

УДК 624.012

С.Д. Щіпець, О.В. Некора, к.т.н., с.н.с., М.О. Кропива, А.М. Омельченко,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РОБОТИ БЕТОНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ СТІНИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЇЇ ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

В статті наведені відомості щодо результатів ідентифікації коефіцієнту роботи бетону залізобетонної стіни за результатами її стандартних випробувань на вогнестійкість, що є частиною початкових даних для реалізації експериментально-розрахункового методу оцінки вогнестійкості несучих стін.

Ключові слова: вогнестійкість, «стандартна пожежа», залізобетонна стіна, коефіцієнт роботи бетону.

Випробування несучих стін на вогнестійкість відбувається у відповідності до чинних стандартів України [1, 2]. Згідно із цими стандартами фрагмент несучої стіни повинен бути підданий вогневій дії в умовах механічного навантаження, що має повністю відповідати діючому навантаженню у стіні згідно із розрахунковою схемою конструкції будівлі. Такі чинники створюються відповідними вузлами випробувальних установок, які поєднують вогневу піч із опорно-навантажувальною рамою, де встановлені гідравлічні домкрати. Наявні в Україні установки мають суттєве обмеження на величину механічного навантаження, яке має бути прикладене під час експерименту, – може бути забезпечений тиск не більше за 200 т/м^2 . Це значення може бути суттєво меншим за величину навантаження, які потрібно прикласти у відповідності до діючих навантажень. Тому випробування проводяться в умовах коли прикладаються суттєво менші навантаження, або взагалі не прикладається. Стандартами, чинними в Україні при випробуванні несучих стін на вогнестійкість [2, 3] дозволяються випробування з прикладанням значно менших навантажень або без їх прикладання, але в той же час означений стандарт не містить обґрунтованих методик визначення класу вогнестійкості несучих стін на основі таких випробувань.

Аналіз публікацій щодо розрахункових методів проектування несучих стін за умовою їх пожежної безпеки [1 – 3] показує що означені методи дають змогу комплексно врахувати всі перелічені особливості, якщо використати результати вимірювань при реалізації стандартних методик випробувань на вогнестійкість у якості початкових даних для розрахунку. Такими вихідними даними можуть бути розподілення температур у внутрішніх шарах несучих стін при їх нагріванні за стандартним температурним режимом пожежі, визначених за допомогою інтерполяції дискретних даних щодо температури, виміряних у відповідних контрольних точках.

У зв'язку з цим сформульована мета дослідження.

Постановка задачі та її розв'язання. Мета роботи полягає у ідентифікації залежності коефіцієнту роботи бетону залізобетонних несучих стін, за результатами вимірювань температури та переміщень стіни у контрольних точках, отриманих під час проведення стандартних випробувань на вогнестійкість, для подальшого використання в якості початкових даних розрахункової оцінки вогнестійкості шляхом вирішення міцнісної задачі.

Нами запропонований метод [4] визначення фактичної межі (ФМВ) вогнестійкості несучих будівельних конструкцій, що базується на розрахунковій інтерпретації їх вогневих випробувань без прикладання механічного навантаження. На рис. 1. подана схема реалізації даного методу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачу відновлення температурних полів у перерізі стінового фрагменту-зразку, підданого випробуванням на вогнестійкість та ідентифікації коефіцієнту роботи бетону як основного матеріалу стіни, за результатами локального вимірювання температури та переміщень у контрольних точках стіни згідно із відповідними стандартами.

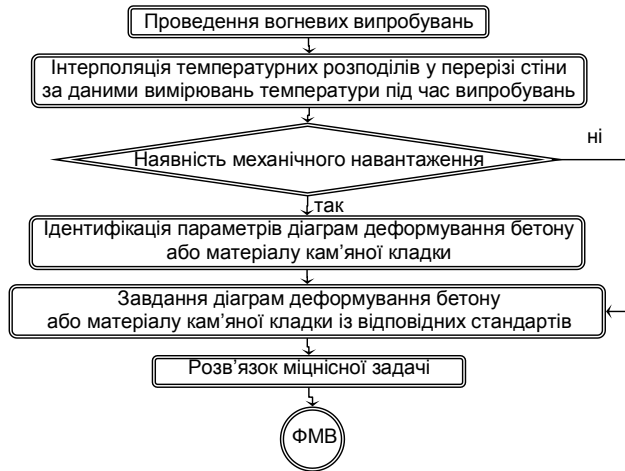


Рисунок. 1 – Схема здійснення оцінки вогнестійкості за допомогою інтерпретації результатів вогневих випробувань залізобетонних несучих стін.

