

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК

В статті проведено математичне моделювання поведінки залізобетонної балки під час пожежі за допомогою методу кінцевих елементів. При цьому розглянуто математичні моделі матеріалів, подані у сучасних нормативних документах. В результаті проведених досліджень визначено фактичні межі вогнестійкості і найефективніші математичні моделі для виконання розрахунків на вогнестійкість залізобетонних елементів, що згинаються. Розглянуто особливості і область застосування базових математичних моделей для вивчення поведінки залізобетону під час пожежі для визначення меж вогнестійкості несучих залізобетонних будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, міцнісна задача, механічні характеристики, метод кінцевих елементів.

Постановка проблеми. Застосування методів математичного моделювання для дослідження напружено-деформованого стану елементів залізобетонних конструкцій під час пожежі пов'язане із значними труднощами внаслідок неоднорідності й нелінійності властивостей залізобетону. Цій проблемі присвячені численні публікації [1], але, аналізуючи наукові дослідження в цьому напрямку слід зазначити, що в них більша увага приділяється теплофізичним аспектам. На нашу думку більшого розкриття потребують аспекти напружено-деформованого стану (НДС) під час вогневого впливу пожежі із застосуванням новітніх засобів математичного й комп'ютерного моделювання з врахуванням всіх особливостей поведінки залізобетону. Для розв'язку даних задач найбільш ефективним є метод кінцевих елементів (МКЕ).

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Не менш важливим представляється питання коректного застосування математичних моделей властивостей матеріалів і розрахункових методик, описаних у нормативній документації. Сучасні норми багатьох країн, зокрема країн Євросоюзу та Російської Федерації, наряду із спрощеними методами, що базуються на інженерних методиках розрахунку опору матеріалів, рекомендують застосування уточнених методів, які засновані на використанні узагальнених методів теорії пружності, теорії пластичності та теорії руйнування. Тим не менше, в даних нормах немає чітких рекомендацій щодо вибору базових математичних моделей поведінки залізобетону та чисельної реалізації рівнянь НДС. Крім цього, у нормативних документах, наприклад [2 – 5], дані чіткі математичні моделі властивостей матеріалів, що зумовлює необхідність їхнього застосування для розрахунків меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій у проектуванні будівель та споруд на практиці.

Постановка завдання. Зважаючи на викладене, поставлена мета роботи, полягає у створенні методології для рішення практичних проектних задач щодо визначення вогнестійкості залізобетонних балок, заснованої на базових нормативних документах із застосуванням уточнених методів.

Виклад основного матеріалу. На основі аналізу моделей силового опору елементів залізобетонних конструкцій при механічних та температурних навантаженнях, які, наприклад, подані в роботах [6 – 9], нами був запропонований узагальнений інженерний підхід до чисельної реалізації уточненого розрахункового методу щодо визначення меж вогнестійкості елементів несучих залізобетонних конструкцій при їхній роботі в умовах вогневого впливу «стандартної» пожежі. Узагальнений інженерний підхід базується на таких положеннях

1. Для розрахунку використовуються базові рівняння методу кінцевих елементів у нелінійній постановці [6 – 9].

2. При стисканні бетону і роботі арматури враховується їх пластична деформація із застосуванням асоціативної теорії пластичної деформації за моделлю Беселінга [9].

3. Для реалізації моделі пластичності застосовуються математичні моделі механічних властивостей бетону та арматурної сталі у вигляді діаграм «напруження-деформація» із спадною гілкою [6 – 9].

4. При розтягуванні у бетоні можуть з'являтися тріщини, що відповідним чином враховується теорією міцності Willam та Warnke [6, 7, 9] та введенням відповідної ортотропії властивостей при модифікуванні матеріальних матриць.

5. Для розв'язання базової системи рівнянь МКЕ в нелінійній постановці застосовується метод Ньютона-Рафсона із покроковим прикладанням навантажень згідно з історією навантажень [6 – 9].

6. Настання межі вогнестійкості, тобто граничного стану втрати несучої здатності, ідентифікується за ознакою появи пластичного шарніру. Ознакою появи пластичного шарніру є досягнення критичних величин максимального прогину, або критичних величин швидкості нарощування максимального прогину [1].

