

*А. А. Ренкас**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАГАТОПУСТОТНИХ ПЛИТ ПЕРЕКРИТТЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЛИСТОВИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вступ. Проведено аналіз світового досвіду щодо забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття. Для вогнезахисту будівельних конструкцій використовуються різноманітні вогнезахисні покриття та матеріали. Проаналізовано основні методи та припущення, що використовуються для розв'язання теплової задачі розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Проблемою при вирішенні теплотехнічної задачі розрахунку вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття є урахування нелінійності теплофізичних властивостей матеріалів та променевого теплообміну в пустотах.

Метою роботи є встановити розподіл температури в залізобетонній багатопустотній плиті перекриття з урахуванням теплообміну в пустотах плити у разі пожежі в приміщенні за номінального температурного режиму та обґрунтувати можливість встановлення підвісних стель із застосуванням гіпсокартонних плит для забезпечення вогнестійкості залізобетонного міжповерхового перекриття.

Опис матеріалу. Здійснено моделювання процесу теплопровідності в залізобетонних плитах перекриття, теплообміну між середовищем та плитою, а також теплообміну в пустотах цієї плити. Використовуючи метод кінцевих елементів розраховано температурні поля в залізобетонних багатопустотних плитах перекриття з урахуванням нелінійності теплофізичних властивостей бетону та променевого теплообміну в пустотах цих плит за умов номінального температурного режиму пожежі. Крім цього, проведено чисельний експеримент для визначення температурних полів в залізобетонних багатопустотних плитах перекриття та гіпсокартонних плитах при їх встановленні в якості підвісних стель.

Наукова новизна. Теоретично обґрунтовано можливість застосування листових будівельних матеріалів для захисту залізобетонних багатопустотних плит перекриття з урахуванням нелінійності теплофізичних параметрів бетону, променевого теплообміну між листовими будівельними матеріалами та поверхнею залізобетонної плити перекриття, а також променевого теплообміну в пустотах залізобетонної плити перекриття.

Результати свідчать про те, що у разі захисту залізобетонних плит перекриття гіпсокартонними листами, швидкість прогрівання елементів залізобетонної плити до критичних температур буде відбуватись повільніше, навіть у разі руйнування гіпсокартонних плит, що у свою чергу дає змогу збільшити час настання граничних станів в залізобетонній плиті перекриття на 20,4 %.

Ключові слова: ступінь вогнестійкості, залізобетонні багатопустотні плити перекриття, гіпсокартонний лист, номінальний температурний режим.

Вступ. Для вогнезахисту будівельних конструкцій використовуються різноманітні вогнезахисні покриття та матеріали. Вартість та ефективність цих покриттів та матеріалів має досить широкий спектр. З метою забезпечення вогнестійкості залізобетонних плит перекриття у приміщеннях житлових будинків можливе застосування загально використовуваних будівельних матеріалів із відповідними параметрами. Проблемою при визначенні цих параметрів є вирішення теплотехнічної задачі розрахунку вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття з урахуванням нелінійності теплофізичних властивостей матеріалів. Крім цього, наявність променевого теплообміну в пустотах залізобетонної багатопустотної плити перекриття суттєво впливає на розподіл температур в перері-

зі цієї плити. Влаштування гіпсокартонних плит під міжповерховим перекриттям будівель створює додаткові труднощі при розрахунку температурних полів в будівельних конструкціях.

Основні положення для розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій наведені в національному стандарті [1]. Цей стандарт наводить основні температурні режими, що впливають на конструкції під час пожежі та згідно з яким проводиться розрахунок вогнестійкості, а також основні засади та показники теплообміну між середовищем та конструкцією. Основні нелінійні теплофізичні властивості бетону, а саме залежність коефіцієнта теплопровідності, питомої теплоємності та густини бетону від температури наведено в національному стандарті [2]. Ці дані необхідно використовувати при розробці

