

УДК 624.012

## АДЕКВАТНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНОГО РОЗПОДІЛУ У ЗАЛІЗОБЕТОННОМУ РИГЕЛІ ЗА ДАНИМИ ЙОГО ВИПРОБУВАНЬ НА ВОГНЕСТІЙКІСТЬ

Проведені порівняльні розрахунки інтерполяції температурного розподілу у поперечному перерізі залізобетонного ригеля еліптичними та параболічними апроксимуючими залежностями. Наведені температурні розподіли у перерізі залізобетонного ригеля 300 × 150 з важкого бетону у різні моменти часу при дії «стандартної» пожежі за двома розробленими способами. Проведено порівняння результатів розрахунку.

Comparative calculations interpolation of the temperature distribution in the cross section of reinforced concrete bolts elliptic and parabolic approximating dependencies. Shows the temperature distribution in the cross section of reinforced concrete bolts 300 × 150 of heavy concrete at different times under the influence of the «standard» fire in two ways developed. Shows a comparison of the calculated results.

**Ключові слова:** вогневі випробування, вогнестійкість, інтерполяція, залізобетонний ригель, еліптичні залежності, параболічні залежності, апроксимаційні залежності, адекватність.

**Е**кспериментальні дані щодо вимірювань температури у внутрішніх шарах залізобетонних ригелів під час їх вогневих випробувань [1–4] є дуже обмеженими. Під час проведення таких вимірювань схема розташування контрольних точок обґрунтована недостатньо і не може бути використана для проведення апроксимації температурного поля у перерізі. Існуючі побудови температурних полів по перерізах залізобетонних ригелів виконані схематично і не містять точних даних температур, оскільки це здійснити експериментальним шляхом дуже важко. Тому для розв’язання поставлених задач щодо розроблення математичного апарату для інтерполяції температурних розподілів у перерізах залізобетонних ригелів і балок необхідно залучити температурні дані, отримані за теоретичним підходом розрахунковим методом. Для цього можна використати рівняння нестационарної теплопровідності з граничними умовами III роду.

Метою роботи є розроблення та практичне застосування на основі характеру розподілу температури апроксимаційних функціоналів, що дозволять відтворювати значення температури у різні моменти часу з використанням температур у контрольних точках перерізу залізобетонних ригелів або балок.

Для апроксимації температурних розподілів, що наведені у роботах [1–4], запропонований підхід, який має такий загальний вигляд:

$$T_{k,i} = T_{0k} + (T_{\max k} - T_{0k}) \left[ \frac{i}{n} \right]^{Q_k}, \quad (1)$$

де  $T_{k,i}$  – температура  $i$ -ї точки перерізу у  $k$ -й момент часу;  $T_{0k}$ ,  $T_{\max k}$  – температура першої та



**С.В. Поздєєв**

начальник кафедри будівельних конструкцій Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, д.т.н., професор



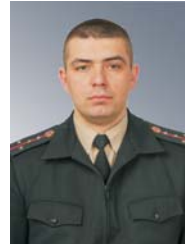
**Ю.А. Отрош**

доцент кафедри будівельних конструкцій Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, к.т.н., доцент



**А.М. Омельченко**

пошукач Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України



**І.Г. Федченко**

пошукач Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

останньої точок у  $k$ -й момент часу;  $n$  – кількість інтервалів між контрольними точками.

Був розроблений алгоритм визначення температури у вузлових точках поперечного перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу, блок-схема якого наведена на рис. 1.

