

*С.В. Поздеев, д.т.н., профессор
Ю.А. Отрош, к.т.н., доцент
А.М. Омельченко, здобувач
М.О. Кропива, ад'юнкт
Черкаський інститут пожежної безпеки
імені Героїв Чорнобиля
Національного університету
цивільного захисту України*

МЕТОД ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ У ПЕРЕРІЗІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Розроблено методику апроксимації температурного поля в поперечному перерізі залізобетонного ригеля або балки. Запропоновано алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу, що заснований на наближенні ліній ізотерм еліптичними та параболічними апроксимаційними залежностями.

Ключові слова: *вогневі випробування, вогнестійкість, інтерполяція, залізобетонна балка, еліптичні залежності, параболічні залежності, апроксимаційні залежності.*

*С.В. Поздеев, д.т.н., профессор
Ю.А. Отрош, к.т.н., доцент
А.Н. Омельченко, соискатель
М.А. Кропива, адъюнкт
Черкасский институт пожарной безопасности
имени Героев Чернобыля
Национального университета
гражданской защиты Украины*

МЕТОД ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛЕЙ В СЕЧЕННІ ЖЕЛЕЗОБЕТОННИХ БАЛОК

Разработана методика аппроксимации температурного поля в поперечном сечении железобетонного ригеля или балки. Предложен алгоритм определения температуры в узловых точках сечения путем интерполяции температур по температурным показателям в контрольных точках сечения, который основан на приближении линий изотерм эллиптическими и параболическими аппроксимационными зависимостями.

Ключевые слова: *огневые испытания, огнестойкость, интерполяция, железобетонная балка, эллиптические зависимости, параболические зависимости, аппроксимационные зависимости.*

S.V. Pozdeev, ScD, Professor
Y.A. Otrosh, PhD, Associate Professor
A. N. Omelchenko, applicant
M.O. Kropiva, adjunct

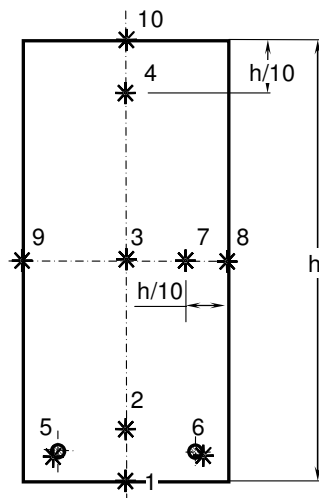
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes
National University of Civil Protection of Ukraine

TEMPERATURE FIELDS INTERPRETATION METHOD IN THE CROSS SECTION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

The technique of approximating the temperature field in the cross section of reinforced concrete joist or bolts. An algorithm for determining the temperature at the nodal points of the section by interpolating the temperature of temperature indicators in the control points of the section, which is based on the approximation lines isotherms of elliptic and parabolic approximation dependences.

Keywords: fire tests, fire, interpolation, reinforced concrete beam, depending on the elliptical, parabolic dependence approximation dependences.

Вступ. У роботах [1 – 4] наведений великий обсяг даних, отриманих під час вогневих випробувань щодо вимірювань температур у контрольних точках перерізів залізобетонних ригелів і балок при вогневій дії у печах випробувальних установок за стандартним температурним режимом пожежі. При цьому в більшості випадків досліджувалися балки та ригелі із прямокутним перерізом (рис. 1).



**Рис. 1. Розташування термопар у перерізах залізобетонних ригелів
(1 – 10 – номери контрольних точок у перерізі)**

У монографії А.Ф. Мілованова [4] наведені результати вимірювань температур у внутрішніх шарах ригелів прямокутного перерізу 300×150, виготовлених з бетону різних типів. На рисунку 2 подано розподілення температур по горизонтальній лінії вимірювання для залізобетонного ригеля із прямокутним перерізом з важкого бетону з розмірами 300×150.

Експериментальні дані щодо вимірювань температури у внутрішніх шарах залізобетонних ригелів під час їх вогневих випробувань [4] є дуже обмеженими (рис. 2). Під час проведення таких вимірювань схема розташування контрольних точок обґрунтована недостатньо і зовсім не може бути використана для проведення апроксимації

температурного поля у перерізі. Існують способи побудови температурних полів по перерізах залізобетонних ригелів [1 – 4], але вони виконані схематично і не містять точних даних температур, оскільки здійснити це експериментально дуже важко.