математичних методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій [3]. Моделювання теплового стану залізобетонних багатопустотних плит перекриття з нанесеним вогнезахисним покриттям розглянуто в статті [4]. Проте у цій статті для розрахунку температурних полів розглядалась одновимірна задача теплопровідності та враховувався ідеальний тепловий контакт між шарами конструкції. У випадку розміщення підвісної стелі між перекриттям та гіпсокартонним листом знаходиться шар повітря, тому необхідно враховувати теплообмін між двома поверхнями. У дослідженнях [5] для розрахунку температурних полів та розрахунку вогнестійкості залізобетонної багатопустотної плити перекриття її переріз приводився до двотаврової балки. У роботі [6] за результатами проведеного аналітичного моделювання, встановлено, що залізобетонні багатопустотні плити перекриття при прогріванні внаслідок пожежі мають набагато вищий температурний градієнт, ніж монолітна бетонна конструкція. Це в свою чергу призводить до більш швидкої втрати зусилля поперечного напруження у поперечному перерізі, ніж в монолітній залізобетонній плиті. Тому необхідно розглядати різні можливості для вогнезахисту плит, що мають пустоти. Авторами досліджень температурних режимів пожежі в житлових будівлях [7] встановлено, що протяжність та температурний режим реальних пожеж набагато вищі за параметричні режими пожеж, а отже і час настання граничних станів у залізобетонних конструкціях менший. Це ще раз доводить необхідність захисту залізобетонних конструкцій житлових будівель від пожежі. Використання листових матеріалів для захисту цих конструкцій, зокрема, кальцієво-силікатних та вермікулітових плит, розглянуто в роботі [8]. Автори запропонували захищати елементи кріплення цих плит для запобігання їх руйнуванню. Автори праці [9] обґрунтували застосування полімерних покриттів для захисту бетону та встановили, що концентрації продуктів його розкладу не є небезпечним для людей. Використання гіпсових листів для захисту конструкцій досліджено в роботі [10] для сталевих конструкцій. При цьому гіпсовий лист прилягає до захищеної конструкції. Для дослідження можливості захисту залізобетонних багатопустотних плит перекриття гіпсокартон-

ним листами необхідно врахувати теплообмін між листом та плитою, а також вплив на розподіл температури пустот в плитках.

Мета досліджень. Встановити розподіл температури в залізобетонній багатопустотній плиті перекриття з урахуванням теплообміну в пустотах плити у разі пожежі в приміщенні за номінального температурного режиму. Обґрунтувати можливість застосування підвісних стель із застосуванням гіпсокартонних плит для забезпечення вогнестійкості залізобетонного міжповерхового перекриття.

Виклад матеріалу. Розглянемо багатопустотну залізобетонну плиту перекриття в перерізі у площині $(x; y)$, що рівномірно нагрівається при пожежі по поверхні $x=0$ для $0 \leq y \leq b$; $T_m(y) = \text{const}$ (рис. 1). Необхідно розглядати двовимірну задачу теплопровідності, оскільки в перерізі плити є отвори, у яких теплообмін відбувається випромінюванням у замкнутій системі. Для розрахунку температури середовища в процесі пожежі в приміщенні, $T_m = f(\tau)$, враховано номінальний температурний режим пожежі згідно з [1].

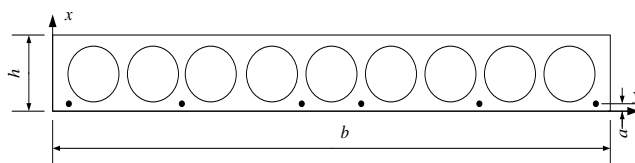


Рисунок 1 – Багатопустотна залізобетонна плита перекриття, що рівномірно нагрівається по всій поверхні під час пожежі в приміщенні

На поверхні, яка нагрівається, $(x=0; 0 \leq y \leq b)$ відбувається конвенційний та променевий теплообмін між середовищем та плитою. Бокові поверхні $(0 \leq x \leq h; y=0; y=b)$ вважаємо ізольованими, тобто теплообмін з навколишнім середовищем відсутній. На поверхні, що не нагрівається пожежею, відбувається конвекційний теплообмін з навколишнім середовищем.

