

УДК 614.841.332

*А. І. Ковальов, к.т.н., с.н.с., ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ,
Ю. А. Отрош, д.т.н., доцент, нач. каф., НУЦЗУ,
А. Г. Коссе, к.т.н., доцент, доц. каф., НУЦЗУ,
О. М. Черненко, к.мед.н., доцент, доц. каф.,
ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ*

ЗАЛЕЖНІСТЬ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ВІД ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ

(представлено д.т.н. Куценком Л. М.)

Наведено результати аналізу чутливості температури в точках вимірювання до параметрів моделі теплового стану багатопустотного залізобетонного перекриття з покриттям і без нього. Зроблено висновок про вплив коефіцієнта тепловіддачі від необігрівної бетонної поверхні перекриття в навколишнє середовище на точність визначення коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного штукатурного покриття.

Ключові слова: багатопустотні залізобетонні перекриття, аналіз чутливості, вогнезахисне покриття, теплофізичні характеристики, коефіцієнт тепловіддачі.

Постановка проблеми. Точність розрахунку теплового режиму багатопустотних залізобетонних перекриттів, як з вогнезахисними покриттями, так і без них, значною мірою визначається точністю завдання параметрів моделі, що забезпечує її адекватність реальним процесам теплообміну при випробуваннях таких конструкцій на вогнестійкість.

Серед параметрів моделі необхідно ідентифікувати ті, які є невідомими або недостатньо відомими і найбільш впливають на розрахункові значення температур обраної моделі. Процес визначення ступеня впливу параметрів моделі на вихідний результат (в нашому випадку температури) називається аналізом чутливості [1]. Тому і постає проблема щодо правильності задавання параметрів теплової моделі при моделюванні нестационарного прогріву залізобетонних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно з положеннями [2] при розрахунках коефіцієнт тепловіддачі між необігрівною поверхнею залізобетонної конструкції і навколишнім середовищем приймається рівним $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при температурі $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Це є усередненим значенням, що не враховує вологість бетону. Автор роботи [3] при дослідженні поведінки залізобетонної стіни в умовах пожежі за допомогою методу кінцевих елементів приймає коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні, що не обігривається, рівним $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ посилаючись на працю [2]. Автор роботи [4] також

використовує значення коефіцієнту тепловіддачі для розрахункового визначення меж вогнестійкості будівельних бетонних конструкцій рівним $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В роботі [5] для забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття застосовуються листові будівельні матеріали, а при моделюванні процесу теплопровідності в такій конструкції використовується такий параметр моделі, як коефіцієнт теплообміну між середовищем та поверхнею, що не обігрівається, рівний $9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Робота [6] присвячена дослідженню вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд. При цьому для дослідження впливу на значення межі вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд температурних режимів пожежі в математичних моделях використовується значення коефіцієнту тепловіддачі на необігрівній поверхні оправи приймати рівним $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Як бачимо з проведеного аналізу, немає однозначного визначення щодо задавання вказаного коефіцієнту при теплотехнічних розрахунках та моделюванні процесів теплообміну в залізобетонних конструкціях.

Як наслідок, на сьогоднішній день в роботах вчених залишилися поза увагою питання щодо визначення ступеня впливу коефіцієнта тепловіддачі між необігрівною поверхнею багатопустотного залізобетонного перекриття і навколишнім повітрям на точність визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного вогнезахисного покриття. Тому основна увага авторів спрямована на визначення цього впливу.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є дослідження точності визначення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів від параметрів моделі і впливу коефіцієнта тепловіддачі між необігрівною поверхнею багатопустотного залізобетонного перекриття і навколишнім повітрям на точність визначення коефіцієнта теплопровідності штукатурного вогнезахисного покриття (на прикладі покриття «Ендотерм 210104»).

В якості коефіцієнта чутливості (1) вибрано відношення величини середньоквадратичного відхилення температур до відносного значення зміни аналізованого параметра моделі P_i :

$$F_i = \frac{\Phi}{\Delta P_i / P_i}, \quad (1)$$

де Φ – середньоквадратичне відхилення температури в часі; ΔP_i – величина відхилення i -го параметра відносно його значення P_i .

Методика аналізу чутливості, докладно описана в [1], полягає в послідовному збуренні параметрів моделі, ідентифікації теплофізичних характеристик і розв'язанні серії прямих задач теплопровідності для отримання значень середньоквадратичного відхилення температури в часі і безпосередньому розрахунку коефіцієнтів чутливості F (1).