При розробці метода ідентифікації коефіцієнтів роботи бетону в умовах його нагрівання була розглянута серійна залізобетонна стіна, що є поширеною для зведення ліфтових та вентиляційних шахт, тамбур-шлюзів. Для проведення випробувань схема вимірювання, яка подана на рис. 2.

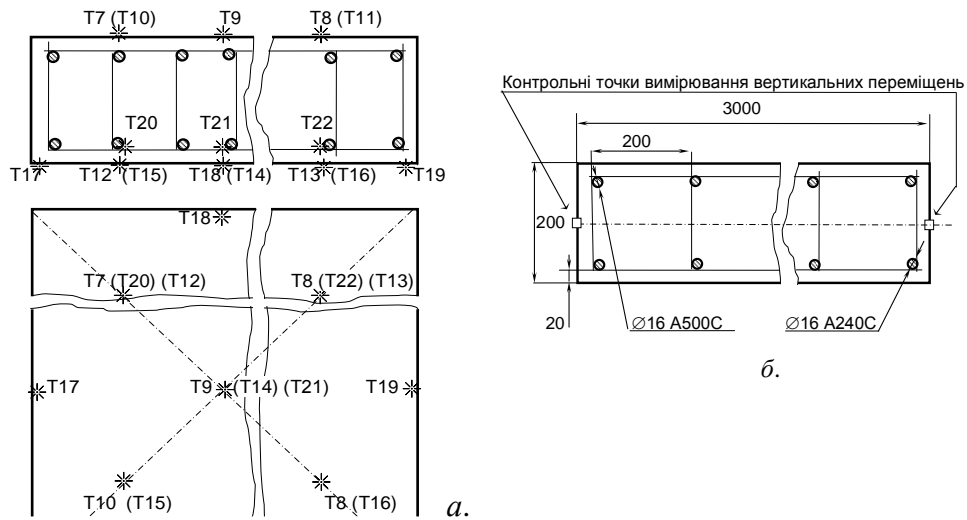


Рисунок. 2 – Положення термодатчиків при випробуваннях залізобетонної стіни для реалізації розробленого метода оцінки вогнестійкості (а) та схема армування і розташування контрольних точок для вимірювання вертикальних переміщень верхнього краю стіни (б).

Для відпрацювання процедур методів оцінки вогнестійкості за допомогою інтерпретації результатів вогневих випробувань були проведені вогневі випробування з використанням випробувальної установки, схема якої наведена на рис. 3.

Випробуванням були піддані два зразки-фрагменти залізобетонної стіни, що мали розміри 3200×3000×200 мм. Характеристики зразків подані у табл. 1.

На рис. 4 подані результати вимірювань температури у внутрішніх шарах, колон підданих вогневим випробуванням.

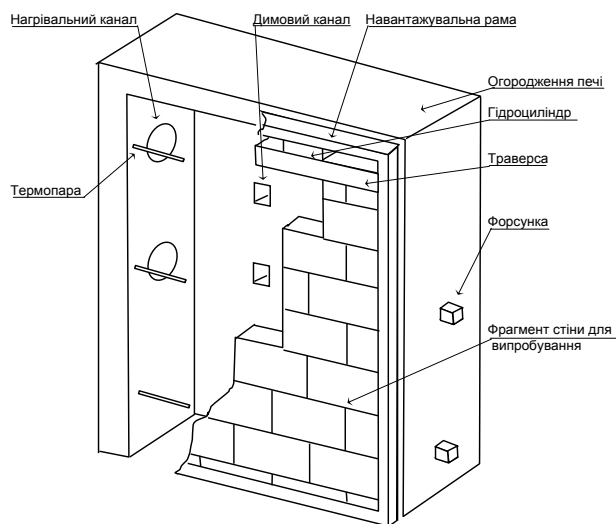


Рисунок 3 – Схема випробувальної установки.