Запишемо двовимірне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \rho(T) \cdot c(T) = \lambda(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

Граничні умови для плити, що нагрівається знизу, запишуться так:

$$y=0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad T > 0; \quad y=b, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad T > 0;$$

$$x=0, \quad -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 \cdot (T_m(\tau) - T(0, y, \tau)) + \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot ((T_m(\tau))^4 - (T(0, y, \tau))^4), \quad T > 0; \quad (2)$$

$$x=h, \quad \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 \cdot (T_0 - T(h, y, \tau)), \quad T > 0,$$

де $T(0, \tau)$ – температура поверхні конструкції, що нагрівається, К; $T_m(\tau)$ – зміна температури середовища з часом, К; α_1 – коефіцієнт теплообміну між середовищем в приміщенні при пожежі та поверхнею, що нагрівається, $\alpha_1=35$ Вт/(м²·К) для реальної пожежі, $\alpha_1=25$ Вт/(м²·К) для номінального температурного режиму [1]; α_2 – коефіцієнт теплообміну між середовищем та поверхнею, що не нагрівається, $\alpha_2=9$ Вт/(м²·К) [1]; σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴; ε_1 – приведений ступінь чорноти системи «середовище-поверхня конструкції, що нагрівається», $\varepsilon_1=0,56$ [2]; де $c(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ – залежність питомої теплоємності, густини та коефіцієнта теплопровідності від температури, Дж/(кг·К), кг/м³, Вт/(м·К) відповідно.

В отворах відбувається теплообмін випромінюванням, оскільки частки конвекційного теплообміну та теплообміну теплопровідністю настільки незначні, що ними можна знехтувати. Отвір в залізобетонній плиті перекрыття розглядається як замкнута система. Для розрахунку температурного поля в багатопустотній залізобетонній плиті перекрыття необхідно розглянути двовимірне рівняння теплопровідності (1) з граничними умовами (2). Крім цього, необхідно розглядати теплообмін в пустотах. Граничні умови в пустотах можна представити як теплообмін випромінюванням в замкнутій системі (рис. 2).

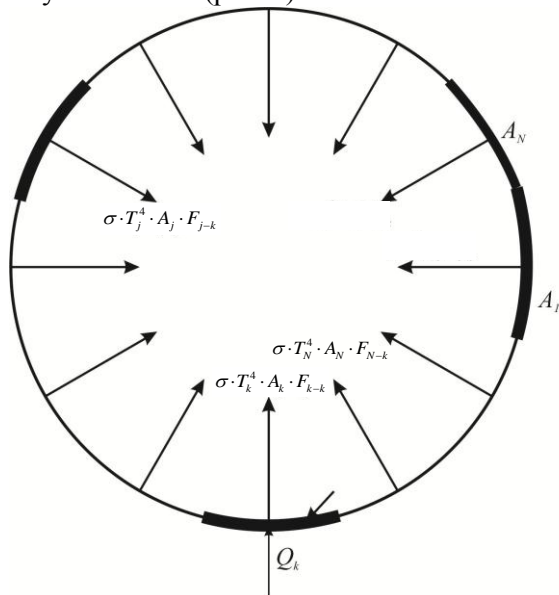


Рисунок 2 – Теплообмін випромінюванням в замкнутій системі

Для замкнutoї системи умову теплового балансу запишемо так:

$$Q_k = \sigma \cdot T_k^4 \cdot A_k - \sum_{j=1}^N \sigma \cdot T_j^4 \cdot A_j \cdot F_{j-k}, \quad (3)$$

де A_k , A_j – площі поверхонь замкнutoї системи (у нашому випадку всі однакові), м²; F_{j-k} – кутовий коефіцієнт від j -ої поверхні до k -ої; N – кількість секторів, на які розбите коло; T_k – температура в точці k , К; T_j – температура в точках j , К.

Оскільки k -а поверхня увігнута, то необхідно враховувати потік від k -ої поверхні також. Сума всіх кутових коефіцієнтів повинна дорівнювати 1.