Для попереднього дослідження адекватності математичних моделей властивостей матеріалів при дії тільки механічних навантажень була досліджена залізобетонна балка, математична модель якої була розглянута в [12]. Геометрія та розрахункова схема цієї балки подана на рис. 1.

Математичні моделі механічних властивостей та міцнісні характеристики бетону і арматурної сталі подані відповідно у табл. 1 та табл. 2.

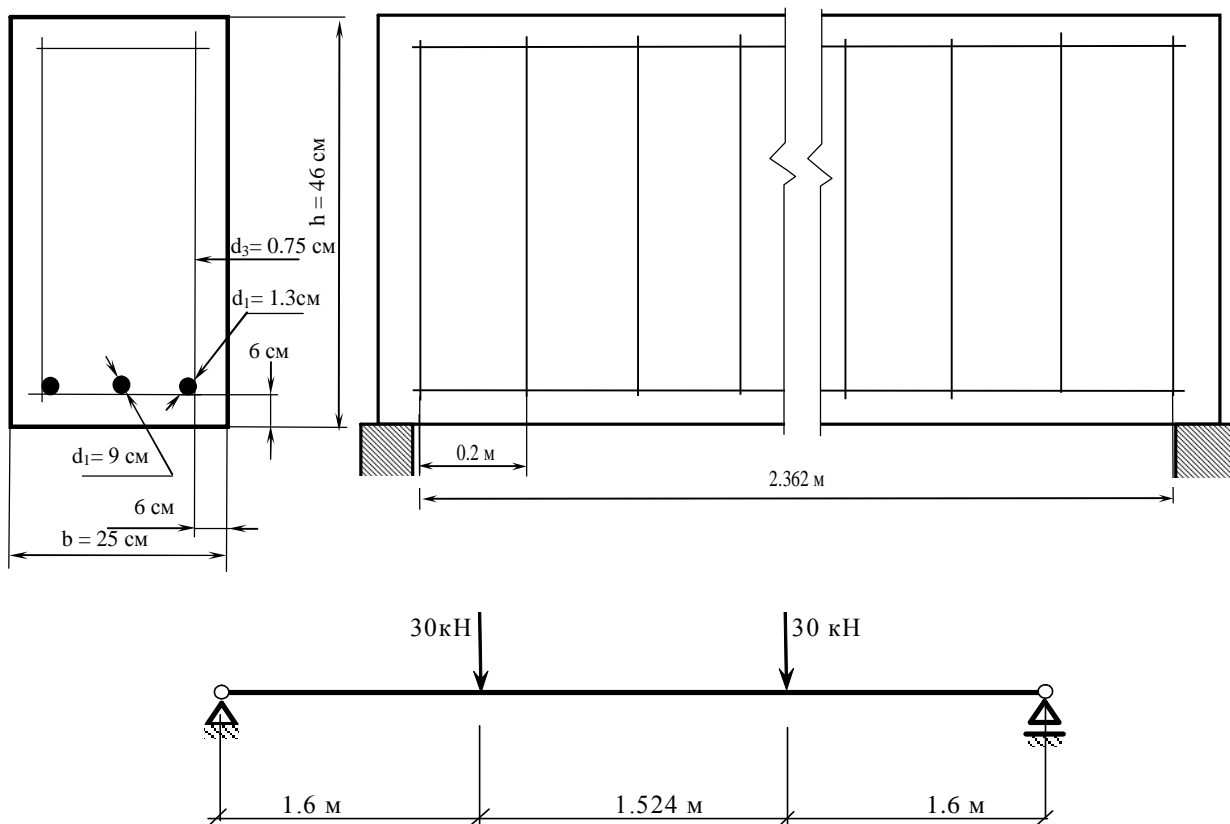


Рис. 1. Геометричні параметри та розрахункова схема залізобетонної балки

Таблиця 1

Механічні характеристики бетону і арматурної сталі

№, п/п	Напруження у бетоні, МПа; граничні деформації бетону	Напруження в арматурі, МПа; граничні деформації арматурної сталі	Джерело
1	2	3	4
1.	при $0 < \varepsilon_b < \varepsilon_{b1}$ $\sigma_b = E_{b,red,T} \varepsilon_b$ при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}$ (сжатие), $\sigma_b = R_{b,T}$ (розтяг)	при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.	[3]
2.	при $0 < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{c1,T}$ $\sigma(\varepsilon) = \frac{3\varepsilon_b R_{b,T}}{\varepsilon_{c1,T} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{c1,T}} \right)^3 \right)}$ при $\varepsilon_{c1,T} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b2}$ $\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} - \frac{R_{b,T} (\varepsilon_b - \varepsilon_{c1,T})}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{c1,T}}$	при $0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy}$ $\sigma_s = R_{sp,T} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_s)^2]^{0,5}$, при $\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st}$ $\sigma_s = R_{s,T}$, при $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T} [1 - (\varepsilon_s - \varepsilon_{st}) / (\varepsilon_{s0} - \varepsilon_{st})]$, при $\varepsilon_{s2} < \varepsilon_s$ $\sigma_s = 0$, $a^2 = (\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp} + c/E_{s,T})$, $b^2 = c(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} + \frac{c^2}{(R_{s,T} - R_{sp,T})^2}$ $c = \frac{c^2}{(\varepsilon_{sy} - \varepsilon_{sp})E_{s,T} - 2(R_{s,T} - R_{sp,T})}$	[5]
3.	$\sigma(\varepsilon) = R_{b,T} \cdot \left(a_1 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right) + a_2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^3 + a_4 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^4 + a_5 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bRT}} \right)^5 \right)$ $K_{bT} = 2 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,003 \cdot T + 0,9119$ $\gamma_{bT} = -8 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,0006 \cdot T + 1,0213$ $a_1 = 2,143; a_2 = -1,118; a_3 = -0,205;$ $a_4 = 0,217; a_5 = -0,023; \varepsilon_{bR} = 0,0018$	Для арматури з фізичною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$. Для арматури з умовною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s1} = 0,8 R_{s,T} / E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s2,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s2,T} + 0,002$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = E_{s3,T} \varepsilon_s$; $\varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$	[10]
4.	при $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$ $\sigma_b = E_{b,T} \varepsilon_b, \varepsilon_{b1} = \frac{0,4 R_{b,T}}{E_{b,T}}$ при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$ $\sigma = \left(2,2 \cdot 14 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}} \right)^3 \right) R_{b,T}$ $\varepsilon_{b0} = 0,002 \left(1 + 5 \left(\frac{T}{1000} \right)^{1,7} \right);$ при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T} - \frac{R_{b,T} - p}{\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0}} \varepsilon_b$ $\varepsilon_{b2} = 1,6 \varepsilon_{b0}$ $p = \frac{(\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) R_{b,T}}{1,8((\varepsilon_b / \varepsilon_{b0}) - 1)^2 + (\varepsilon_b / \varepsilon_{b0})}$	при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T} \varepsilon_s; \varepsilon_{s0} = R_{s,T} / E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}; \varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$.	[11]

1	2	3	4
5.	<p>при $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$ $\sigma_b = E_{b,T} \varepsilon_b, \varepsilon_{b1} = 0,6 \frac{R_{b,T}}{E_{b,T}},$</p> <p>при $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b0}$ $\sigma_b = 0,6R_{b,T} + \frac{R_{b,T}(1-0,6)}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} \varepsilon_b,$</p> <p>$\varepsilon_{b0}$ – табл. значення при $\varepsilon_{b0} < \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$ $\sigma_b = R_{b,T}, \varepsilon_{b2} = 1,7\varepsilon_{b0}$</p>	<p>Для арматури з фізичною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s,T}\varepsilon_s; \varepsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = R_{s,T}; \varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}.$</p> <p>Для арматури з умовною межею текучості при $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s1}$ $\sigma_s = E_{s,T}\varepsilon_s; \varepsilon_{s1} = 0,8 R_{s,T}/E_{s,T}$ при $\varepsilon_{s1} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s0}$ $\sigma_s = E_{s2T}\varepsilon_s;$ $\varepsilon_{s0} = R_{s,T}/E_{s2T} + 0,002$ при $\varepsilon_{s0} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s2}$ $\sigma_s = E_{s3T}\varepsilon_s; \varepsilon_{s2} = k_\varepsilon \varepsilon_{s0}$</p>	[2]

