

УДК 624.042.5

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ
ТЕМПЕРАТУРИ У ЗАЛІЗОБЕТОННІЙ ПЛИТІ ПРИ ДІЇ ВОГНЕВОГО
ВПЛИВУ**

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЕ
ПРИ ОГНЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN
FIRE EXPOSED REINFORCED CONCRETE SLAB**

Була С.С., к.т.н., старший викладач (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів), **Бойко Р.О., аспірант** (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів)

Була С.С., к.т.н., старший преподаватель (Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов), **Р.О. Бойко, аспирант** (Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов)

Bula S. S., Ph.D. (National University "Lviv Polytechnic", Lviv), **Bojko R.O., Postgraduate** (National University "Lviv Polytechnic", Lviv)

Дана стаття присвячується проблемам удосконалення і розвитку методів проведення теплотехнічних розрахунків залізобетонних конструкцій при дії вогневого впливу. Наводиться порівняння результатів розрахунку за інженерним методом і методом скінчених елементів.

Данная статья посвящается проблемам совершенствования и развития методов проведения теплотехнических расчетов железобетонных конструкций при огневом воздействии. Приводится сравнение результатов расчета за инженерным методом и методом конечных элементов.

This article is devoted to the problems of upgrading and developing of methods for the thermal calculations of reinforced concrete structures under the action of fire exposure. The results of calculation for the engineering method and finite element method are compared.

Ключові слова:

Розподіл температур, залізобетонні елементи.

Распределение температур, железобетонные элементы.

Distribution of temperature, concrete elements.

Вступ. На даний момент немає чинних вітчизняних норм, що однозначно регламентують методики теплотехнічних розрахунків при вогневому впливі.

Основні інженерні методи визначення розподілу температур в перерізах залізобетонних конструкцій, що реалізовані в “Рекомендациях по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций” [1] не враховують залежності теплофізичних характеристик матеріалів від температури конструкції (теплопровідності і теплоємності) і можуть використовуватися тільки для стандартних температурних режимів.

Також важливим є вивчення можливості моделювання різноманітних теплофізичних процесів в програмних комплексах, заснованих на методи скінчених елементів. Адже при комп’ютерному моделюванні існує можливість врахувати різноманітні фактори, що при інженерних методах створює певні труднощі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У вищезгаданих “Рекомендациях по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций” [1] наводиться наступна методика теплотехнічного розрахунку.

Повний тепловий потік до одиниці поверхні конструкції Q (кВт/м²) включає в себе конвективний і радіаційний теплові потоки:

$$Q = Q_c + Q_r \quad (1)$$

Конвективний тепловий потік Q_c визначається за формулою:

$$Q_c = \alpha_c \cdot (t - t_e) \quad (2)$$

Радіаційний тепловий потік Q_r визначається за формулою:

$$Q_r = 5,67 \cdot \varepsilon_{red} \cdot \left[\left(\frac{t + 231}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_e + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3)$$

Також при теплотехнічному розрахунку використовується приведений коефіцієнт температуропровідності α_{red} , що визначається за формулою:

$$\alpha_{red} = \frac{3,6 \cdot \lambda(450)}{[C(450) + 0,05 \cdot w] \cdot \rho} \quad (4)$$

Позначення у формулах наведені відповідно до [1].

Визначення температури бетону в будь-якій точці перерізу виконується у наступній послідовності:

- визначають приведену віддаль до точки розрахунку для бетону:

$$x_i^* = x_i + \varphi_1 \cdot \sqrt[2]{\alpha_{red}} \quad (5)$$

де x_i - віддаль від розрахункової точки до i -тої обігрваної поверхні, м,

φ_1 - коефіцієнт, що залежить від густини бетону [1].

- визначають відносну віддаль до розрахункової точки:

$$r_i = \frac{x_i^*}{l} \leq 1 \quad (6)$$

де l - товщина бетону, що почала прогріватися, м,

$$l = \sqrt[2]{12 \cdot \alpha_{red} \cdot \tau} \quad (7)$$

де τ - час прогріву конструкції, год.

- температуру бетону в будь-якій точці перерізу при односторонньому нагріві визначають за наступною формулою:

$$T = 20 + 1200 \cdot (1 - r_1)^2 \quad (8)$$

Альтернативним методом виконання теплотехнічного розрахунку є використання програмних комплексів на основі методу скінчених елементів. Одним з таких програмних комплексів є ПК "Elcut"[2]. Даний програмний комплекс може виконувати лінійний і нелінійний стаціонарний температурний аналіз в плоскій і асиметричній постановці. Моделювання завдання ґрунтується на стаціонарному рівнянні теплопровідності з граничними умовами радіаційного та конвективного теплообміну. В процесі роботи з програмним комплексом можна використовувати широкі можливості, основні з яких наведені нижче.