Тоді залежність (4) напишемо:

$$Q_k = \sigma \cdot A_k \cdot \sum_{j=1}^N (T_k^4 - T_j^4) \cdot F_{j-k}. \quad (4)$$

Кутові коефіцієнти F_{j-k} визначені методом натягнутих ниток Хоттеля [11]. Кутовий коефіцієнт буде дорівнювати

$$F_{j-k} = \frac{N \cdot \left(2 \sin \frac{\beta - \gamma}{2} - \sin \frac{\beta}{2} - \sin \frac{\beta - 2\gamma}{2} \right)}{2 \cdot \pi}. \quad (5)$$

де N – кількість секторів, на які розбите коло; β – між радіусами кожного сектора; γ – кут, що дорівнює сумі k -го, j -ого секторів та кута між цими секторами.

Кут β змінюється від 2γ до 360° . Визначимо кутовий коефіцієнт F_{k-k} , оскільки площа k є увігнута.

$$F_{k-k} = \frac{\pi - N \sin \frac{\gamma}{2}}{\pi} \quad (6)$$

Для визначення температури на поверхні замкнutoї системи розв'яжемо систему алгебраїчних рівнянь, що складається з квадрата кількості секторів (N^2).

Для прикладу розглянемо багатопустотну залізобетонну плиту перекрыття ПК 63.18-6. Розміри плити такі: довжина – 6280 мм; ширина – 1790 мм; товщина – 220 мм; 9 отворів діаметром 159 мм. Інші розміри наведені на рис. 3. Бетон важкий на гранітному заповненні С25/30. Армура стальна: 6 шт. класу А500С, діаметром 12 мм.

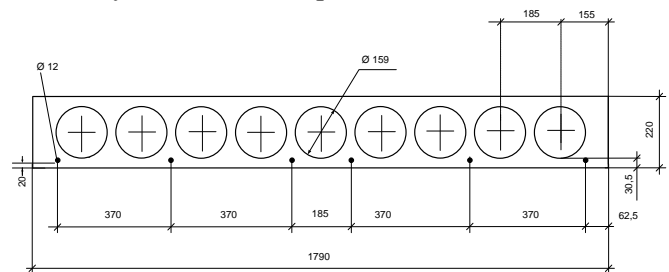
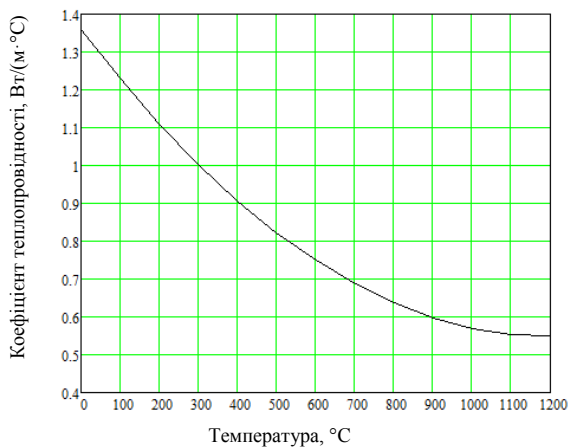
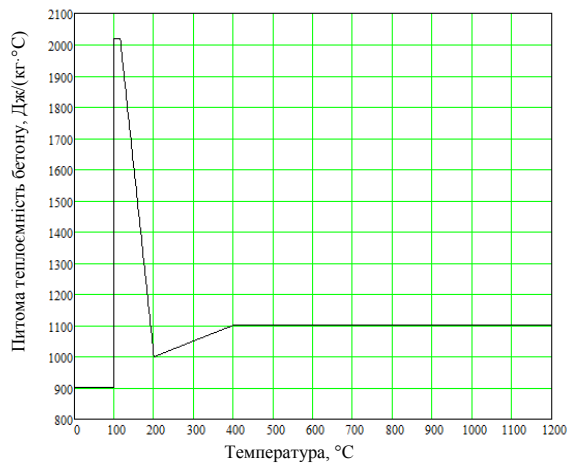


