

*С.В. Поздєєв, к.т.н, доц., О.В. Некора, А.В. Поздєєв (Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобіля)*

## **ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕЖИМІВ НАГРІВУ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Обгрунтована методика визначення температурного режиму випробувань зразків з бетону для моделювання граничних станів елементів залізобетонних будівельних конструкцій при реалізації експериментально-розрахункового методу визначення їх вогнестійкості

Визначення меж вогнестійкості складних сучасних залізобетонних будівельних конструкцій пов'язане з проведенням досліджень, що орієнтовані на новітні наукові уявлення про поведінку елементів цих конструкцій в умовах комбінованої дії високотемпературного нагрівання при пожежі та механічному навантаженні. При цьому ефективним є застосування розрахункових методів механіки споруд, теплофізики та комп'ютерного моделювання [1-3].

На даному етапі для визначення вогнестійкості залізобетонних конструкцій у всьому світі найбільша перевага віддається натурним вогневим випробуванням [1-3]. Основним недоліком такого підходу є висока вартість та трудомісткість проведення експериментів. Крім того, даний підхід не завжди коректно застосовний для елементів конструкцій, розміри яких набагато більші за максимально можливі розміри натурних зразків. В цьому випадку для таких елементів необхідно застосовувати певні методики інтерпретації експериментальних даних, які ще недостатньо розроблені. При іншому підході застосовується розрахункові методи. Останні на даний час достатньо розвинуті і враховують всі найбільш виражені ефекти у бетоні конструкцій при їх нагріванні [3]. Ці методики, також, достатньо повно враховують характерні явища напружено-деформованого стану у бетоні при комбінованій дії нагріву та механічних навантажень. Але на застосування таких методик накладаються обмеження, обумовлені недостатнім вивченням основних базових характеристик та залежностей для нових матеріалів, а також великим розкидом значень цієї розрахункової бази у межах матеріалів одного класу.

На думку авторів альтернативою вказаним підходам є застосування розрахунково-експериментальних методів, які дозволяють врахувати феноменологію нагріву конкретного матеріалу, а також знизити вартість та трудомісткість випробувань [4].

В роботі [4] запропонована розрахунково-експериментальна методика визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних будівельних конструкцій. При застосуванні запропонованої методики поставлена мета, досягається створенням таких умов проведення експерименту. За допомогою розрахунку визначається режим прогріву суцільного бетонного зразка, що моделює відповідний внутрішній шар усередині реального стиснутого елемента, який нагрівається за стандартною температурною кривою пожежі. Розрахований режим реалізується за допомогою муфельної пічки. До зразка з боку гідравлічного преса прикладається зусилля, яке формує напруження, діюче у відповідному внутрішньому шарі елемента. Випробування проводиться протягом часу, що визначається нормованою межею вогнестійкості і припиняється у разі руйнації зразка. Зразки, що не зруйнувалися підлягають випробуванню на стискання на розривній машині чи пресові. Відповідність необхідному ступеню вогнестійкості визначається максимальною стискальною силою, що може витримати частина перерізу, яку моделюють незруйновані зразки, на основі їх випробувань.

Метою даної роботи є обґрунтування вибору режимів нагрівання бетонних зразків при реалізації вищевикладеного методу.

Для обчислення режимів необхідно вирішити пряму задачу теплопровідності (ПЗТ) з врахування характерних процесів, що протікають під час нагріву бетону. Для цього використовується рівняння теплопровідності Фур'є [1]:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

де  $\lambda(T)$ ,  $C_V(T)$  – теплофізичні характеристики (ТФХ) бетону, – відповідно коефіцієнт теплопровідності та об'ємна теплоємність, залежні від температури. Вони дозволяють врахувати характерні процеси під час нагріву бетону. Рівняння (1) називається двомірним квазілінійним рівнянням теплопровідності. При розрахунку застосовуються граничні умови (ГУ) III роду:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_p - T_w), \quad (2)$$

де  $T_p$  та  $T_w$  – температури середовища та поверхні колони,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, що визначається за формулою [1]:

$$\alpha_B = \frac{1}{\frac{1}{C_B} + \frac{1}{\varepsilon C_S} - \frac{1}{C_S}} \cdot \frac{\left[ \left( \frac{T_p + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_p - T_w} + 1.33 \sqrt{T_p - T_w} \quad (3)$$

де  $C_B$  – коефіцієнт випромінювання поверхні;  $C_S$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти оточуючого середовища. Температура пожежного середовища визначається за стандартною температурною кривою пожежі.