Властивості середовищ: ортотропні матеріали з постійною теплопровідністю, ізотропні матеріали з теплопровідністю, що залежить від температури, матеріали з теплоємністю, що залежить від температури.

Джерела поля: постійні і залежні від температури об'ємні джерела теплової потужності, конвективні та радіаційні джерела.

Граничні умови: задана температура, заданий тепловий потік на межі елемента, умови радіаційного та конвективного теплообміну.

Результати розрахунку: температура, градієнт температури, щільність теплового потоку та інтегральні значення теплового потоку через задані поверхні, графіки і таблиці зміни фізичної величини в залежності від часу (для нестаціонарної задачі).

Спеціальні можливості: інтегральний калькулятор може обчислювати різні інтегральні значення на заданих лініях і поверхнях. Розподіл температури може бути передано в задачу розрахунку механічного напруженого стану (сполучена термо - механічна задача). Можна передати розподіл температури в задачу нестаціонарної теплопередачі, де вона буде використана в якості початкового розподілу температури.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення розподілу температури у залізобетонній плиті за двома методами при односторонньому нагріві та порівняння отриманих даних. Методом дослідження є чисельний розрахунок відповідно до вище описаних методик.

Основний матеріал і результати. Досліджувану залізобетонну плиту приймаємо товщиною 160 мм, виконану з бетону класу C20/25 з густиною

$\rho = 2350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ на карбонатних заповнювачах і з вологістю під час експлуатації $w = 2\%$.

Теплотехнічний розрахунок досліджуваної конструкції за інженерною методикою [1]:

Теплопровідність і теплоємність даного бетону при температурі 450⁰С будуть рівні [1]:

$$\lambda(450) = 1,2 - 0,00035 \cdot 450 = 1,0425 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}} \quad (9)$$

$$C(450) = 0,71 + 0,00083 \cdot 450 = 1,0835 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \quad (10)$$

Таким чином коефіцієнт температуропровідності бетону буде рівний:

$$\alpha_{red} = \frac{3,6 \cdot \lambda(450)}{[C(450 + 0,05 \cdot w)] \cdot \rho} = \frac{3,6 \cdot 1,0425}{[1,0835 + 0,05 \cdot 2] \cdot 2350} = 0,00135 \frac{\text{м}^2}{\text{год}} \quad (11)$$

Для розрахунку розподілу температури в перерізі плити розбиваємо її переріз на окремі елементарні елементи, як показано на рис. 1, для яких будемо визначати температуру. Елементарні елементи виберемо в формі смуги товщиною 8 мм. Біля поверхні конструкції згущуємо сітку розбиття в 2 рази до елементів товщиною 4 мм, оскільки тут спостерігається великий градієнт температур.

Модель впливу пожежі на даний елемент відповідає розрахунковому випадку при нагріві з однієї сторони (рис. 2).

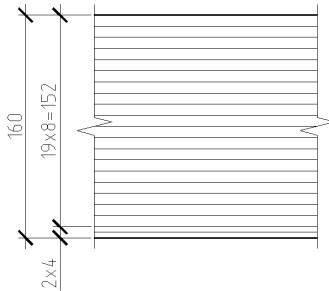


Рис. 1. Розрахунковий переріз з сіткою скінчених елементів



Рис. 2. Розрахункова модель впливу на переріз

Відповідно до вищенаведеного алгоритму визначаємо наступні величини.

$$x_i^* = x_i + \varphi_1 \cdot \sqrt[3]{\alpha_{red}} = 0,004 + 0,62 \cdot \sqrt[3]{0,00135} = 0,0268\text{м} \quad (12)$$

$$l = \sqrt[3]{12 \cdot \alpha_{red} \cdot \tau} = \sqrt[3]{12 \cdot 0,00135 \cdot 2} = 0,18\text{м} \quad (13)$$

$$r_i = \frac{x_i^*}{l} = \frac{0,0268}{0,18} = 0,1489 \leq 1 \quad (14)$$

Отже, температура в т. А ($x_i=4$ см) після дії пожежі в 2 год буде рівна:

$$T = 20 + 1200 \cdot (1 - r_i)^2 = 20 + 1200 \cdot (1 - 0,1489)^2 = 889^\circ\text{C} \quad (15)$$

Аналогічно розраховується температура в кожній точці перерізу. Для цього розрахунку був складений алгоритм в редакторі “Excel”. Результати розрахунку, а саме температури прогріву даного перерізу, показано в табл.1 і рис. 3.