Рисунок 3 – Геометричні розміри залізобетонної плити перекрыття ПК 63.18-6

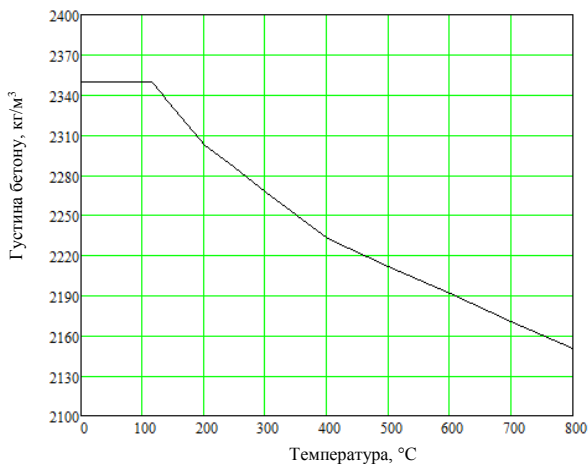
Залежність теплофізичних параметрів бетону від температури [2] наведено на рис. 4.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Залежність теплофізичних параметрів бетону від температури:
а) коефіцієнта теплопровідності; б) питомої теплоємності; в) густини

Розрахунок проводився методом кінцевих елементів. Результати розрахунку температурних полів в багатопустотній залізобетонній плиті перекриття при пожежі в приміщенні за номінального температурного режиму:
 $T_m(\tau) = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + T_0$, наведені на рис. 5.

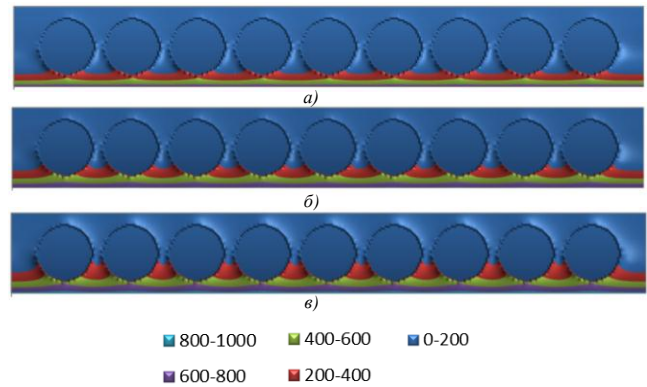


Рисунок 5 – Розподіл температурних полів в залізобетонній плиті:
а) на 30 хв пожежі; б) на 45 хв; в) на 60 хв

За результатами розрахунку встановлено, що температура в зоні розміщення арматури в залізобетонній плиті перекриття на 30-й хв становитиме 351 °С, на 45 хв – 471 °С, на 60-й хв – 565 °С. До критичної температури плита в зоні розміщення арматури 500 °С прогривається на 49-й хв.

У разі встановлення під перекриттям підвісної стелі з гіпсокартонних плит необхідно записати додатково рівняння теплопровідності для цієї плити, а також ще дві граничні умови, а саме: на поверхні гіпсокартонної плити, що не нагрівається, та на нижній поверхні залізобетонної плити. Між цими поверхнями відбуватиметься променевий теплообмін. Схема розміщення та нагрівання плит наведена на рис. 6.

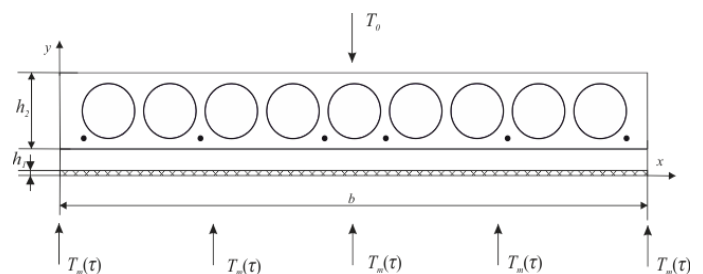


Рисунок 6 – Схема розміщення та нагрівання плит

Для розрахунку приймаємо, що гіпсокартонний лист має товщину 12,5 мм. Відстань від гіпсокартону до плити становить 140 мм. Час втрати несучої здатності звичайного гіпсокартонного листа залежатиме від часу прогрівання його стисненої зони до температури 400 °С, після чого лист руйнується, а для залізобетонної плити розглядається рівняння теплопровідності (1) з граничними умовами (2). Вигляд температурних полів наведено на рис. 7.