Для визначення ТФХ бетону використовувалася експериментально-розрахункова методика, що описана в [5, 6]. Методика полягає у рішенні оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ). ТФХ бетону, отримані при застосуванні цієї методики, представлені на рис. 1. та рис. 2.

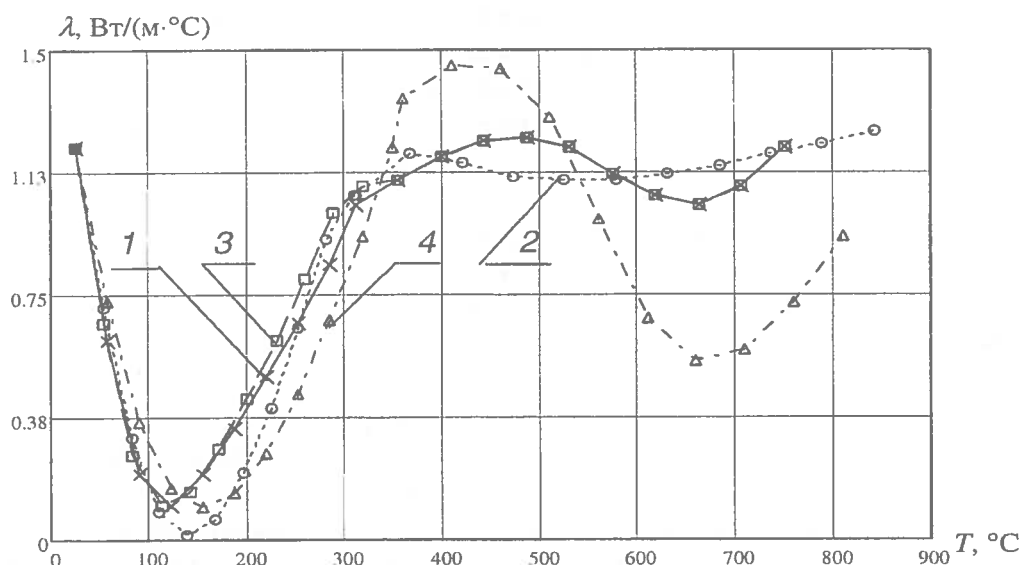


Рис. 1. Залежності коефіцієнта теплопровідності від температури для бетонних зразків  $\varnothing 100$  мм з В/Ц = 0.36:

1 – крупність заповнювача 30-40 мм 2 – крупність заповнювача 20-30 мм;  
3 – крупність заповнювача 10-20 мм; 4 – крупність заповнювача 5-10 мм.

Для отримання ТФХ проводився нагрів циліндричних зразків  $\varnothing 100$  мм із вимірюванням температур камери печі, поверхні та середини зразка за допомогою термопар. Рішення ОЗТ проводилося із застосуванням програми FRIEND [5]. Математична модель складалася з одномірного квазілінійного рівняння Фур'є у циліндричних координатах з ГУ I роду.