Таблиця 1 – Основні параметри залізобетонних стін-зразків для випробувань

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Геометричні розміри			
• ширина	s	0,2	м
• ширина захисного шару	w	0,02	
• довжина стіни	l	3,2	
• висота стіни	h	3	
Тип бетону	Важкий на гранітному заповнювачі	Клас С 30/35 (В30)	
Густина бетону	ρ_B	2300	кг/м ³
Водоцементне відношення	В/Ц	0,36	
Гранична вологість	u	< 3	%
Робоча арматура внутрішня:		Клас А500С	
• діаметр	d_1	0,016	м
Робоча арматура зовнішня:		Клас А240С	
• діаметр	d_2	0,016	м
Каркасна арматура:		Клас А240С	
• діаметр	d_3	0,008	м

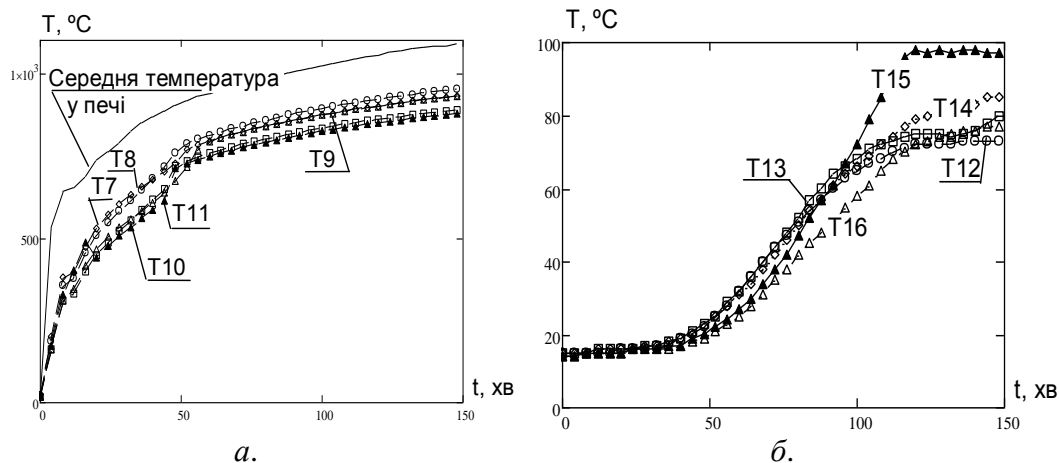


Рисунок 4 – Результати вимірювань температур у зразку №1: на обігрівній поверхні (а) та на необігрівній поверхні (б).

Для інтерполяції температур у перерізі зразків була використана формула:

$$T_{k,i} = T_{w2k} + (T_{w1k} - T_{w2k}) \chi^{a_h \exp(b_h \cdot (k_{max} - k) + c_h)} \quad (1)$$

де T_{w1k} , T_{w2k} – відповідно середні температури обігрівної та необігрівної поверхонь стіни, підданій випробуванням, у k -тий момент часу експонування;

a_h , b_h , c_h – коефіцієнти регресії, відповідні певній товщині для стіни із даного матеріалу, які визначаються з табл. 2;

k , k_{max} – поточний та максимальний дискретний час випробування, що визначаються через інтервал 1 хв;

χ - узагальнена координат вузлової точки у перерізі стінового фрагменту.

Таблиця 2 – Значення параметрів апроксимуючого поліному для стін із залізобетону

Товщина стіни, мм	Параметр a , $\times 10^{-5}$	Параметр b	Параметр c
70	0,0056	0,124	1,9
90	0,0021	0,135	2,381
100	0,0089	0,125	3,378
140	2,97	0,087	2,850
170	0,57	0,1	3,456
190	4,22	0,087	3,741
200	9,25	0,082	3,880
240	11,91	0,082	4,814
300	91,51	0,007	5,850
365	470,51	0,059	6,829

У результаті інтерполяції було отримані розподілення температури у перерізі залізобетонної стіни, підданої випробуванням, які наведені на рис. 5.