Виділення не розв’язаних раніше частин загальної проблеми. Для розв’язання поставлених завдань щодо розроблення математичного апарату для інтерполяції температурних розподілів у перерізах залізобетонних ригелів і балок необхідно залучити температурні дані, отримані з використанням теоретичного підходу розрахунковим методом.

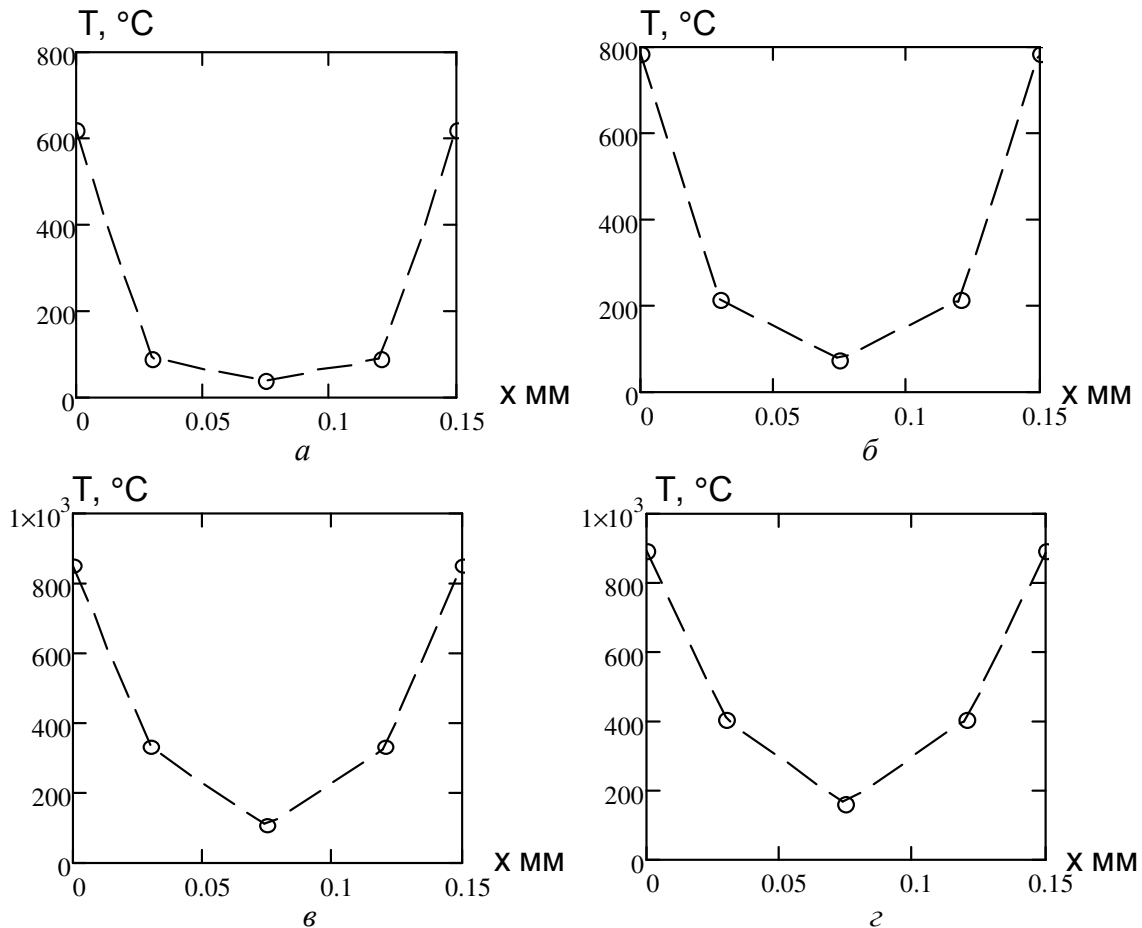


Рис. 2. Температурні розподіли по горизонтальній лінії розташування термпар у перерізі залізобетонного ригеля 300×150 з важкого бетону в різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: *a* – на 15 хв; *б* – на 30 хв; *в* – на 45 хв; *г* – на 60 хв

Постановка завдання. Мета роботи полягає в розробленні на основі характеру розподілень температури апроксимаційних функціоналів, що дозволять відтворювати значення температури у різні моменти часу з використанням температур у контрольних точках.