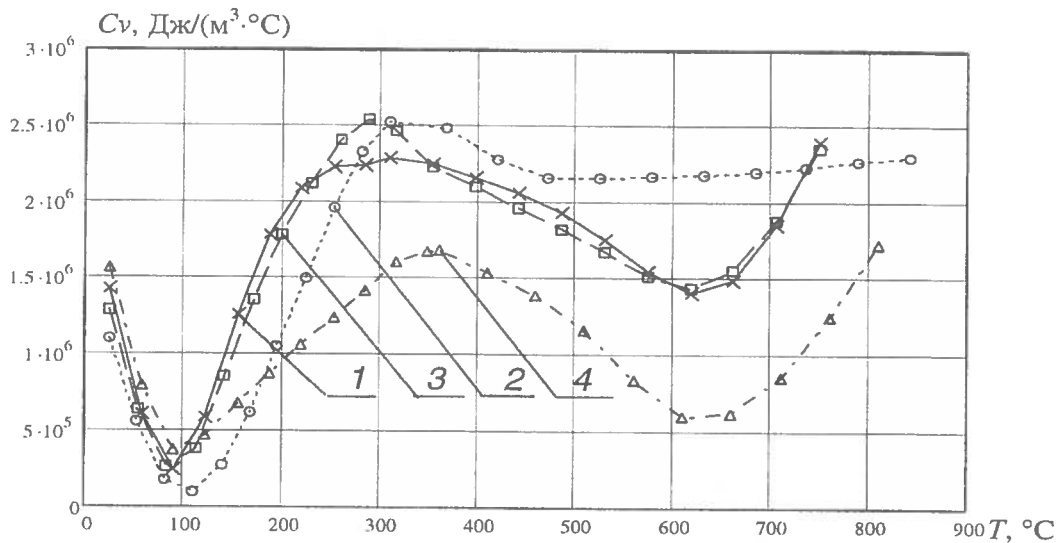


Рис. 2. Залежності об'ємної теплоємності від температури для бетонних зразків  $\varnothing 100$  мм з  $V/\Omega = 0.36$ :

1 – крупність заповнювача 30-40 мм 2 – крупність заповнювача 20-30 мм;  
3 – крупність заповнювача 10-20 мм; 4 – крупність заповнювача 5-10 мм.

Отримані залежності достатньо точно описують розподіл температур у бетоні під час нагріву, оскільки середньоквадратичне відхилення розрахункових даних від експериментальних становить всього 3-7 °С.

Визначені ТФХ дозволяють розв'язати рівняння (1). Рівняння (1) має тільки чисельний розв'язок. Для його розв'язання застосовуємо метод кінцевих різниць у сукупності з інтегро-інтерполяційним методом. Згідно з [7] можна використати кінцево-різницеву апроксимацію у вигляді:

$$A_{i,k} = B_{i,k} + C_{i,k}, \quad (4)$$

де

$$A_{i,k} = C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = C_v \left( \frac{T_{i,k} + T_{i,k+1}}{2} \right) \cdot \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t},$$

$$B_{i,k} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) = a_x T_{i-1,k}^x - (a_x + b_x) T_{i,k}^x + b_x T_{i+1,k}^x, \quad (5)$$

$$C_{i,k} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = a_y T_{i-1,k}^y - (a_y + b_y) T_{i,k}^y + b_y T_{i+1,k}^y.$$