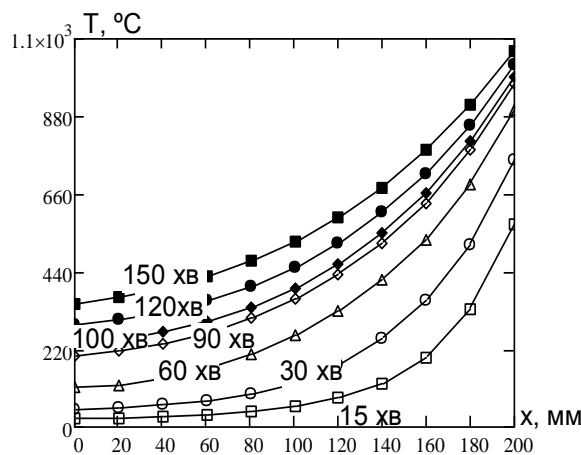


Рисунок 5 – Результати інтерполяції температурних розподілів у стіновому фрагменті-зразку №2, підданому випробуванням на вогнестійкість.

При математичному описанні діаграм деформування бетону або матеріалу кладки з огляду на стандарти [5] можна використати такий вираз:

$$\sigma(\varepsilon) = k_{c,T} F(\varepsilon, T), \quad (2)$$

де $F(\varepsilon)$ – певна функція, залежна тільки від деформації при даній температурі нагріву визначеного шару для бетону та багатьох матеріалів кладки визначається за формулами:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{c1,T}, F(\varepsilon, T) &= \frac{3\varepsilon \cdot f_c}{\varepsilon_{c1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}, \\ \text{при } \varepsilon_{c1,T} < \varepsilon < \varepsilon_{cu1,T}, F(\varepsilon, T) &= f_c - \frac{f_c \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{cu1,T} - \varepsilon_{c1,T}}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\varepsilon_{c1,T}$ – залежне від температури значення відносної деформації, до якої діаграма деформування матеріалу має зростаючу гілку;

$\varepsilon_{cu,T}$ – залежне від температури максимальне значення відносної деформації, до настання якого матеріал у змозі чинити опір;

f_c – межа міцності матеріалу на стискання, Па.

Згідно з стандартами [5] коефіцієнт роботи бетону має залежність від температури, що подається у табличному вигляді з 13 значень. Проміжкові значення визначаються за допомогою лінійної інтерполяції.

Схема визначення коефіцієнту роботи матеріалів стін подана на рис. 6. Згідно з цією схемою необхідно записати систему рівноваги у формі, що є зручною для визначення уточнених табличних значень коефіцієнту роботи. Вигляд виразів (2) та (3) дозволяє записати систему рівнянь рівноваги у вигляді системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР).