Основний матеріал і результати. Для апроксимації температурних розподілень, наведених на рис. 2, у роботах [1 - 4] запропоновано підхід, рекомендований виразом

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

де $T_{k,i}$ – температура i -тої точки перерізу конструкції у k -тий момент часу;
 T_{0k} , T_{maxk} – температура першої та останньої точок у k -тий момент часу;
 n – кількість інтервалів між контрольними точками.

Розрахунки були виконані для залізобетонного ригеля з важкого бетону з розмірами 300×150, використаного для випробування на вогнестійкість, дані яких були наведені у монографії А.Ф. Мілованова [4]. Результати розрахунку показані на рис. 3.

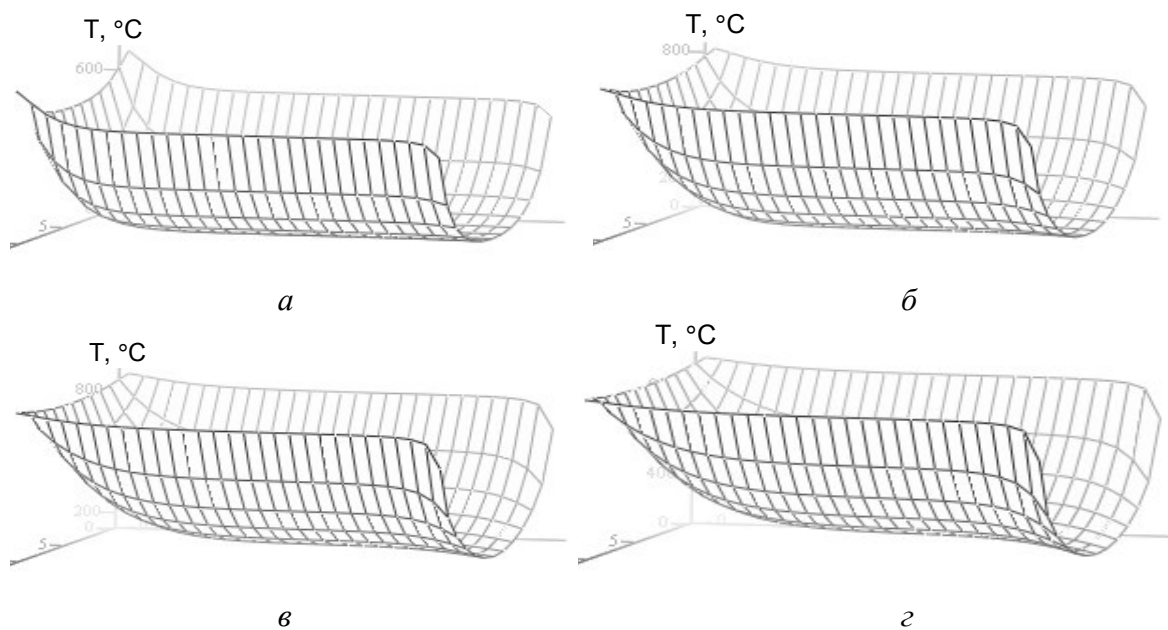


Рис. 3. Розрахункові температурні розподіли у перерізі залізобетонного ригеля 300×150 з важкого бетону в різні моменти часу дії «стандартної» пожежі: а – на 15 хв; б – на 30 хв; в – на 45 хв; г – на 60 хв

Після аналізу вигляду отриманих розподілів температури запропоновано два основних способи інтерполяції температурних розподілів за показниками температури у контрольних точках. Дослідження показали, що найбільш стійкий та надійний алгоритм, заснований на наближенні ліній ізотерм апроксимаційними залежностями [5]. Запропоновані способи відрізняються типом апроксимаційних залежностей.

Перший спосіб полягає у проведенні апроксимації ліній ізотерм еліптичними залежностями m -того порядку. За другим способом відбувається апроксимація ліній ізотерм параболічними залежностями m -того порядку. За положенням ізотерми визначається температура вузлової точки. Запропоновані способи були використані для інтерполяції температурних полів за початковими даними, одержаними розрахунковим шляхом, після проведення аналізу адекватності отриманих даних шляхом їх порівняння з початковими даними, одержаними із застосуванням теоретичного підходу.