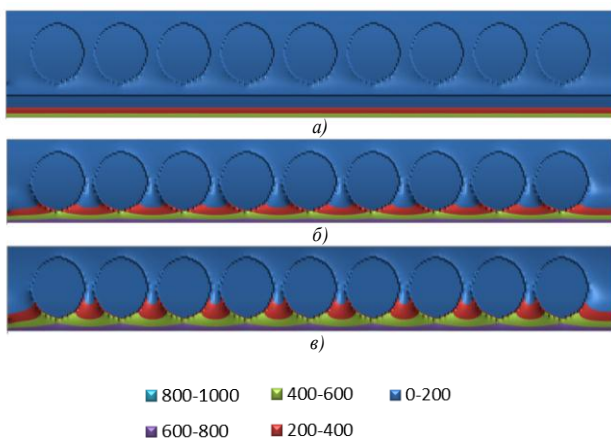


Рисунок 7 – Розподіл температурних полів в залізобетонній та гіпсокартонній плитах:
а) на 30 хв пожежі; б) на 45 хв; в) на 60 хв

Як бачимо з рисунка 7, прогрівання гіпсокартонної плити до критичної температури 400 °С настає на 30-й хв пожежі за номінальним температурним режимом. Після цього залізобетонна плита перекриття нагрівається безпосередньо від середовища приміщення, де виникла пожежа. Таким чином, температура в зоні розміщення арматури в залізобетонній плиті перекриття на 30-й хв становитиме 76 °С, на 45-й хв – 365 °С, на 60-й хв – 511 °С. До критичної температури плита в зоні розміщення арматури 500 °С прогривається на 59-й хв, тобто продовжує час втрати несучої здатності на 20,4%.

Висновок. Теоретично розраховано температурні поля в багатопустотній залізобетонній плиті перекриття у разі пожежі за номінальним температурним режимом з урахуванням променевого теплообміну в пустотах та з урахуванням нелінійності теплофізичних параметрів бетону. Теоретично обґрунтовано можливість застосування гіпсокартонних плит якості підвісних стель для захисту залізобетонних плит перекриття. Встановлено, що у разі влаштування таких плит на 30-й хв умовної пожежі можливе її руйнування, проте надалі при прогріванні залізобетонної плити перекриття критична температура на несучих елементах конструкції (арматура та стиснута зона бетону) досягається на 59-й хв.

Список літератури:

1. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. [Чинний від 2014-07-01]. Київ, 2012. 59 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість. [Чинний від 2014-07-01]. Київ, 2013. 140 с.

3. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Київ, 2017. 39 с.

4. Круковский П.Г., Ковалев А.И., Черненко К.А., Метель М.А., Абрамов А.А. Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия. Пожежна безпека. Львів, 2012. Випуск № 21. С. 85-94.

5. Chang, J., Buchanan, A. H., Dhakal, R. P., & Moss, P. J. Hollow-core concrete slabs exposed to fire. *Fire and Materials: An International Journal*. 2008. Vol. 32(6). P. 321-331.

6. David Lange, Robert Jansson McNamee. Modelling of hollow core concrete construction exposed to fire: Fire Research SP Report. Borås, 2016. P. 58.

7. Tad-Song Khoa, Florian M. Blockb, Thomas G. Lowrya. Determining the fire rating of concrete structures. Applications of Structural Fire Engineering. Dubrovnik, Croatia, 2016. Vol. 52. P. 58-63.

8. Cristina López, João P. Firmo, João R. Correia, Carlos Tiago. Fire protection systems for reinforced concrete slabs strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 324-333.

9. Yan Hao Ng, Anil Suri, Aravind Dasari, Kang Hai Tan. Thermal decomposition and fire response of non-halogenated polymer-based thermal coatings for concrete structures. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 320. P. 396-403.