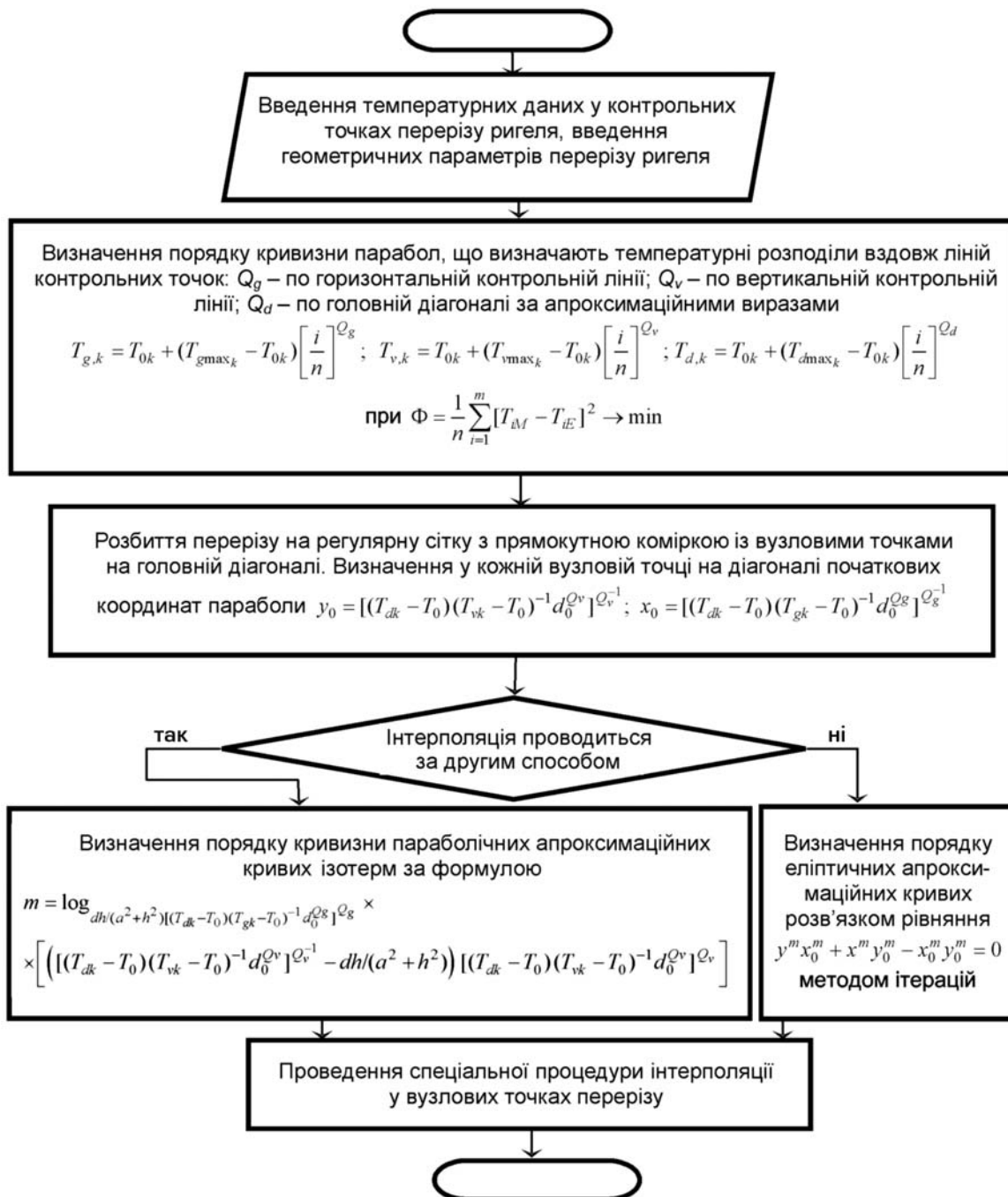


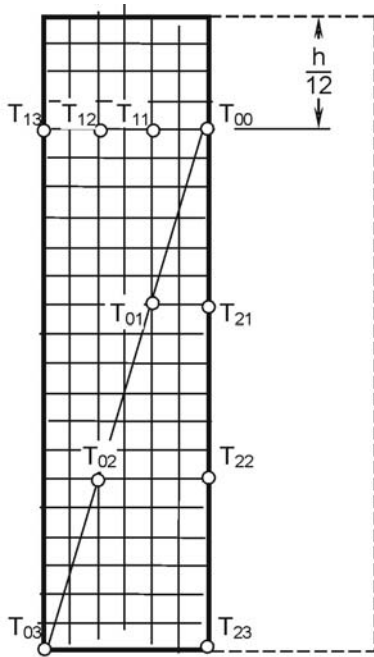
Рис. 1. Блок-схема алгоритму визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу

Для відпрацювання розроблених алгоритмів проведена інтерполяція температурних розподілів для залізобетонного ригеля 300 × 150 з важкого бетону на гранітному заповнювачі із використанням результатів розрахунків щодо вирішення прямої задачі теплопровідності у якості початкових даних. Схема розбиття перерізу на вузлові точки, яка відповідає кінцево-різницевої схемі, використаний для чисельного розв'язку рівняння теплопровідності, показана

на рис. 2. На даній схемі також показані контрольні точки, температури в яких використані в якості початкових даних для проведення інтерполяції для половини перерізу ригеля з огляду на його симетрію.