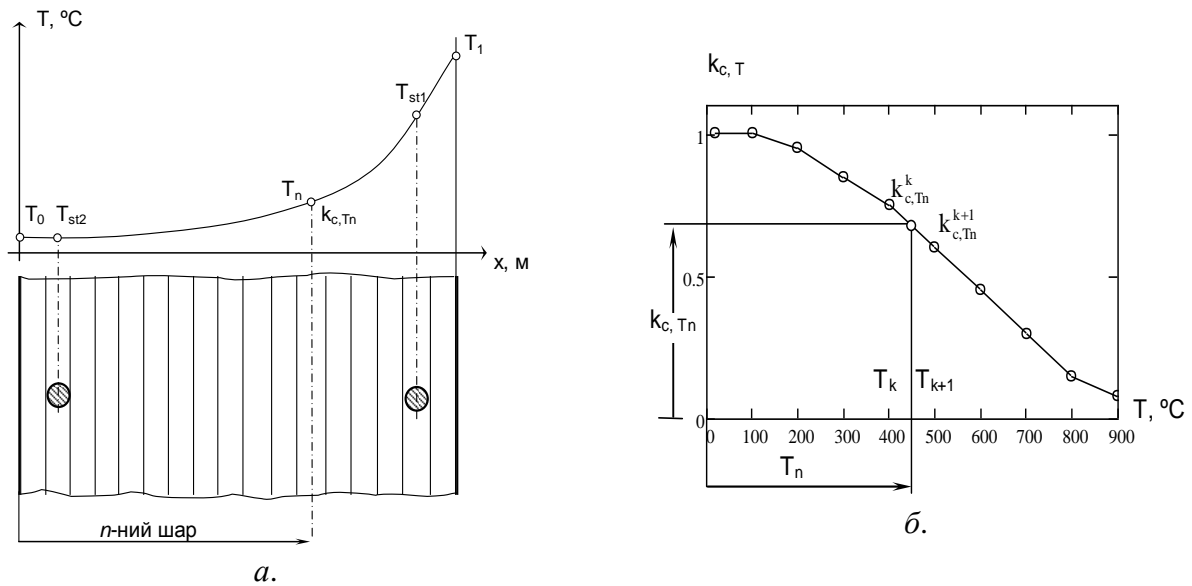


Рисунок 6 – Визначення коефіцієнту роботи матеріалу стіни за температурою у внутрішньому шарі: а – схема розбиття на шари перерізу стіни; б – схема інтерполяції за табличними даними.

В якості невідомих записуються табличні значення коефіцієнтів роботи бетону. Описана СЛАР має такий кінцевий вигляд:

$$[\mathbf{F}]\{\mathbf{k}\} + \{\mathbf{S}\} = 0, \quad (4)$$

де $\{\mathbf{k}\} = (k_{c1} \ k_{c2} \ \dots \ k_{cm})^T$ – вектор табличних значень коефіцієнту роботи матеріалу стіни відповідні табличним температурам $\{\mathbf{T}_m\} = (0 \ 100 \ 200 \ \dots \ T_m)^T$, що виступають у якості невідомих;

$[\mathbf{F}]$ – матриця, яка записується у вигляді:

$$[\mathbf{F}] = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & & Z_{ij} & & Z_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mj} & \dots & Z_{mm} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де члени матриці визначаються за формулами:

$$Z_{i1} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_1)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right), \quad Z_{im} = \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{m-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) \\ Z_{ij} = \sum_n [1 - 0.01(T_{ni} - T_j)] F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right) + \sum_n 0.01(T_{ni} - T_{j-1}) F_n(\varepsilon, T_{ni}) \left(1 - \frac{x_n}{w_x}\right). \quad (6)$$

Величина $m = \lceil T_{\max} \cdot 0.01 \rceil$ є кількістю рівнянь та перемінних у системі (4), що визначається максимальною температурою нагрівання стіни під час випробувань. При складанні рівнянь конкретні моменти часу визначаються рівномірно між першим і останнім моментом часу випробувань.

Тут w_x – поперечний прогин стіни під час випробувань.

{**S**} – вектор зусиль у арматурних стержнях, який визначається за виразом:

$$\{\mathbf{S}\} = (S_1 \dots S_i \dots S_m)^T, \quad (7)$$

де $S_i = F_{st1}(\varepsilon, T_{st1}) + F_{st2}(\varepsilon, T_{st2})$. Зусилля у арматурі в i -тій момент часу визначаються за виразами наведеними у стандартах щодо розрахунку залізобетонних конструкцій [40]:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 < \varepsilon < \varepsilon_{s0} & \quad F_{st}(\varepsilon, T) = E_{s,T} \varepsilon \\ \text{при } \varepsilon_{s0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{sy} & \quad F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sp,T} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}, \\ \text{при } \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st} & \quad \sigma_s = f_{sy,T}, \\ \text{при } \varepsilon_{st} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{s2} & \quad F_{st}(\varepsilon, T) = f_{sy,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})], \\ \text{при } \varepsilon_{s2} < \varepsilon & \quad \sigma_s = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

де a, b, c – параметри, що визначаються за формулами:

$$a^2 = (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,T}), \quad b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + c^2 \\ c = \frac{(f_{sy,T} - f_{sp,T})^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} - 2(f_{sy,T} - f_{sp,T})}. \quad (9)$$

У формули (8), (9) входять такі величини:

ε_{sy} – деформація, при якій настає межа текучості,

ε_{st} – деформація, при якій починається спадна гілка діаграми,

$f_{sp,T}$ – межа пропорційності сталі,

$f_{sy,T}$ – межа міцності сталі,

$E_{s,T}$ – модуль пружності сталі, залежний від температури нагріву

Деформація при обчисленні компонентів системи рівнянь (4) визначається за виразами [6]:

$$\varepsilon_n, i = \xi_i + \chi_i x_n - \varepsilon_{Tn}, \quad (10)$$

де ξ_i, χ_i – поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни у i -тій момент часу;

εT_n – температурна деформація, що визначається за таблицями у стандартах [5];

x_n – координата n -го внутрішнього шару перерізу стіни, що вимірюється від серединної точки перерізу.