10. M. Feng, Y. C. Wang, J.M. Davies. Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. *Fire Safety Journal*. 2003. Vol. 38 (4). P. 365-394.

11. Блох А.Г. Журавлев Ю.А., Рыжов Л.Н. Теплообмен излучением : справочник. Москва, 1991. 432 с.

References:

1. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Kyiv, 2012. P. 59.
2. DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Kyiv, 2013. P. 140.
3. DBN B.1.1-7:2016 Fire safety of buildings. General requirements. Kyiv, 2017. P. 39.
4. P.G. Krukovskii, A.I. Kovaliov, K.O. Chernenko, M.O. Metel, O.O. Abramov. Modelling of thermal state and fire-resistance quality of hollow core armoured concrete floors. *Fire safety*. Lviv, 2012. Vol. № 21. P. 85-94.
5. Chang, J., Buchanan, A. H., Dhakal, R. P., & Moss, P. J. Hollow-core concrete slabs exposed to fire. *Fire and Materials: An International Journal*. 2008. Vol. 32(6). P. 321-331.

6. David Lange, Robert Jansson McNamee. Modelling of hollow core concrete construction exposed to fire: Fire Research SP Report. Borås, 2016. P. 58.

7. Tad-Song Khoa, Florian M. Blockb, Thomas G. Lowrya. Determining the fire rating of concrete structures. Applications of Structural Fire Engineering. Dubrovnik, Croatia, 2016. Vol. 52. P. 58-63.

8. Cristina López, João P. Firmo, João R. Correia, Carlos Tiago .Fire protection systems for reinforced concrete slabs strengthened with CFRP laminates. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 324-333.

9. Yan Hao Ng, Anil Suri, Aravind Dasari, Kang Hai Tan. Thermal decomposition and fire response of non-halogenated polymer-based thermal coatings for concrete structures. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 320. P. 396-403.

10. M. Feng, Y. C. Wang, J.M. Davies. Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire. *Fire Safety Journal*. 2003. Vol. 38 (4). P. 365-394.

11. Bloh A.G., Zhuravlev Ya.A., Ryzhov L.N. Radiation Heat Transfer: A Handbook. Moscow, 1991. P. 432.

A. A. Renkas

FIRE RESISTANCE PROVIDING OF HOLLOW-CORE CONCRETE SLABS USING SHEET BUILDING MATERIALS

Introduction. This paper deals with the analysis of world experience in fire resistance providing of hollow-core concrete slabs. To protect concrete structures are used many structural applications: thermal coatings and materials. The research first analyzes main methods and hypothesis using to make temperature analysis of solution fire resistance of concrete structures. Problem of making temperature analysis of hollow-core concrete slabs are nonlinear thermal material properties and radiation heat transfer in the hollow-cores.

The aim of this paper is to establish the temperature distribution in hollow-core concrete slab considering radiation heat transfer in the hollow-cores in case of fire in compartment that is spreading by standard temperature-time curve. In addition, the aim is to substantiate the possibility of using gypsum panels to provide fire resistance of hollow-core concrete slabs.

Material statement. The paper reports the results of modeling the process of heat transfer in hollow-core concrete slab, between compartment space and slab surface and in hollow-cores. To calculate temperature fields in hollow-core concrete slab considering nonlinear thermal material properties and radiation heat transfer in the hollow-cores was used finite element model. At addition, the results of finite elements simulations show temperature fields in hollow-core concrete slab and gypsum panels that installed under concrete slab.

Scientific novelty. The paper reports results of theoretic substantiated of possibility of using gypsum panels to protect of hollow-core concrete slabs considering nonlinear thermal material properties, radiation heat transfer between surfaces and radiation heat transfer in the hollow-cores.

The results indicate that using gypsum panels to protect of hollow-core concrete slabs reduces speed heating of concrete elements to critical temperatures that increase fire resistance of hollow-core concrete slabs to 20.4 %.

Key words: fire resistance, hollow-core concrete slab, gypsum panel, standard temperature-time curve.