Початкова точка  $T_{00}$  вибрана для усунення незначної крайової особливості, що не враховується для спрощення проведення апроксимації.

Графіки температури від часу у контрольних точках наведені на рис. 3.



**Рис. 2.** Схема задання початкових даних для проведення інтерполяції температурного розподілу у перерізі залізобетонного ригеля при його нагріванні за стандартною температурною кривою пожежі

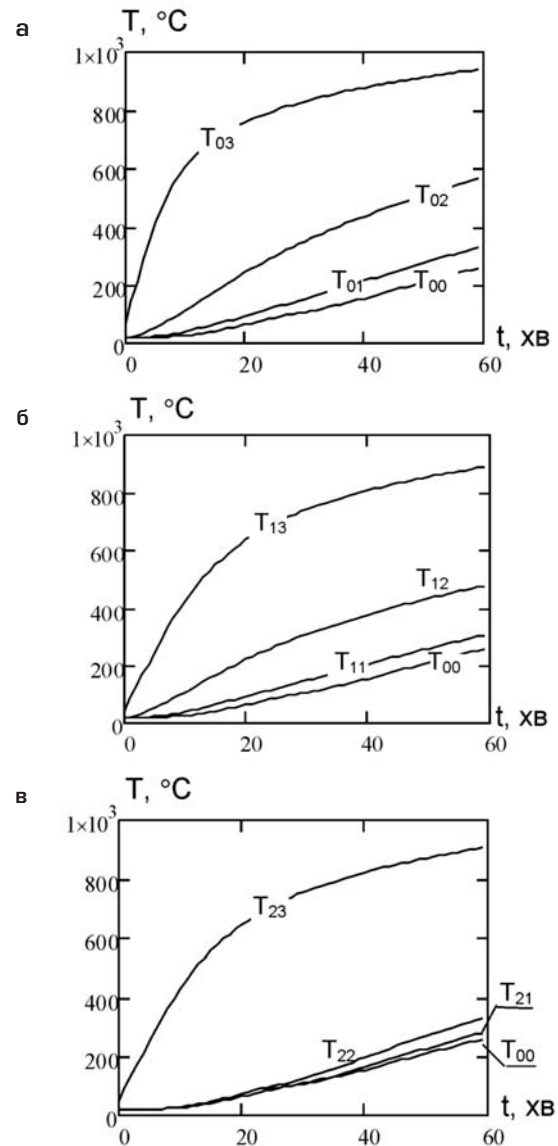
Дані, за якими побудовані графіки температур у контрольних точках, використовуються для проведення інтерполяції. Наведені графіки повністю відповідають процесам, що відбуваються у бетоні при його нагріванні, оскільки вони мають горизонтальну ділянку, яка відповідає випаровуванню вільної вологи у порах бетону.

Із застосуванням вказаних початкових даних та алгоритмів були виконані обчислення. Залежності показників ступеня апроксимаційного функціонала (1) від часу приведені на рис. 4.

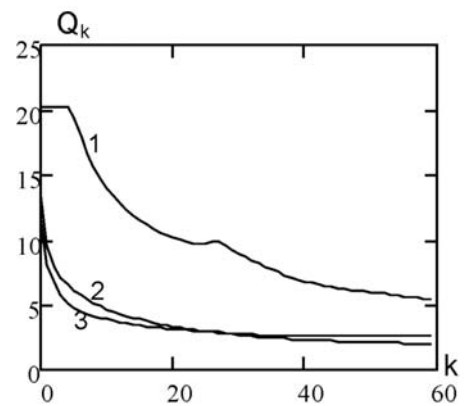
Проміжні дані, отримані у результаті розрахунку для інтерполяції за першим способом, наведені у таблиці 1.

