01. — Львів, 2021.

2. Kripak, Volodymyr & Koliakova, Vira & Skopets, Valentyn. (2019). *Methods of calculation of reinforced concrete monolithic floors with hollow liners. Building constructions. Theory and Practice. 1.* 15-23. 10.32347/2522-4182.5.2019.15-23.

3. Kripak, Volodymyr & Koliakova, Vira & GAIDAI,

Maksim. (2021). *Investigation of the effectiveness of reinforced concrete monolithic overlap with hollow liners. Building constructions. Theory and Practice.* 15-29. 10.32347/2522-4182.9.2021.15-29.

4. Chaturvedi S, Vedrtam A, Youssef MA, Palou MT, Barluenga G, Kalauni K. *Fire-Resistance Testing Procedures for Construction Elements—A Review. Fire.* 2023; 6(1):5. <https://doi.org/10.3390/fire6010005>.

5. Belikov, A. & Todorov, O. & Klymenko, G. & Tkachenko, A.. (2023). *On the issue of ensuring the safety of the operation of buildings and structures at high temperatures. Naukovyi visnyk Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu.* 39-47. 10.31474/2415-7902-2023-2-11-39-47.

6. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., 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 (Ukraine), Vol. 10(2), pp. D1–D7. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).d1.*

7. Åström, J., McNamee, M., Truchot, B. et al. *Experimental Assessment of Emission Factors from Fires in the Built Environment Including Scaling Effects. Fire Technol* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01440-5>

8. Ubani Obinna. *Fire Resistance Design of Reinforced Concrete Structures January 28, 2024.*

9. Станіслав Сідней, Василь Кобко, Світлана Федченко, Микола Змага, Наталія Заїка. *Удосконалення зонного методу перевірки вогнестійкості пустотної плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація,* 2022, 6.1: 95-103. DOI:<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-83-88>.

10. M Bellová. *EUROCODES: Structural Fire Design. Concrete and Concrete Structures 2013 Conference. Procedia Engineering 65 (2013) 382 – 386.*

11. Pozdieiev, S., Sidnei, S., Nekora, O., Subota, A., Kulisa, O. (2023). *Study of the Destruction Mechanism of Reinforced Concrete Hollow Slabs Under Fire Conditions. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Biletskyi, I., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 808. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46877-3_40.*

12. *World Fire Statistics 2011-2021.* <https://www.ctif.org/world-fire-statistics>.

13. Sidnei, S.O., Nuianzin, O.M., Kostenko, T.V., Berezovskyi, A.I., Wąsik, W. *A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*This link is disabled., 2023, 10(2), pp. D1–D7.

14. Дворкін Л. Й. *«Міцність бетону». Навчальний посібник.* – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 310 с.

15. Sidnei, S., Myroshnyk, O., Kovalov, A., Veselivskyi, R., Hryhorenko, K., Shnal, T., & Matsyk, I. (2024). *Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 4(7 (130), 70–77. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310520>.

Рецензент: д-р техн. наук доц. О.М. Нуянзін,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України

Автор: СІДНЕЙ Станіслав Олександрович
кандидат технічних наук, доцент, доцент
кафедри
Черкаський інститут пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України
E-mail – sidney-1980@ukr.net
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7664-6620>

Автор: ТИЩЕНКО Олександр Михайлович
доктор технічних наук, професор, професор
кафедри
Черкаський державний технологічний
університет

E-mail – tyschenkooleksandr56@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7303-6360>

Автор: КОВАЛЬОВ Андрій Іванович
доктор технічних наук, старший науковий
співробітник, доцент кафедри
Черкаський інститут пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України
E-mail – kovalev27051980@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6525-7558>

Автор: ГРИГОРЕНКО Костянтин Васильович
Старший викладач кафедри
Черкаський інститут пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету
цивільного захисту України
E-mail – grigkos1974@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0811-1496>

JUSTIFICATION OF THE METHOD OF ASSESSING THE FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE HOLLOW PLATES BY LOSS OF INTEGRITY

S. Sidnei¹, O. Tyshchenko², A. Kovalov¹, K. Hryhorenko¹

¹Cherkasy Institute of Fire Safety Named After Heroes of Chornobyl of the National University of Civil Defence of Ukraine

²Cherkasy State Technological University, Ukraine

The article focuses on developing a method to assess the fire resistance of reinforced concrete hollow slabs by identifying through cracks that indicate a loss of integrity. The study addresses the growing need for fire-resistant materials in construction and proposes a method that combines thermal and mechanical stress analysis using finite element modeling. By simulating the effects of a fire scenario on hollow concrete slabs, the research identifies conditions under which critical cracks form, threatening structural integrity and potentially allowing smoke and toxic combustion gases to spread through the building.

Through detailed thermal and structural calculations, the study identifies the parameters at which cracks emerge and propagate across the slab, using a finite element model configured with a thermal load duration of up to one hour. The model simulates temperature distribution and deformation in concrete and steel components under a combined thermo-mechanical load, with specific emphasis on calculating deformation rates that correlate with the formation of through cracks. The research employs both the Drucker-Prager and William-Warnke strength theories, though the William-Warnke model is found to be more effective for brittle materials such as concrete due to its ability to predict nonlinear crack development accurately.

A significant aspect of the methodology is the progressive removal of finite elements representing failed areas in the concrete matrix, indicating the progression of structural failure. The study concludes that a concrete slab loses its fire resistance once through cracks are large enough to compromise integrity and allow the spread of dangerous fire byproducts. This finding underscores the importance of considering both the loss of load-bearing capacity and structural integrity when evaluating fire resistance.

This new assessment approach is valuable for designing safer buildings, as it enables a more precise prediction of fire resistance limits in hollow concrete slabs and supports improvements in fire safety measures. The research, therefore, not only advances understanding in fire-resistant construction materials but also contributes to the broader goal of enhancing public safety in building design and emergency response.

Key words: fire resistance, integrity, hollow plate, combustion products, through cracks, finite element model.