Табл. 1. Чутливість температур в точках вимірювання до параметрів моделі теплопровідності плити перекриття без штукатурного покриття

№	Назва параметру	Величина F_i
1	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5	13,16
2	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2	9,54
3	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2 при 0 °С	8,78
4	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5 при 500 °С	7,4
5	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шару 2	5,26
6	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5 при 0 °С	4,4
7	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5	3,4
8	Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні перекриття, що не обігрівається, в повітря α_{c2}	2,64
9	Ступінь чорноти бетону	1,68
10	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2 при 500 °С	1,06
11	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2 при 1200 °С	0,4
12	Коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до поверхні бетону, що нагрівається α_{c1}	0,28
13	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5 при 1200 °С	0,06

В табл. 1 в порядку убутання представлений кількісний вплив різних параметрів моделі на температури у залізобетонному перекритті без штукатурного покриття в точках вимірювання. Встановлено, що найбільш впливаючими параметрами моделі є: коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5 і коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2. Також визначалася локальна чутливість по вузлах сплайна для плити перекриття без штукатурного покриття. Найбільший вплив мають коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2 при 0 °С і коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ в шарах 1, 3, 5 при 500 °С.

У табл. 2 в порядку убутання представлений кількісний вплив різних параметрів моделі на температури у залізобетонному перекритті з штукатурним покриттям в точках вимірювання. Встановлено, що параметрами, які найбільше впливають на точність визначення параметрів

моделі ϵ : коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття і питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5.

Табл. 2. Чутливість температур в точках вимірювання до параметрів моделі теплопровідності плити перекриття з штукатурним покриттям

№	Назва параметру	Величина F_i
1	Коефіцієнт теплопровідності λ штукатурного покриття	4,72
2	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шарів 1, 3, 5	2,7
3	Питома об'ємна теплоємність бетону C_V шару 2	1,94
4	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шарів 1, 3, 5	0,26
5	Коефіцієнт тепловіддачі від поверхні перекриття, що не обігрівається, в повітря α_{c2}	0,22
6	Коефіцієнт теплопровідності бетону плити λ шару 2	0,2
7	Питома об'ємна теплоємність штукатурного покриття C_V	0
8	Ступінь чорноти бетону	0
9	Коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до поверхні вогнезахисного покриття, що нагрівається α_{c1}	0

Ці результати дозволили визначити перелік параметрів моделі, які необхідно розраховувати за допомогою обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість.

Було вибрано одновимірну математичну модель теплового стану залізобетонного перекриття з розбивкою плити на 6 шарів (рис. 1) [7].

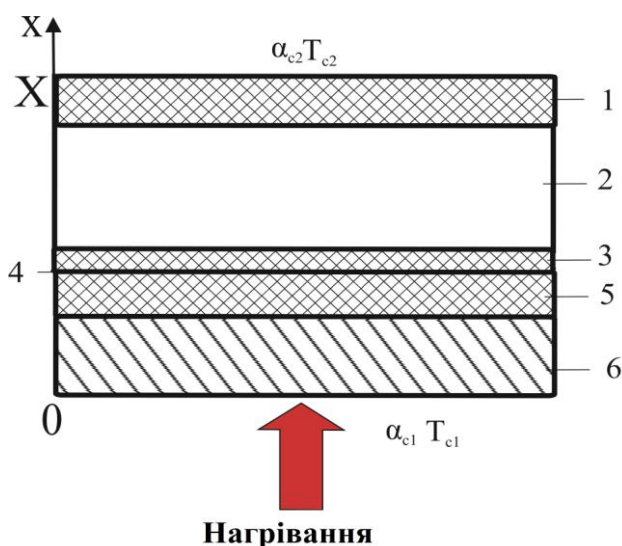


Рис. 1. Схема багатопустотного залізобетонного перекриття в одновимірній постановці: 1 – шар суцільного бетону між необігрівною поверхнею і шаром з пустотами перекриття; 2 – шар з пустотами; 3 – шар суцільного бетону між пустотами і арматурою; 4 – шар арматури; 5 – шар суцільного бетону від арматури до поверхні, що обігрівається; 6 – штукатурне покриття

Математична модель процесу теплопровідності в такій шестишаровій системі в декартовій системі координат, яка описує розглянуту вище фізичну модель (рис. 1), багаторазово описана в літературі [8–9] і являє собою одновимірне рівняння теплопровідності з комбінацією променистого теплообміну і граничними умовами III-го роду на поверхні, що обігривається і граничними умовами III-го роду на необігрівній поверхні, що враховує температуру навколишнього середовища.