Коефіцієнти рівняння визначаються за формулами інтегро-інтерполяційного методу

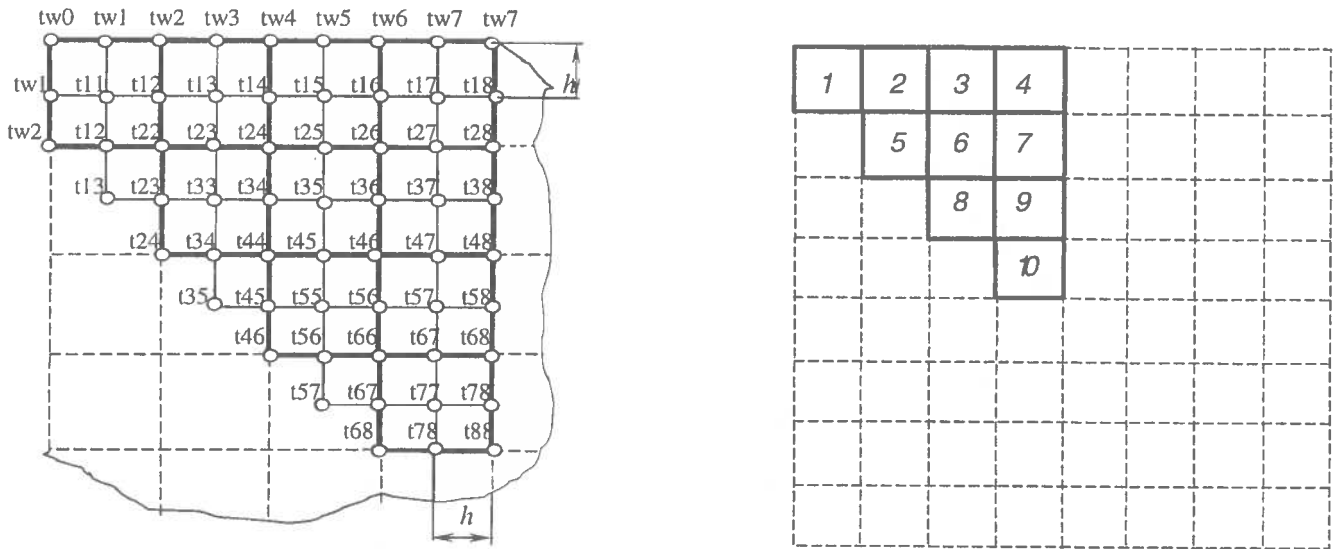
$$\frac{1}{a} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i-1}) + \lambda(T_i)) h^2}{\lambda(T_{i-1}) \lambda(T_i)}, \quad \frac{1}{b} = h \int_0^{\Delta h} \frac{dh}{\lambda(T)} = \frac{(\lambda(T_{i+1}) + \lambda(T_i)) h^2}{\lambda(T_{i+1}) \lambda(T_i)}. \quad (6)$$

У даних формулах  $h$  та  $\Delta t$  – кроки просторової та часової дискретизації. ГУ III роду апроксимується формулою:

$$\frac{\lambda(T_{w_k}) \lambda(T_{1,k})}{\lambda(T_{w_k}) + \lambda(T_{1,k})} \cdot \frac{T_{w_k} - T_{1,k}}{h} + \frac{h \cdot C_v(T_{1,k})}{2 \cdot \Delta t} \cdot (T_{1,k} - T_{1,k-1}) = \alpha_k (T_{1,k} - T_{p,k}). \quad (7)$$

Дані апроксимації проведені за явною схемою, згідно з якою на кожному часовому шарі вирішується нелінійне рівняння (4) для кожного просторового вузла перерізу колони.

Розрахунки проводилися для залізобетонної колони з важкого бетону на гранітному заповнювачі з використанням залежностей ТФХ від температури рис. 1 та рис. 2. Схема дискретизації перерізу колони подана на рис. 3. Будемо вважати, що колона обігривається з усіх боків рівномірно по всій висоті. З огляду на це достатньо розглянути лише 1/8 перерізу. Схема розташування шарів, що моделюються зразками для випробувань, подана на рис. 4. Розрахунковий алгоритм за формулами (4) – (7) реалізований у програмному середовищі Mathcad 13 Professional.



Результати розрахунку подані на рис. 5.