Таблиця 2

Міцнісні характеристики бетону і арматурної сталі

Міцнісні параметри	Познач.	Одиниці вимірювання	Значення згідно з [12]
Бетон			
Міцність при стиску	R_b	МПа	33
Міцність при розтягу	R_{bt}	МПа	3.58
Модуль пружності	E_b	МПа	$2,723 \times 10^4$
Коефіцієнт Пуасона	ν_b		0,3
Арматурна сталь			
Міцність при стиску	R_a	МПа	401
Міцність при розтягу	R_{at}	МПа	401
Модуль пружності	E_a	МПа	2.1×10^5
Коефіцієнт Пуасона	ν_a		0,3

В процесі розрахунку навантаження збільшувалося поступово до руйнуючих значень. Результати розрахунку показані на рис. 2.

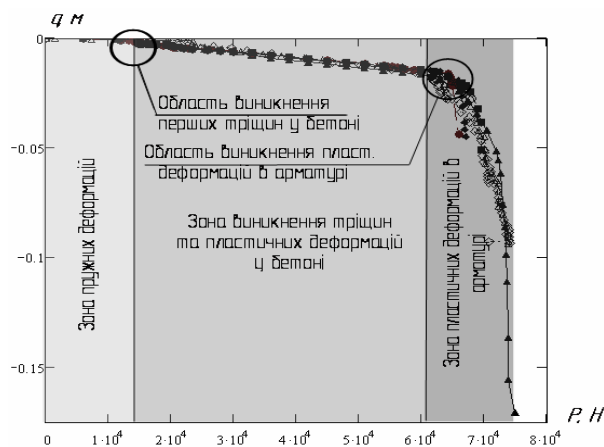


Рис 2. Графіки максимальних прогинів залізобетонної балки для різних математичних моделей механічних властивостей бетону і арматурної сталі:

▲▲▲ – Eurocode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5]; ◆◆◆ – СТО 36554501-006-2006 [3]; ●●● – МДС 21-2-2000 [2]; ■■■ – згідно з дослідженнями Т.Т. Ліе [11]; ⊖⊖⊖ – згідно з дослідженнями С.Л. Фоміна [10]; ▲▲▲ – згідно з розрахунком А.С. Воланьскі [12]; ◇◇◇ – дані випробувань Е.Р. Вукхузе [12]

Аналіз результатів розрахунку у порівнянні з експериментальними даними показав, що найбільшою адекватністю володіють математичні моделі згідно з Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004. Окрім цього, вони мають, ряд таких переваг, які полягають у наступному:

1. При навантаженнях, близьких до руйнуючих, пластичні деформації не призводять до миттєвої деструкції, дозволяючи врахувати великі прогини зігнутих елементів залізобетонних конструкцій.

2. В порівнянні з іншими моделями на стадії, близькій до руйнування, найбільш адекватно описується процес пластичної деформації, що дуже важливо при накопиченні дефектів в бетоні і арматурі при температурній дії пожежі.

Таблиця 3

Параметри залізобетонних балок для моделювання їх поведінки під час пожежі

№, п/п	Конструкція балки	Дані щодо бетону				Дані щодо арматури			Джерело
		Марка бетону	Міцність на сти-скання, МПа	Густина, кг/м ³	Вологість, %	Конструктивні особливості робочої арматури	Міцність, МПа	Нормативне навантаження, кПа	
1.	Звичайна з/б балка з прямокутним перерізом 3,2×0,2×0,35	B30	20	2320	2	3Ø18 АІІ (А300)	300	7,9	[1]
2.	Попередньо напружена з/б балка з прямокутним перерізом 3,2×0,15×0,35	B40	27	2340	1,3	3Ø16 АІV (А600)	600	7,9	