При наближенні ізотерм еліптичними кривими m -того порядку можна використовувати аналітичний вираз

$$y(x) = y_0 \left(1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^m \right)^{1/m}, \quad (2)$$

де x_0 і y_0 – координати точки перетину апроксимуючої кривої та осей координат; m – показник ступеня еліптичної кривої, що наближає ізотерму.

На рисунку 4 показаний принцип проведення апроксимації ізотерм за виразом (2).

Степінь m функціонала (2) визначає порядок еліптичної кривої, що встановлює її кривизну. Чим більше порядок, тим більша кривизна. Тому цей параметр варіюється при наближенні апроксимаційного функціонала до лінії ізотерми. Аналіз температурних розподілів у перерізі показав, що порядок ізотерм, які знаходяться ближче до поверхонь і які обігриваються, є найбільшим і суттєво перевищує 2.

У середині порядок ізотерм наближається до 2. Ізотерми, ближчі до необігрівної поверхні, стають меншими за 2 і можуть бути навіть меншими за 1, тобто мають від'ємну кривизну (в нашому випадку опуклу і повернені назустріч осі перерізу ригеля). Це дозволяє повністю відтворити будь-який характер ізотерм, що відповідають нагріванню залізобетонного ригеля за стандартним температурним режимом пожежі. Для реалізації такого підходу вираз (2) можна переписати у параметризованому вигляді

$$y^m x_0^m + x^m y_0^m - x_0^m y_0^m = 0. \quad (3)$$

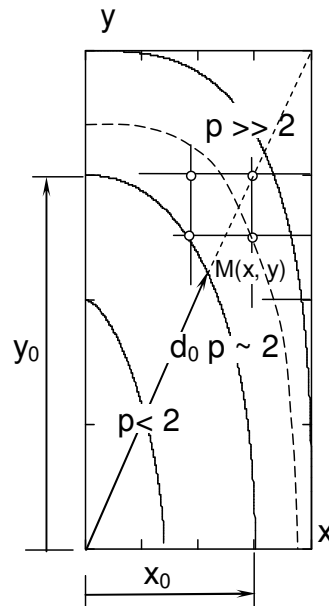


Рис. 4. Схема апроксимації ізотерм у перерізі фрагмента залізобетонного ригеля

При такому записі вираз (3) можна розглядати як рівняння відносно невідомого параметра m . Це дає змогу для інтерполяції температурних розподілів визначити характер ізотерм, знайшовши порядок апроксимаційних функціоналів у вузлових точках головної діагоналі перерізу. Таким чином, тепер усі параметри будуть залежати від поточного значення довжини відрізка діагоналі до відповідної вузлової точки. Тоді всі члени рівняння можна визначити за формулами:

$$y_0 = [(T_{dk} - T_0)(T_{vk} - T_0)^{-1} d_0^{Q_v}]^{Q_v^{-1}}; \quad x_0 = [(T_{dk} - T_0)(T_{gk} - T_0)^{-1} d_0^{Q_g}]^{Q_g^{-1}}, \quad (4)$$

$$x = d \cdot a / (a^2 + h^2); \quad y = d \cdot h / (a^2 + h^2), \quad (5)$$

де T_{dk} , T_{gk} , T_{vk} – температури, визначені на обігрівних поверхнях відповідно за діагоналю та середніми вертикалю й горизонталлю перерізу;

T_0 – температура найменш нагрітої точки перерізу;

Q_d , Q_g , Q_v – показники степеня функціонала, визначені відповідно для діагоналі та середніх горизонталі й вертикалі перерізу;

d_0 – довжина відрізка по діагоналі від початку координат до певної цієї вузлової точки;

d – довжина радіального відрізка від початку координат до точки із поточними координатами.

Рівняння (3) може бути вирішене тільки чисельно з використанням одного з відповідних відомих методів. Застосовуючи такий підхід, можна визначити температуру шляхом лінійної інтерполяції між температурами сусідніх ізотерм для кожної поточної вузлової точки перерізу.