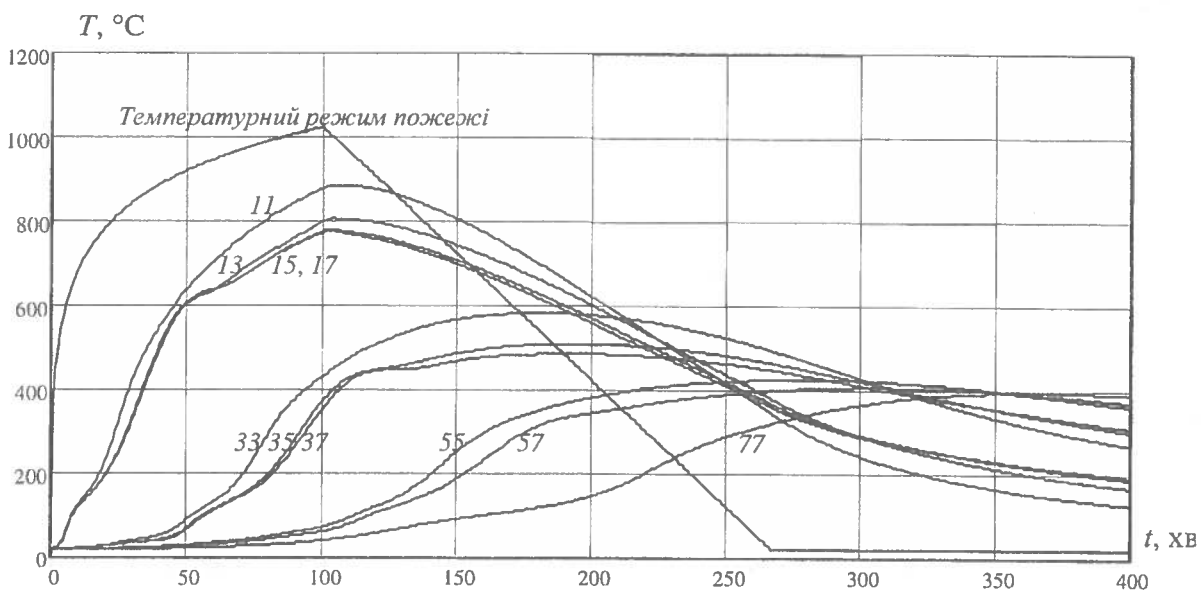


Рис. 5. Температурні криві прогріву серединних точок елементів, що моделюють поведінку внутрішніх шарів залізобетонної колони 400×400 (див. рис. 3), з максимальним розвитком пожежі на 100 хвилині.

Враховуючи специфіку експериментальної реалізації режимів прогріву зразків, необхідно забезпечити такий режим нагріву камери муфельної печі, щоб середина певного зразка нагрівалася за розрахованим для нього режимом у відповідності до рис. 4 та рис. 5. Для визначення режиму нагріву камери печі треба вирішити ОЗТ керування джерелами тепла. Задача вирішувалася у два етапи. На першому визначалися ГУ I роду, тобто зміна температури поверхні, яка забезпечує відповідний режим нагрівання середини зразка. На другому етапі відбувалося перерахування ГУ I роду тобто вирішувалася квазіобернена задача теплопровідності. Розрахунок на першому етапі проводився у такому порядку. На початку відповідна часова ділянка розбивається на дві у точці на 10 хв. раніше точки з найбільшим значенням  $\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ . Значення часу запізнення підбрано емпірично. Варіаціями підбиралися такі часові залежності температури поверхні, щоб досяг мінімуму цільовий функціонал:

$$\Phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{T_{Hi}^2 - T_{Pi}^2}, \quad (8)$$

де  $T_{Hi}$  – необхідне значення температури всередині зразка,  $T_{Pi}$  – розраховане значення температури усередині зразка у вузловій точці, відповідній певному часові. Математична модель описувалася одномірним квазілінійним рівнянням Фур'є у циліндричних координатах з ГУ I роду:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (9)$$

Для різницевої апроксимації за явною схемою використана підстановка Гудмена та інтегро-інтерполяційний метод:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right], \quad (10)$$

де  $H = \int_0^T C_V(T) dT$ ,  $k(H(T)) = \lambda(H(T)) / C_V(H(T))$ .

Тоді  $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{k,i+1} - H_{k,i}}{\Delta t}$ ,  $\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot k(H(T)) \cdot \frac{\partial H}{\partial r} \right] = \frac{1}{r_{k,i} \cdot \Delta r^2} (aT_{k,i-1} - (a+b)T_{k,i} + bT_{k,i+1})$ ,

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{r_{i-\frac{1}{2}}} \int_0^{\Delta r} \frac{dr}{k(H(T))} = \frac{(k(T_{i-1}) + k(T_i))\Delta r}{r_{i-\frac{1}{2}} k(T_{i-1})k(T_i)}, \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{r_{i+\frac{1}{2}}} \int_0^{\Delta r} \frac{dr}{k(H(T))} = \frac{(k(T_{i+1}) + k(T_i))\Delta r}{r_{i+\frac{1}{2}} k(T_{i+1})k(T_i)} \quad (11)$$

Після цього процедура розбиття отриманих ділянок повторювалася так само. Процес обчислювання продовжувався до тих пір поки середньоквадратичне відхилення (8) не досягало значення 1 °С. Результати розрахунку для зразка 1 (див. рис. 4) подані на рис. 6.