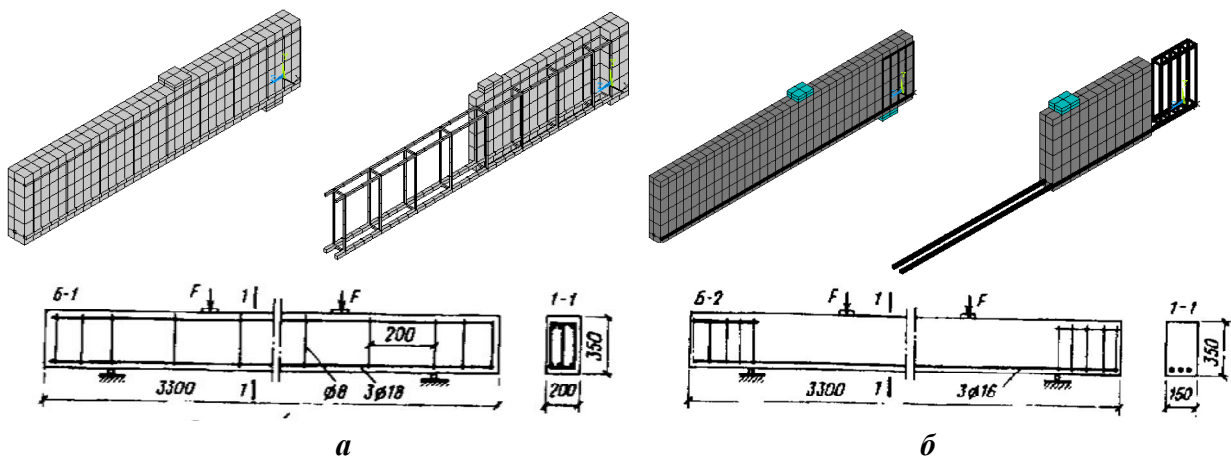


Рис. 3. Кінцевоелементні моделі залізобетонних балок:
а – звичайної; б – попередньо напруженої

Для дослідження адекватності моделей механічних властивостей бетону і арматурної сталі необхідно провести чисельний експеримент на математичних моделях елементів залізобетонних конструкцій, для яких відомі результати випробувань на вогнестійкість і вибрати найбільш оптимальні. В якості таких об'єктів пропонується використовувати статично визначені зігнуті елементи залізобетонних конструкцій, в даному випадку звичайні і попере-

дно напружені залізобетонні балки. Основні параметри модельних об'єктів наведені в табл. 3. Ці об'єкти були вибрані, оскільки відомі дані їх натурних вогневих випробувань [1].

Використовуючи дані [1] і дані табл. 1 і табл. 3, були створені кінцевоелементні моделі, показані на рис. 3.