При наближенні ізотерм параболічними кривими m -того порядку можна використовувати такий аналітичний вираз

$$y(x) = y_0 + \frac{y_0}{x_0^m} \cdot x^m, \quad (6)$$

де x_0 і y_0 – координати точки перетину апроксимуючої кривої та осей координат;
 m – показник степеня еліптичної кривої, що наближає ізотерму.

Так само як і в першому випадку, степеня m функціонала (6) визначає порядок параболічної кривої, що встановлює її кривизну. Чим більший порядок, тим більша кривизна. Тому для інтерполяції температурного поля у перерізі залізобетонного ригеля можна застосувати такий же підхід. У цьому випадку вираз (6) запишемо у вигляді такого параметричного рівняння

$$y_0 - y - \frac{y_0}{x_0^m} \cdot x^m = 0. \quad (7)$$

Параметри такого рівняння можна визначити за формулами (4) та (5). При підстановці цих виразів у рівняння (7) можна помітити, що аналітичний розв'язок має вигляд

$$m = \log_{d \cdot h / (a^2 + h^2) \left[(T_{dk} - T_0)(T_{sk} - T_0)^{-1} d_0^{Q_s} \right]^{Q_s}} \left[\left(\left[(T_{dk} - T_0)(T_{vk} - T_0)^{-1} d_0^{Q_v} \right]^{Q_v^{-1}} - d \cdot h / (a^2 + h^2) \right) \left[(T_{dk} - T_0)(T_{vk} - T_0)^{-1} d_0^{Q_v} \right]^{Q_v^{-1}} \right]. \quad (8)$$

Одержавши порядок кривизни парабол у вузлових точках головної діагоналі для визначення температур у вузлових точках перерізу, можна скористатися лінійною інтерполяцією, як вказано вище.

Використовуючи сформульовані положення зазначених способів, розробили спільний для них алгоритм визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу. Його блок-схему наведено на рисунку 5.

Спеціальна процедура інтерполяції може бути виконана за двома способами. Перший спосіб застосовуємо для способу апроксимації ізотерм еліптичного типу. Він полягає у визначенні координат точок, що належать двом сусіднім ізотермам, побудованим у результаті апроксимації. Ці точки повинні бути розташовані на промені, проведеному з початкової точки у поточну точку, в якій необхідно знайти температуру, причому поточна точка повинна знаходитися між цими ізотермами. Використовуючи значення температури сусідніх ізотерм і координати поточної точки та відповідних точок на промені, між якими знаходиться точка, шляхом лінійної інтерполяції визначається її температура. Схему інтерполяції за першим способом подано на рисунку 6.

Використання такого способу зумовлене тим, що визначення довжини променя, проведеного у точку, яка знаходиться на апроксимованій ізотермі, здійснюється за формулою

$$d_k = \frac{x_{0k} y_{0k}}{\left(x_{0k}^{m_k} + y_{0k}^{m_k} \right)^{m_k^{-1}}}. \quad (9)$$

Для другого способу апроксимації ізотерм формули, подібної до (9), не існує, тому такий підхід не може бути застосований. Отже, в цьому випадку було розроблено інший спосіб, що реалізується за допомогою обчислень координати y за виразом (6) із використанням отриманого набору параметрів y_{0k} , x_{0k} , m_k уздовж вертикальної лінії з

координатою x поточної точки, в якій визначається температура. Температура поточної точки визначається шляхом лінійної інтерполяції між температурами сусідніх ізотерм, де вона знаходиться, та за відповідними координатами точок перетину цих ізотерм і відповідної вертикальної лінії з координатою x поточної точки. Схему інтерполяції за даним способом наведено на рисунку 7.