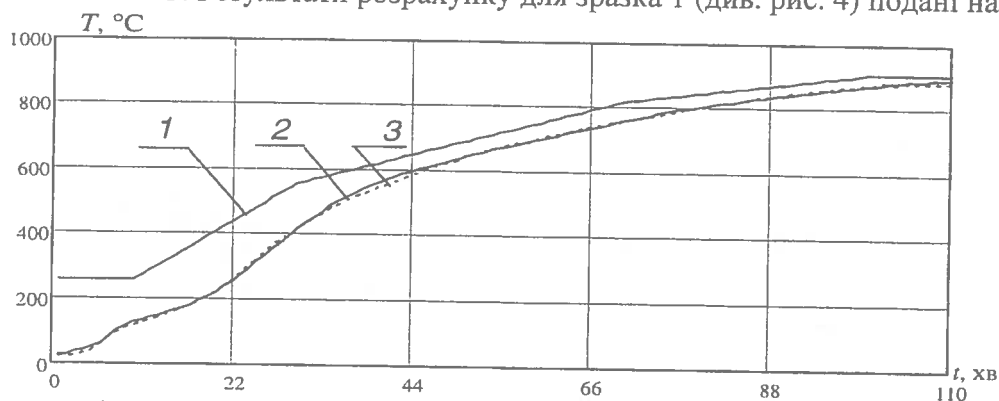


Рис. 6. Режим нагріву поверхні бетонного зразка  $\varnothing 56$  мм, для прогріву його середини за режимом, відповідним кривій 11 рис.3: 1 – розрахований режим нагріву поверхні; 2 – розрахований режим прогріву середини; 3 – режим прогріву, який необхідно забезпечити.

Для реалізації другого етапу розрахунків визначався коефіцієнт тепловіддачі, за результатами експериментів [6] та з використанням формули (7). Алгоритм був реалізований в програмному середовищі Mathcad 13 Professional. У результаті отримані подібні залежності для температури поверхні та температури камери печі, тому вирішено для розрахунків використовувати одну з них. Результати розрахунку подані на рис.7.

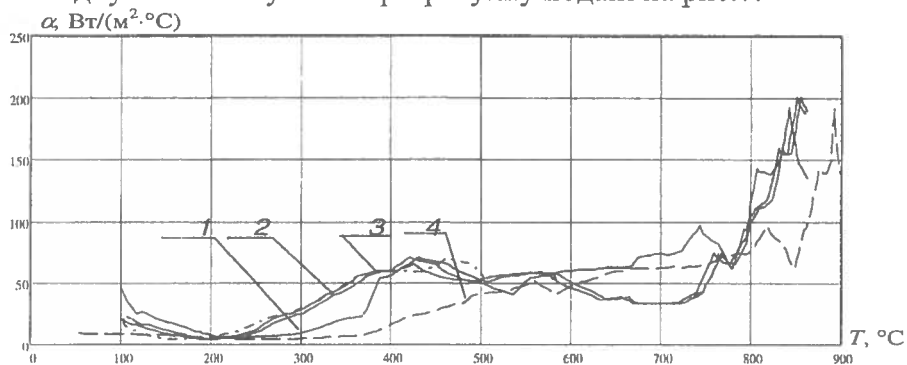


Рис. 7. Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури середовища для зразків із  $V/\Omega = 0.36$ :  
1 – крупність заповнювача 30-40 мм 2 – крупність заповнювача 20-30 мм;  
3 – крупність заповнювача 10-20 мм; 4 – крупність заповнювача 5-10 мм.

Для розрахунку використовувалася згладжена узагальнена сплайнова залежність коефіцієнта тепловіддачі, подана на рис. 9.