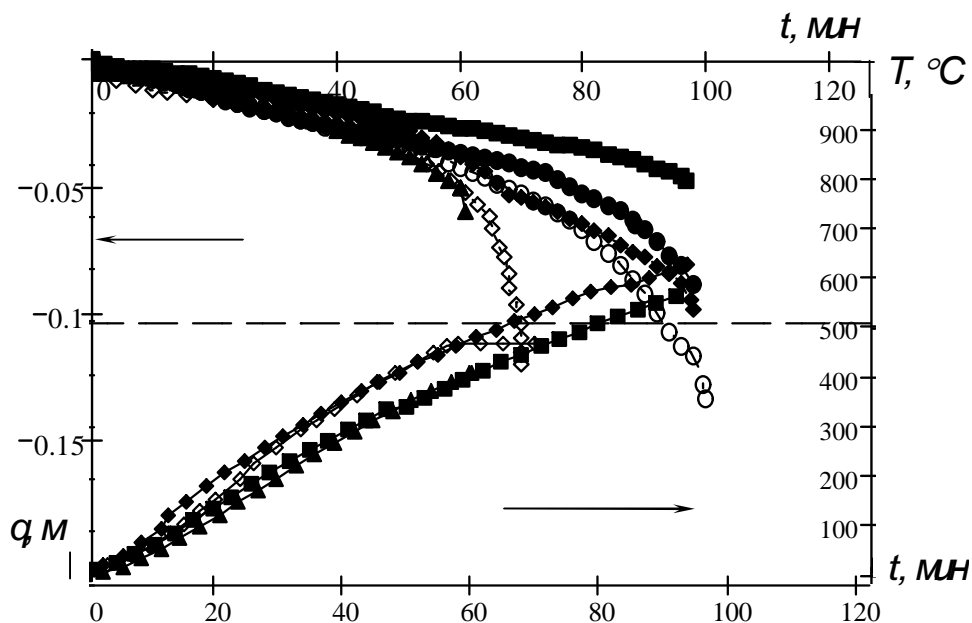


Рис 4. Графіки максимальних прогинів та температур в арматурі для залізобетонної балки №1:

▲▲▲ – Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5]; ◆◆◆ – СТО 36554501-006-2006 [3]; ●●● – МДС 21-2-2000 [2]; ■■■ – згідно з дослідженнями Т.Т. Ліє [11]; ○○○ – згідно з дослідженнями С.Л. Фоміна [10]; ◇-◇ – за даними випробувань [1].

Використовуючи дані [2–5], були розв'язанні теплофізичні задачі і одержані температурні розподіли в перерізах балок. Після цього розв'язувалися міцнісні задачі з урахуванням даних табл. 1 і табл. 3. При розрахунку поетапно відтворювалася історія навантаження балок у три стадії. На першій стадії моделювалося попереднє напруження арматури, на другій - прикладання нормативного механічного навантаження. На останній стадії як навантаження прикладалися розподіли температури до вузлів кінцевих елементів. Результати розрахунку для ненапруженої балки №1 показані на рис. 4.

При визначенні межі вогнестійкості балок розглядалося три підходи. Перший запропонований в [1] на основі додаткових зображень на графіках прогинів у вигляді прямих, дотичних на ділянці до утворення пластичного шарніру і після утворення пластичного шарніру. На перетині цих прямих знаходиться точка де досягається межа вогнестійкості. Інші два підходи засновані на визначенні критичних значень максимального прогину і критичних значень швидкості нарощування максимального прогину, що відповідно визначаються за формулами.

$$D = \frac{L^2}{400b}; \frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000b} \quad (1)$$

де L – розрахункова довжина елемента,
 b – розрахункова висота перерізу.

Результати визначення меж вогнестійкості залізобетонних балок за трьома вказаними підходами подані у табл. 4.

Таблиця 4

Межі вогнестійкості залізобетонних балок

№ п/п	Властивості матеріалів згідно з:	1 підхід, U_1 , хв	2 підхід, U_2 , хв	3 підхід, U_3 , хв
Балка №1				
1.	Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5]	60	61	62
2.	СТО 36554501-006-2006 [3]	94	86	97
3.	МДС 21-2-2000 [2]	95	93	98
4.	дослідженнями С.Л. Фомина [10]	92	83	92,5
5.	дослідженнями Т.Т. Lie [11]	96	--	97
6.	експериментальними даними [1]	63	67	65,5
Балка №2				
1.	Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5]	62	64	63,1
2.	СТО 36554501-006-2006 [3]	77	--	78,2
3.	МДС 21-2-2000 [2]	84	85	84,4
4.	дослідженнями С.Л. Фомина [10]	91	93	91,9
5.	дослідженнями Т.Т. Lie [11]	85	87	85,5
6.	експериментальними даними [1]	67	71	67

Висновки. Аналізуючи отримані результати, можна відзначити, що найадекватнішими є математичні моделі властивостей бетону і арматурної сталі, запропоновані в Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5] і СТО 36554501-006-2006 [3]. Найточніші результати для попередньо ненапружених елементів отримані для математичних моделей властивостей Eurokode 2 EN 1992-1-2: 2004 [5], при цьому спостерігається деяке завищення результатів при визначенні межі вогнестійкості. Менш точними є результати, одержані при використанні математичних моделей властивостей згідно із СТО 36554501-006-2006 [3], але при цьому більш точно визначається межа вогнестійкості для попередньо напружених елементів.