Аналізуючи дані таблиці 1, бачимо дві особливості. Початкові координати апроксимаційних кривих виходять за геометричну область перерізу ригеля, а значення ступеня апроксимаційного функціонала ізотерм поступово збільшується від внутрішніх областей до зовнішніх, причому величина показника ступеня є значною. Це означає, що кривизна еліптичних апроксимаційних кривих є сильною. Зазначені особливості повністю відповідають реальній картині розподілу температури у перерізі.

Проміжні дані, отримані у результаті розрахунку для інтерполяції за другим способом, наведені в таблиці 2.



**Рис. 3.** Температурні режими у контрольних точках за різними контрольними лініями у перерізі ригеля: а – за головною діагоналлю; б – за серединною вертикаллю; в – за горизонталлю



**Рис. 4.** Залежності показника ступеня апроксимаційного функціонала типу (1) для різних контрольних ліній: 1 – за серединною вертикаллю; 2 – за головною діагоналлю; 3 – за горизонталлю

Таблица 1

Основні проміжні дані, отримані під час розрахунку для 30 хв розвитку пожежі при інтерполяції температурного розподілу у залізобетонному ригелі за першим способом

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по осі, $x_0$ , м	Початковий параметр по осі, $y_0$ , м	Довжина відрізка до вузлової по головній діагоналі, $d_0$ , м	Показник ступеня апроксимаційного функціонала, $m$	Температура першої ізотерми, $T_{0k}$ , °С	Температура другої ізотерми, $T_{0k+1}$ , °С
1	$3,441 \cdot 10^{-3}$	0,098	$9,977 \cdot 10^{-3}$	1,048	103,129	103,238
2	$6,748 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,02	1,333	103,238	103,855
3	0,01	0,135	0,03	1,586	103,855	105,326
4	0,013	0,147	0,04	1,834	105,326	107,948
5	0,016	0,157	0,05	2,085	107,948	111,99
6	0,02	0,166	0,06	2,349	111,99	117,705
7	0,023	0,174	0,07	2,631	117,705	125,332
8	0,026	0,181	0,08	2,936	125,332	135,098
9	0,029	0,187	0,09	3,27	135,098	147,223
10	0,032	0,193	0,1	3,642	147,223	161,918
11	0,035	0,198	0,11	4,059	161,918	179,389
12	0,038	0,204	0,12	4,533	179,389	199,837
13	0,042	0,208	0,13	5,08	199,837	223,456
14	0,045	0,213	0,14	5,72	223,456	250,437
15	0,048	0,217	0,15	6,453	250,437	280,968
16	0,051	0,222	0,16	6,972	280,968	315,231
17	0,054	0,226	0,17	7,298	315,231	353,407
18	0,057	0,23	0,18	7,557	353,407	395,673
19	0,06	0,233	0,19	7,785	395,673	442,203
20	0,063	0,237	0,2	7,996	442,203	493,169
21	0,066	0,24	0,21	8,198	493,169	548,74
22	0,069	0,244	0,22	8,394	548,74	609,083
23	0,072	0,247	0,229	8,585	609,083	674,363
24	0,075	0,25	0,239	8,773	674,363	744,743
25	0,078	0,253	0,249	8,96	744,743	820,384

Таблица 2

Основні проміжні дані, отримані під час розрахунку для 30 хв розвитку пожежі при інтерполяції температурного розподілу у залізобетонному ригелі за другим способом

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по осі, $x_0$ , м	Початковий параметр по осі, $y_0$ , м	Довжина відрізка до вузлової по головній діагоналі, $d_0$ , м	Показник ступеня апроксимаційного функціонала, $m$	Температура першої ізотерми, $T_{0k}$ , °С	Температура другої ізотерми, $T_{0k+1}$ , °С
1	$3,441 \cdot 10^{-3}$	0,098	$9,977 \cdot 10^{-3}$	0,62	103,129	103,238
2	$6,748 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,02	1,17	103,238	103,855
3	0,01	0,135	0,03	1,73	103,855	105,326
5	0,016	0,157	0,05	2,31	107,948	111,99
6	0,02	0,166	0,06	2,92	111,99	117,705
7	0,023	0,174	0,07	3,56	117,705	125,332
8	0,026	0,181	0,08	4,24	125,332	135,098
9	0,029	0,187	0,09	4,96	135,098	147,223
10	0,032	0,193	0,1	5,72	147,223	161,918
11	0,035	0,198	0,11	6,54	161,918	179,389
12	0,038	0,204	0,12	7,41	179,389	199,837
13	0,042	0,208	0,13	8,36	199,837	223,456
14	0,045	0,213	0,14	9,38	223,456	250,437
15	0,048	0,217	0,15	10,49	250,437	280,968
16	0,051	0,222	0,16	11,71	280,968	315,231