Розподіл температури T в перекритті і вогнезахисному покритті описується системою рівнянь:

$$c_v(x, T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\lambda_{ВП} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \alpha^* [T_{C1}(\tau) - T(0, \tau)], \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_{c1} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{C1}(\tau) - T(0, \tau)} \left\{ \left[\frac{T_{C1}(\tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T(0, \tau)}{100} \right]^4 \right\}, \quad (4)$$

$$\lambda_B \frac{\partial T(X, \tau)}{\partial x} = \alpha^{**} [T(X, \tau) - T_{C2}], \quad (5)$$

$$\alpha^{**} = \alpha_{c2} + \frac{C_0 \varepsilon}{T(X, \tau) - T_{C2}(\tau)} \left\{ \left[\frac{T(X, \tau)}{100} \right]^4 - \left[\frac{T_{C2}(\tau)}{100} \right]^4 \right\} \alpha_{c2} = A [T(X, \tau) - T_{C2}(\tau)]^{0,33}, \quad (6)$$

де C_v – питома об'ємна теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; T – температура; τ – час; x – координата; α_{c1} – коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до поверхні вогнезахисного покриття (ВП) або бетону, що нагрівається; α_{c2} – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні перекриття, що не обігривається, в повітря; C_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла ($C_0 = 5,67$); ε – коефіцієнт випромінювання поверхні вогнезахисного покриття або бетону, що нагрівається; T_{c1} – температура гарячих газів у печі при випробуванні; T_0 – початкова температура перекриття перед випробуванням.

Коефіцієнт тепловіддачі від гарячих газів до поверхні вогнезахисного покриття (ВП) або бетону, що нагрівається α_{c1} приймається рівним $25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коефіцієнт випромінювання поверхні ВП або бетону, що нагрівається $\varepsilon = 0,7$. Коефіцієнт тепловіддачі між поверхнею перекриття, що не обігривається і навколишнім середовищем α^{**} (5)–(6) також враховує конвективний α_{c2} і радіаційний теплообмін від горизонтальної поверхні ($A = 1,16$) у навколишнє середовище. Багатошаровість розглянутої моделі враховується залежностями C_v і λ від координати.

Система рівнянь (2)–(6) вирішувалася чисельно методом кінцевих різниць за допомогою розв'язання обернених задач теплопровідності

(ОЗТ) за даними випробувань на вогнестійкість, з коефіцієнтом тепловіддачі α_{c2} , який задавали в межах 3-9 Вт/(м²·К), а також залежним від температури. В результаті були отримані залежності ефективного коефіцієнта теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням ОЗТ за даними випробувань на вогнестійкість (рис. 2).

Як видно з рис. 2, зі збільшенням коефіцієнту тепловіддачі з необігрівної поверхні залізобетонного перекриття з покриттям, похибка визначення коефіцієнту теплопровідності збільшується і становить 25% (для $\alpha_{c2} = 9$). Також встановлено, що цьому коефіцієнту потрібно приділяти особливу увагу, і найбільш правильний шлях – це задавати його таким, що залежить від температури (рис. 2, крива 1).

Значення цього параметра є визначальними при впливові на вогнестійкість досліджуваних багатопустотних залізобетонних перекриттів, оброблених вогнезахисними речовинами [10], отже, на рекомендації щодо точності визначення як теплофізичних характеристик, так і в подальшому характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів, що і становить часто кінцеву мету розрахунків теплових процесів, що відбуваються в залізобетонних перекриттях.

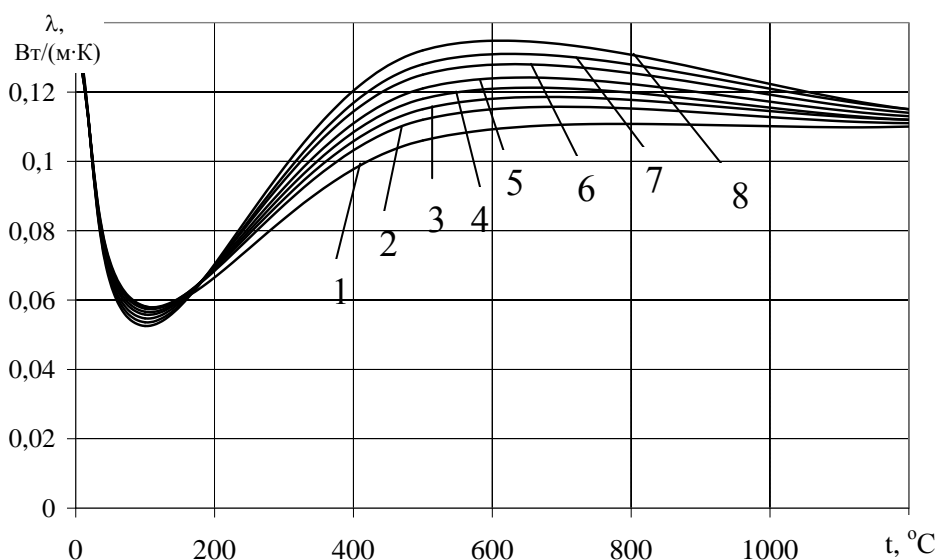


Рис. 2. Залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності штукатурного покриття від температури, знайденого розв'язанням ОЗТ за даними випробувань на вогнестійкість: 1 – при α_{c2} , що залежить від температури; 2 – $\alpha_{c2}=3$ Вт/(м²·К); 3 – $\alpha_{c2}=4$ Вт/(м²·К); 4 – $\alpha_{c2}=5$ Вт/(м²·К); 5 – $\alpha_{c2}=6$ Вт/(м²·К); 6 – $\alpha_{c2}=7$ Вт/(м²·К); 7 – $\alpha_{c2}=8$ Вт/(м²·К); 8 – $\alpha_{c2}=9$ Вт/(м²·К)