Поздовжнє видовження та кривизна вісі стіни пов'язані з її переміщеннями, які вимірюються під час випробувань за виразами.

$$\xi = 1 - \frac{h + w_y}{3h} \sqrt{1 + \left(\frac{w_x \pi}{h + w_y} \right)^2}; \quad \chi = \pi^2 w_x (h + w_y)^{-2}. \quad (11)$$

де w_y – поздовжнє переміщення верхнього краю стіни під час випробувань

Таким чином, маючи вимірювання температури та переміщень, отримані під час випробувань можна провести уточнення коефіцієнту роботи матеріалу стіни і на основі цих даних провести оцінку вогнестійкості несучих та кам'яних стін. Для цього застосуємо математичний апарат (2) – (11) та вимірювання отримані у попередньому розділі дійсної роботи. На рис. 7 подані залежності коефіцієнту роботи бетону та кладки із блоків з легкого бетону, що отримані для випробуваних стінових фрагментів.

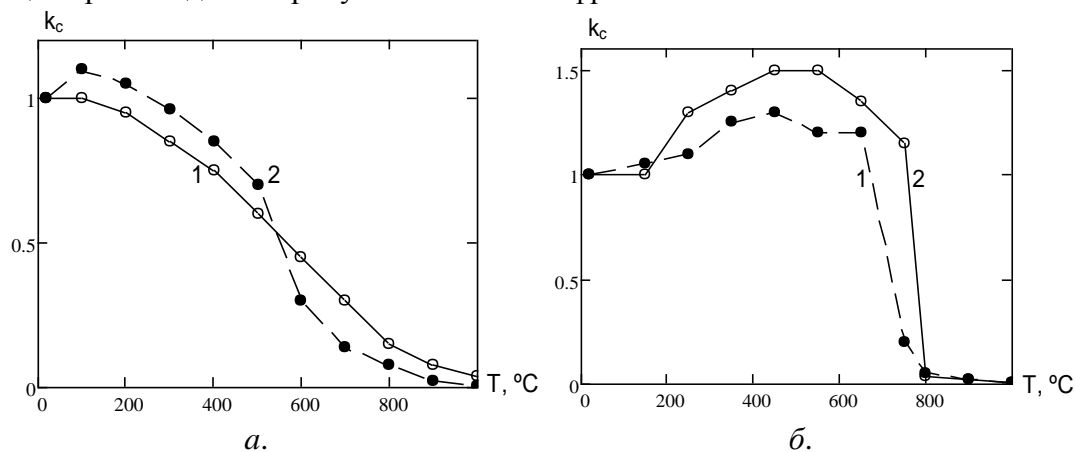


Рисунок 7 – Залежності коефіцієнту роботи бетону (а) та кладки із блоків з легкого бетону (б): 1 – стандартна залежність, 2 – уточнена залежність.

Висновки. З огляду на проведені дослідження можна зробити такі висновки:

1. Був розроблений метод ідентифікації коефіцієнтів роботи бетону при високих температурах нагріву залізобетонних несучих стін при їх стандартних випробуваннях на вогнестійкість.
2. Була проведена ідентифікація коефіцієнтів роботи при високих температурах нагріву за результатами проведених вогневих випробувань.
3. Показана висока ефективність розробленого метода.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДБН В.1.1-7-2002 [Чинний від 2003-05-01.]. – К.: Видавництво “Лібра”, 2003. – 87 с – (Національний стандарт України).
2. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека. (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В.1.1-4-98*. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с – (Національний стандарт України).
3. ДСТУ Б В.1.1-19: 2007. Захист від пожежі. Несучі стіни. Метод випробування на вогнестійкість. – К.: Укрархбудінформ, 2008. 37 с – (Національний стандарт України).
4. Поздеев С.В. Экспериментально-розрахунковий метод оцінки вогнестійкості залізобетонних стін на основі їх вогневих випробувань / С.В. Поздеев, С.Д. Щіпець, В.К. Словінський, О.В. Некора // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. – Черкаси: АПБ, 2013. – С. 224–226.