Закінчення таблиці 2

Номер вузлової точки головної діагоналі	Початковий параметр по осі, $x_0$ , м	Початковий параметр по осі, $y_0$ , м	Довжина відрізка до вузлової по головній діагоналі, $d_0$ , м	Показник ступеня апроксимаційного функціонала, $m$	Температура першої ізотерми, $T_{0k}$ , °С	Температура другої ізотерми, $T_{0k+1}$ , °С
17	0,054	0,226	0,17	13,06	315,231	353,407
18	0,057	0,23	0,18	14,57	353,407	395,673
19	0,06	0,233	0,19	16,28	395,673	442,203
20	0,063	0,237	0,2	18,25	442,203	493,169
21	0,066	0,24	0,21	20,58	493,169	548,74
22	0,069	0,244	0,22	23,41	548,74	609,083
23	0,072	0,247	0,229	27,06	609,083	674,363
24	0,075	0,25	0,239	30,2	674,363	744,743
25	0,078	0,253	0,249	30,2	744,743	820,384

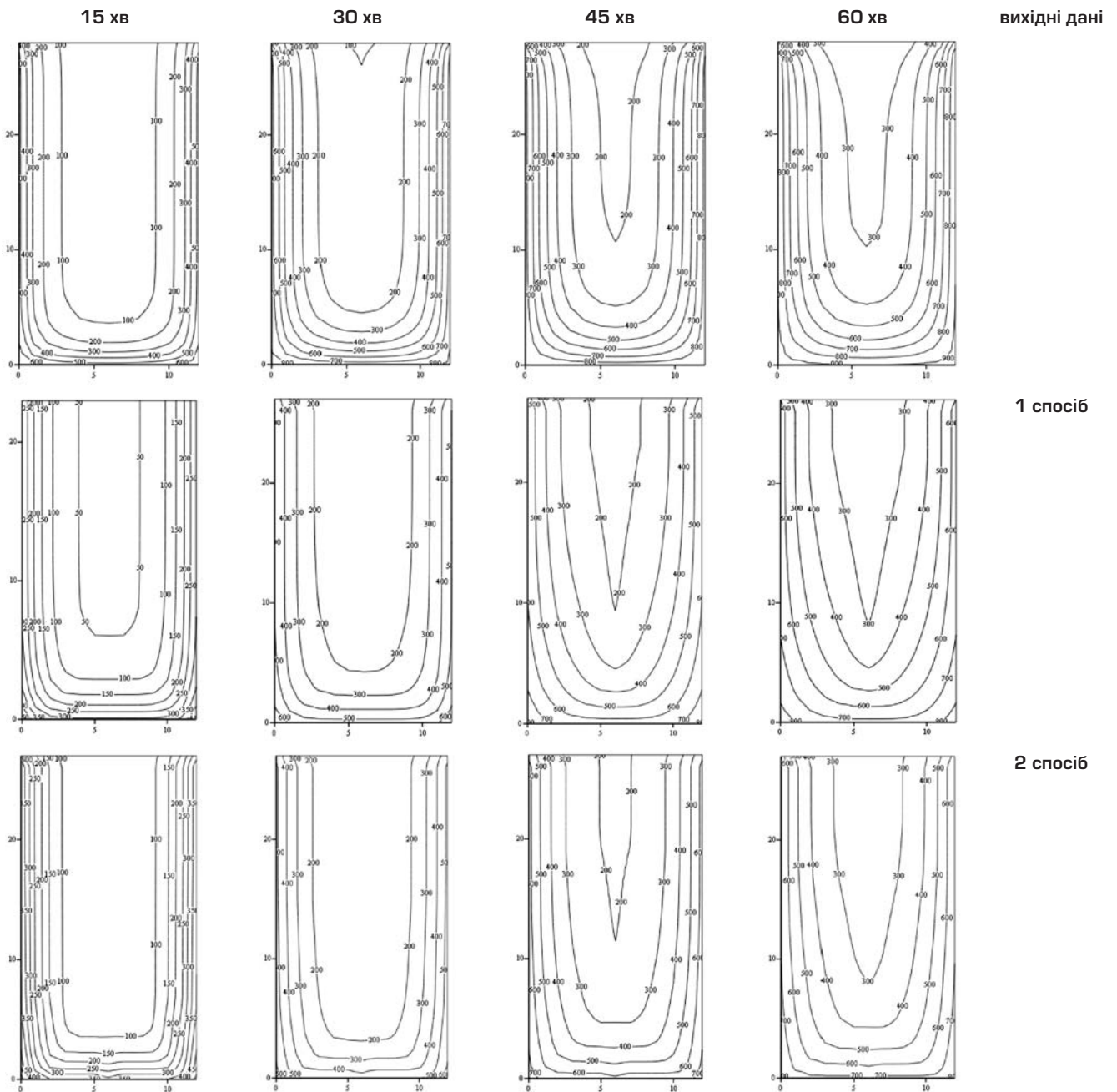


Рис. 5. Температурні розподіли у перерізі залізобетонного ригеля  $300 \times 150$  з важкого бетону у різні моменти часу дії «стандартної» пожежі, визначені за розробленими способами інтерполяції

Для попередньої оцінки адекватності результатів були побудовані температурні поля у перерізі у вигляді ізоліній (рис. 5).

З поверхонь розподілів температури можна побачити, що інтерполяція, проведена за обома способами, дає майже однакові результати. Можна відмітити помітну розбіжність форм отриманих поверхонь. Ізотерми за результатами, отриманими шляхом інтерполяції, є менш заокругленими ніж ізотерми розподілів, визначених прямим розрахунком. Другий підхід дає більш точне наближення, але поверхні температурних розподілів мають розриви за першою та другою похідними.

Для більш точного аналізу співставимо початкові дані, тобто дані, що отримані при теоретичному підході, і відповідні результати інтерполяції, отримані різними методами. Результати порівняльного аналізу наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

**Порівняльний аналіз результатів інтерполяції, отриманих різними способами**

Спосіб інтерполяції	Максимальне відхилення, °С	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, °С
Перший	115	12,8	25,8
Другий	76	8,4	18,9