Висновки. На прикладі штукатурного вогнезахисного покриття «Ендотерм 210104» визначено ступінь впливу коефіцієнта тепловіддачі між необігрівною поверхнею багатопустотного залізобетонного перекриття і навколишнім повітрям на точність визначення коефіцієнта теплопровідності досліджуваного вогнезахисного покриття.

При цьому встановлено, що при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисених багатопустотних залізобетонних перекриттів, коефіцієнт

тепловіддачі між необігрівною поверхнею перекриття і навколишнім повітрям впливає на точність визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття (максимальна похибка до 25% при $\alpha_{c2} = 9$), тому його необхідно задавати таким, що залежить від температури [11–12].

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковалев А. И. Усовершенствование метода оценки огнестойкости покрытий железобетонных перекрытий: дисс. кандидата техн. наук: 21.06.02 / Ковалев Андрей Иванович. К., 2012. 163 с.

2. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design (Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций Часть 1 – 2: Общие положения Расчет огнестойкости конструкций).

3. Поздєєв С. В. Дослідження поведінки залізобетонної стіни в умовах пожежі за допомогою методу кінцевих елементів // Пожежна безпека: теорія і практика. 2014. № 17. С. 85–92.

4. Новак С. В. Диапазон изменения предела огнестойкости строительных бетонных конструкций при использовании расчетных методов, приведенных в Еврокоде 2 / С. В. Новак УкрНДПБ. 2014. № 2 (30). С. 63–69.

5. Ренкас А. А. Забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття із застосуванням листових будівельних матеріалів // Пожежна безпека. 2019. № 34. С. 72–77.

6. Якименко О. П. Підвищення вогнестійкості залізобетонних опор тунельних споруд: дис. кандидата техн. наук: 21.06.02. К., 2012. – 141 с.

7. A. I. Kovalov, Y. A. Otrosh, T. M. Kovalevska and S. O. Safronov. Methodology for assessment of the fire-resistant quality of reinforced-concrete floors protected by fire-retardant coatings. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 708 (2019) 012058. doi:10.1088/1757-899X/708/1/012058

8. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. E3S Web of Conferences, 60, 00003.

9. Ковалев А. И. Моделирование теплового состояния и огнестойкости многопустотного железобетонного перекрытия // Пожежна безпека: збірник наукових праць. 2012. № 21. С. 85–94.

10. Ковальов А. І., Отрош Ю. А., Данілін О. М. Експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних перекриттів з системою вогнезахисту. Проблеми пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Харьков, 2019. Вып. 45. С. 73–78.

11. Отрош Ю. А. Методика визначення технічного стану будівельних конструкцій виробничих будівель після пожежі. Збірник

наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків, 2016. №. 160. С. 111–119.

12. Голоднов О. І., Антошина Т. В., Отрош Ю. А. Про необхідність розрахунку будівель зі сталевим каркасом на температурні впливи. Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського. Київ, 2017. Вип. 20. С. 65–84.

А. И. Ковалев, Ю. А. Отрош, А. Г. Коссе, А. Н. Черненко

Зависимость точности определения теплофизических характеристик огнезащитных покрытий от параметров модели

В работе приведены результаты анализа чувствительности температуры в точках измерения до параметров модели теплового состояния Полые железобетонного перекрытия с покрытием и без него. Сделан вывод о влиянии коэффициента теплоотдачи от необогреваемой бетонной поверхности перекрытия в окружающую среду на точность определения коэффициента теплопроводности огнезащитного штукатурного покрытия.

Ключевые слова: многпустотные железобетонные перекрытия, анализ чувствительности, огнезащитное покрытие, теплофизические характеристики, коэффициент теплоотдачи.

A. Kovalov, Yu. Otrosh, A. Kosse, O. Chernenko

Dependence of the accuracy of determining the thermophysical characteristics of fire retardant coatings on the parameters of the model

The paper presents the results of temperature sensitivity analysis at the measurement points to the parameters of the model of the thermal state of a multi-hollow reinforced concrete floor with and without a coating. The conclusion about the influence of the heat transfer coefficient from the unheated concrete surface of the floor into the environment on the accuracy of determining the thermal conductivity coefficient of the fire - retardant plaster coating is made.

Keywords: multi-hollow reinforced concrete floors, sensitivity analysis, fire-retardant coating, thermophysical characteristics, heat transfer coefficient.