При виконанні інтерполяції за обома способами використовується формула

$$T_{p,q} = T_0 + (T_1 - T_0)(y_{k+1} - y_k)^{-1} y_{p,q} \quad (10)$$

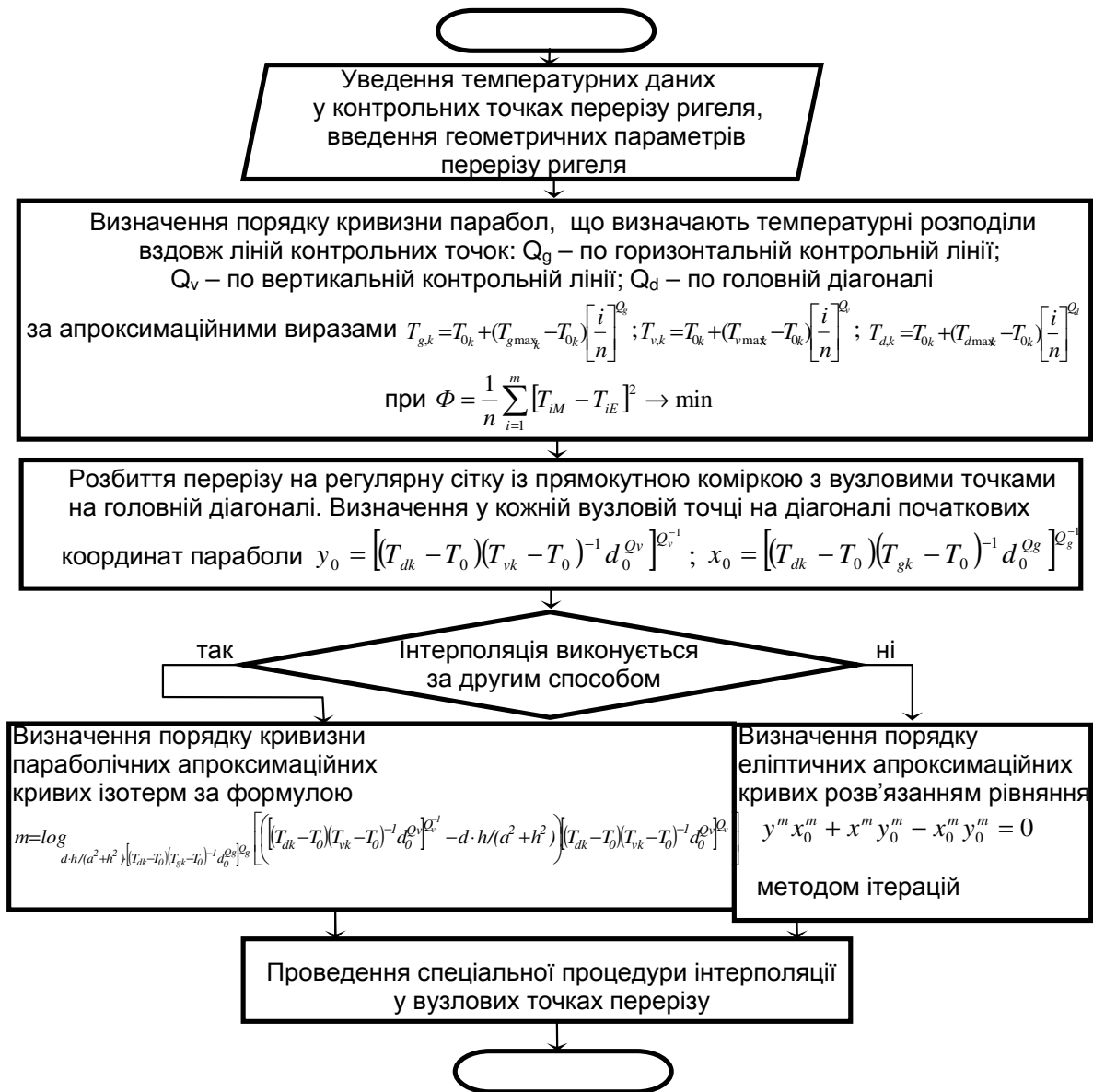


Рис. 5. Блок-схема алгоритму визначення температури у вузлових точках перерізу шляхом інтерполяції температур за температурними показниками у контрольних точках перерізу