В цілому, не дивлячись на високу точність відтворення поведінки зігнутих елементів при дії пожежі, межі вогнестійкості визначаються з досить високою похибкою, яка неприйнятна для практичного використання. Тому ці розрахункові процедури можуть застосовуватися тільки на стадії проектування і повинні бути підтверджені натурними експериментальними дослідженнями. Щоб цей розрахунковий метод дійсно став реальною альтернативою натурним вогневим випробуванням необхідно проаналізувати джерела похибок і, по можливості, зменшити їх вплив за допомогою додаткових досліджень.

В даному випадку до джерел похибок слід віднести:

1. Неточне визначення температурних навантажень на стадії рішення теплотехнічної задачі. При цьому причинами можуть бути відхилення реальних теплофізичних характеристик бетону від прийнятих, невідповідність реальних граничних умов прийнятим, груба розрахункова сітка МКЕ. При цьому з перерахованих причин, як показують дослідження, найбільший вплив при використанні рекомендацій під час реалізації граничних умов і МКЕ-моделей на похибку має задання математичних моделей теплофізичних характеристик бетону з урахуванням його вологості і густини.

2. Неточне задання міцнісних і деформативних властивостей бетону і арматурної сталі, неточності при заданні закріплення і навантаження, невдале накладення розрахункової сітки. При цьому з перерахованих причин, як показують дослідження, найбільший вплив на погрішність має неточне задання математичних моделей міцнісних і деформативних параметрів бетону і арматури, оскільки характер переміщень елементів залежить від характеру виникнення і розвитку пластичних деформацій в бетоні і арматурі.

Перспективи подальших досліджень. Збільшити точність і адекватність математичних моделей розглянутого методу можна при проведенні комплексу лабораторних

експериментів, уточнюючих теплофізичні характеристики і механічні властивості бетону, а також механічні властивості арматури в умовах нагріву.

Список літератури:

1. Мосалков И.Л. Огнестойкость строительных конструкций / Мосалков И.Л., Плюснина Г.Ф., Фролов А.Ю. – М.: ЗАО «СПЕЦТЕХНИКА», 2001. – 496 с.
2. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций. МДС 21.2 – 2000 [Введен в действие 2000-01-01] – М., 2000. – 49 с. – (Национальный стандарт РФ).
3. СТО 36554501-006-2006 Правила по обеспечению огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций.
4. Правила по обеспечению огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций. СТО 36554501-006-2006 – [Введен в действие 1996-01-01] – М., 2006. – 77 с. – (Национальный стандарт РФ).
5. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2004.
6. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в механике железобетона : [монография] / Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. – Одесса: ОНМУ, 2007. – 110 с.
7. Карпенко Н.И. Определяющие соотношения для железобетона с трещинами при термосиловых воздействиях / Карпенко Н.И., Клованич С.Ф. // Строительная механика и расчет сооружений. – 1983. – №2. – С. 141 – 165.
8. Сахаров В.С., Кислоокий В.Н., Киричевский В.Р. и др. Метод конечных элементов в механике твердого тела. – К.: Вища школа, 1982 – 480 с.
9. ANSYS Release 10, Inc. Theory Reference.
10. Фомин С.Л. Работа залізобетонних конструкцій при впливі кліматичного, технологічного і пожежного середовища: автореф. дис-ї на здоб. наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека». / С.Л. Фомін. – Харків, 1997. – 38 с.
11. Lie T.T. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members. International Seminar on Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983/pp.139-153.
12. Anthony J. Wolanski. Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis. Milwaukee, Wisconsin. 2004. 87p.

Поздеев С.В., канд. техн. наук, доцент (Академия пожарной безопасности имени Героев Чернобыля)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

В статье проведено математическое моделирование поведения железобетонной балки во время пожара при помощи метода конечных элементов. При этом рассмотрены математические модели материалов, приведенные в современных нормативных документах. В результате проведенных исследований определены фактические пределы огнестойкости и определены наиболее эффективные математические модели для выполнения расчетов на огнестойкость изгибаемых железобетонных элементов. Рассмотрены особенности и область применения базовых математических моделей для моделирования поведения железобетона при пожаре для определения пределов огнестойкости несущих железобетонных строительных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, огнестойкость, математическое моделирование, метод конечных элементов.