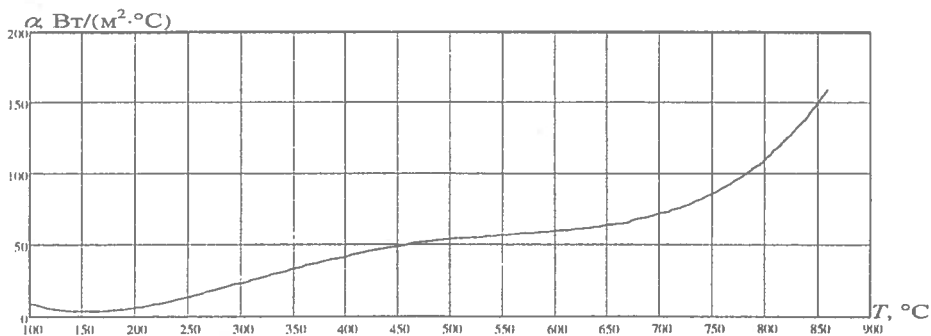


Рис. 9. Узагальнена залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури середовища.

Використовуючи отриману залежність, знаходимо режими для нагріву зразків при використанні розрахунково-експериментального методу визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних конструкцій. Режими нагріву деяких зразків подані у табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункові режими нагріву камери печі для зразків  $\varnothing 56$  мм

№ зразка відп. схемі на рис. 4.	Режим нагріву зразка	Максимальний розкид значень температури по перерізу зразка, °C	Середньоквадратичне відхилення від заданого режиму
1	2	3	4
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• нагрів камери до 305 °C, поміщення туди зразка та витримка 7 хв;</li> <li>• нагрів зі швидкістю 16 °C/хв 10 хв;</li> <li>• нагрів зі швидкістю 5 °C/ хв 38 хв;</li> <li>• нагрів зі швидкістю 3 °C/ хв 31 хв;</li> <li>• витримка при температурі 900 °C 14 хв;</li> <li>• охолодження.</li> </ul>	158	2

1	2	3	4
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● нагрів зі швидкістю 5 °С/хв 26 хв;</li> <li>● нагрів зі швидкістю 13 °С/хв 23 хв;</li> <li>● витримка при температурі 325 °С 13 хв;</li> <li>● витримка при температурі 470 °С 40 хв;</li> <li>● охолодження</li> </ul>	127	7
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● нагрів зі швидкістю 1 °С/хв 60 хв;</li> <li>● нагрів зі швидкістю 4 °С/хв 60 хв;</li> <li>● нагрів зі швидкістю 1 °С/хв 140 хв;</li> <li>● охолодження</li> </ul>	93	11
10	<ul style="list-style-type: none"> <li>● нагрів зі швидкістю 1 °С/хв 70 хв;</li> <li>● нагрів зі швидкістю 2 °С/хв 100 хв;</li> <li>● нагрів зі швидкістю 1 °С/хв 100 хв;</li> <li>● охолодження</li> </ul>	86	10

З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

- для знаходження режимів нагріву зразків використовуються попередньо визначені ТФХ бетону за допомогою розв'язку ОЗТ, оскільки розрахункові режими мають достатній ступінь правдоподібності і корелюють з експериментальними даними;
- при розв'язку ОЗТ керування розраховані режими нагріву для бетонних зразків при використанні розрахунково-експериментального методу визначення вогнестійкості стиснутих елементів залізобетонних конструкцій.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
2. Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий / Под общ. ред. В.А. Пчелинцева. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1970. – 262 с.
3. Страхов В.Л., Крутов, А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: Информационно-издательский центр «ТИМР», 2000. – 433 с.
4. Поздеев С.В., Григор'ян Б.Б., Поздеев А.В. Удосконалення експериментально-розрахункової методики визначення залишкової несучої здатності залізобетонних колон після пожежі. // Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Випуск 7(47). – 2005 р. – С. 133 – 143.
5. Круковский П.Г. Обратные задачи теплопереноса (Общий инженерный подход). – К.: НАНУ Институт технической теплофизики. 1998. – 224 с.
6. Поздеев С.В., Некора О.В., Поздеев А.В. Методика определения режимов нагрева бетонных образцов, моделирующих состояние элементов строительных конструкций при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: АГЗУ. – Выпуск 19. – 2006. – С. 111– 116.
7. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности в 2-х т.: т. 1. Методология. – Киев: Наукова думка. 2002. – 408 с.