Таблиця 1

Значення температур прогріву розрахункового перерізу плити при дії пожежі протягом 2 год

Вертикальна координата, мм	Температура, °C	Вертикальна координата, мм	Температура, °C
0	935	80	241
4	889	88	197
8	845	96	159
16	759	104	125
24	677	112	96
32	601	120	71
40	529	128	52
48	462	136	37
56	399	144	26
64	342	152	21
72	289	160	20

Теплотехнічний розрахунок досліджуваної конструкції в ПК “Elcut”

Згідно з [2] матеріал конструкції в ПК “Elcut” описується наступними чином:

- *теплопровідність*: задається в нелінійній постановці в залежності від температури конструкції: $\lambda = 1,2 - 0,00035 t$, Вт/(м · °C) [1];

- *теплоємність*: задається в нелінійній постановці в залежності від температури конструкції: $C = 0,71 + 0,00083 t$, кДж/(кг · °C) [1];

- *густина матеріалу*: $\rho = 2350$ кг/м³

Граничні умови при побудові задачі задаються для граней перерізу конструкції. Для граней задаємо наступні граничні умови:

- *конвекція*:

$$q = \alpha_c \cdot (T - T_0) \quad (16)$$

- *температура середовища (з нагрітої сторони)* [1]:

$$t = 345 \cdot \lg(480 \cdot \tau + 1) + 20 \quad (17)$$

- *радіація*:

$$q = \varepsilon_{red} \cdot k_{sb} \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Позначення в формулах прийняті відповідно до [2].

Для розрахунку в ПК “Elcut” вводимо геометрію перерізу плити. Розмір одного СЕ приймаємо 0,016 м. Було змодельовано нагрів з однієї сторони плити (знизу). Результати розрахунку показані на рис. 4.

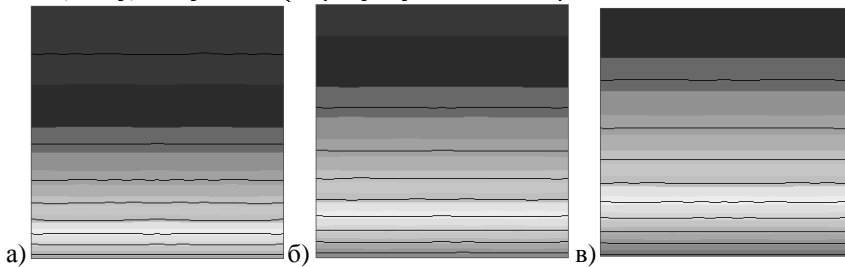


Рис. 4. Розподіл температур в плиті при: а) 60 хв., б) 90 хв., в) 120 хв.

Аналіз результатів. Результати розрахунку за двома методами подані на рис. 5. У якості контрольних приймаємо експериментальні результати розподілу температур, що подані в нормативному документі [3].

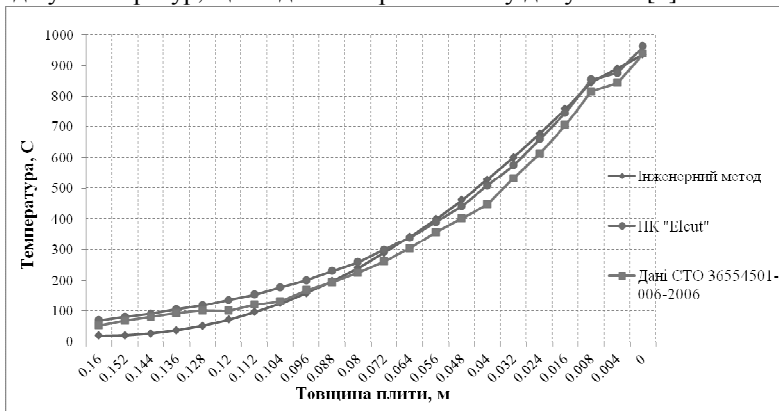


Рис. 5. Розподіл температур по товщині плити тривалістю 2 год.

Висновки. Проведені розрахунки показують можливість застосування різноманітних методів для визначення розподілу температур в перерізах різних будівельних конструкцій із задовільною збіжністю.

Аналізуючи результати розрахунку, можна сказати, що визначення розподілу температур за допомогою ПК “Elcut” на 32,3% (ненагріта поверхня) та на 2,4% (нагріта поверхня) точніші в порівнянні з використанням інженерного методу. Це свідчить про необхідність розвитку, вдосконалення та використання розрахункових комплексів на основі методу скінчених елементів у інженерних розрахунках при вирішенні практичних задач.

1. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ; - М.: Стройиздат, 1986. – 40с. 2. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов ELCUT. Руководство пользователя / ООО “ТОР”; - С-П.: ООО “ТОР”, 2003. – 252 с. 3.СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. – введен 20 октября 2006 г. -М.: ФГУП «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО», 2006 – 81с.