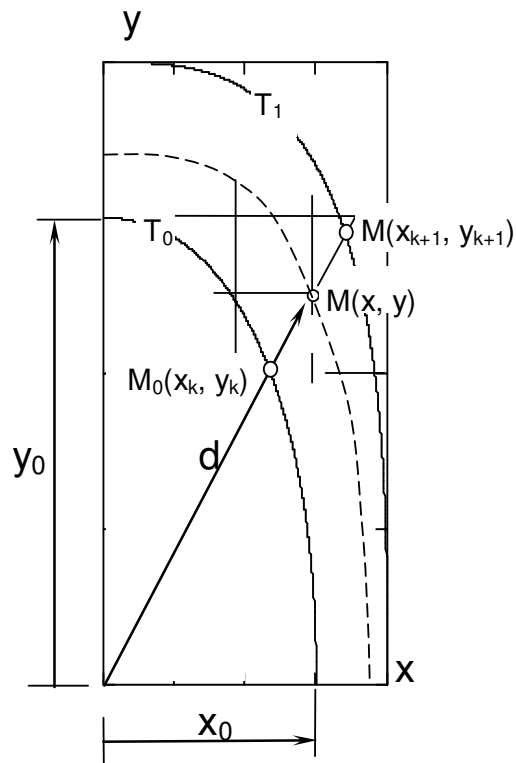


Рис. 6. Схема інтерполяції температури в перерізі фрагмента залізобетонного ригеля для першого способу апроксимації

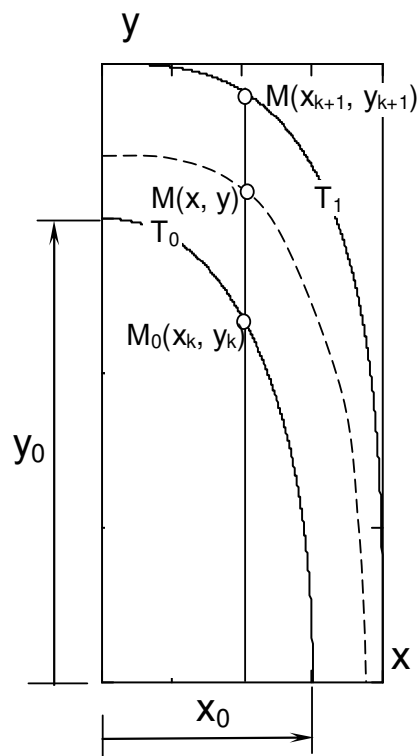


Рис. 7. Схема інтерполяції температури в перерізі фрагмента залізобетонного ригеля для другого способу апроксимації

Висновки.

1. Таким чином, було розроблено два способи інтерполяції температурних розподілень у залізобетонних ригелях на основі вимірювань температури у контрольних точках перерізу під час випробувань на вогнестійкість за стандартним температурним режимом.

2. Виявлено тип кривих, що відповідають січним лініям поверхні температурного розподілу у залізобетонному ригелі під час його випробування на вогнестійкість за стандартним температурним режимом, та вигляд функціоналів для їх наближення вздовж ліній, на яких розташовані контрольні точки температури у внутрішніх шарах перерізу.

3. Виявлено закономірності зміни показників степеня апроксимуючого функціонала розподілу температур за контрольними лініями у перерізі залізобетонного ригеля залежно від часу його експонування за стандартним температурним режимом у вогневій печі.

4. Виявлено тип кривих, що апроксимують ізотерми у перерізі залізобетонних ригелів під час їх нагрівання за стандартним температурним режимом під час випробування, а також вигляд функціоналів, які відповідають цим кривим.

5. З'ясовано закономірності зміни основних параметрів запропонованих функціоналів, що наближають ізотерми у перерізі залізобетонного ригеля, залежно від часу його експонування за стандартним температурним режимом у вогневій печі.

6. Запропоновано 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.

7. Рекомендовано математичний апарат для визначення основних параметрів функціоналів для апроксимації ізотерм у перерізі залізобетонного ригеля при його експонуванні за стандартним температурним режимом у вогневій печі.

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

Література

1. Мосалков И.Л. *Огнестойкость строительных конструкций* / И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина, А.Ю. Фролов. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
2. *Расчет огнестойкости строительных конструкций* / А.И. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1988. – 144 с.
3. Бартелеми Б. *Огнестойкость строительных конструкций* / Б. Бартелеми, Ж. Крюппа. – М.: Стройиздат, 1985. – 216 с.
4. Милованов А.Ф. *Огнестойкость железобетонных конструкций* / А.Ф. Милованов – 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 «Пожжежна безпека»* / В.К. Словінський. – Черкаси, 2014. – 22 с.

© С.В. Поздєєв, Ю.А. Отрош, А.М. Омельченко, М.О. Кропива
Надійшла до редакції 26.02.2015