Дані таблиці 3 свідчать про високу точність методів інтерполяції, однак, найбільш точним є другий спосіб. Усі розроблені способи можна використовувати для проведення наближення температурних розподілів за дискретними вимірюваннями температур у контрольних точках, де встановлюються термомпари.

## Висновки

1. Виявлені закономірності зміни показників ступеня апроксимуючого функціонала розподілу температур по контрольних лініях у перерізі залізобетонного ригеля у залежності від часу його експонування за стандартним температурним режимом у вогневій печі.

2. Запропоновані два методи інтерполяції температур за даними у дискретних контрольних точках перерізів залізобетонних ригелів, засновані на апроксимації ізотерм у їхніх перерізах за допомогою функціоналів двох типів: еліптичного та параболічного.

3. Запропонований чисельний алгоритм інтерполяції температури у вузлових точках перерізів залізобетонних ригелів за побудованими ізотермами на вузлових точках головної діагоналі їх перерізів.

4. Показана висока ефективність запропонованого підходу до інтерполяції температурного розподілу у перерізі залізобетонного ригеля за результатами вимірювання температури у контрольних точках, оскільки найбільше значення похибки результатів інтерполяції за першим способом становить не більше 17 %, а за другим не більше 11 %.

5. Виявлено, що найбільшу точність має другий розроблений спосіб інтерполяції температурного розподілу у перерізі залізобетонного ригеля за результатами вимірювання температури у контрольних точках, оскільки його похибка менша за перший спосіб на 6 %.

[1] Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.  
 [2] Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.  
 [3] Бартелеми Б. Огнестойкость строительных конструкций / Бартелеми Б., Крюппа Ж. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.

[4] Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / Милованов А.Ф. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.  
 [5] Словінський В.К. Удосконалення методу випробувань на вогнестійкість залізобетонних колон. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / В.К. Словінський. – Черкаси, 2014. – 22 с.

Надійшла 27.02.2015 р.