

УДК 614.841.332:624.012.4

С.В. Новак, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., О.П. Якименко, канд. техн. наук, М.Б. Григор'ян

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОКРИТТІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОПРАВ ТУНЕЛЬНИХ СПОРУД

Наведено основні етапи експериментально-розрахункового методу визначення вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд. Показана необхідність і надані результати щодо обґрунтування мінімальної кількості зразків для експериментального визначення температур і порядку сплайн-апроксимації теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів.

Ключові слова: експериментально-розрахунковий метод, вогнезахисна здатність, вогнезахисне покриття, математична модель, теплофізичні характеристики, залізобетонні оправи.

S. Novak, Cand. of Sc. (Eng.), Sen. St. Sc., O. Yakimenko, Cand. of Sc. (Eng.), M. Grigor'yan

METHODICAL ENSURING OF APPLICATION OF AN EXPERIMENTAL AND CALCULATION METHOD FOR THE DETERMINATION OF FIRE RETARDANT CAPABILITY OF THE COATINGS OF FERROCONCRETE CASES FOR TUNNEL STRUCTURES

The main stages of an experimental and calculation method for the determination of fire retardant capability of the coatings of ferroconcrete cases for tunnel structures are expounded. Necessity is shown and results are rendered for the substantiation of the minimum number of test samples necessary for the experimental determination of the temperature values and spline approximation of thermal and physical characteristics of fire retardant coatings.

Keywords: experimental and calculation method, fire retardant capability, fire retardant coating, mathematical model, thermal and physical characteristics, ferroconcrete cases.

Для визначення характеристики вогнезахисної здатності матеріалів найбільш ефективним є застосування експериментально-розрахункових методів, які ґрунтуються на математичному моделюванні теплових процесів у конструкціях в умовах пожежі й розв'язанні прямих та обернених задач теплопровідності [1, 2]. Такий метод було застосовано, зокрема, для оцінювання здатності вогнезахисних покриттів та облицювань забезпечувати вогнезахист залізобетонних оправ тунельних споруд [2]. Він містить такі основні етапи:

- експериментальне визначення температури в зразках залізобетонних оправ з вогнезахисним покриттям за умов стандартного температурного режиму;
- визначення теплофізичних характеристик (ТФХ) вогнезахисного покриття шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ);
- розрахунок значень необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, які забезпечують нормовані значення межі вогнестійкості залізобетонних оправ для різних температурних режимів, шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності (ПЗТ).

Для зазначених експериментально-розрахункових методів необхідно розробляти відповідне методичне забезпечення при їх застосуванні для визначення характеристики вогнезахисної здатності матеріалів для будівельних конструкцій різного призначення. В

методичному забезпеченні слід визначити мінімальну кількість зразків для випробувань, метод та параметри ідентифікації властивостей матеріалів тощо.

У даній роботі наводяться результати досліджень, які було проведено для розроблення методичного забезпечення застосування експериментально-розрахункового методу визначення вогнезахисної здатності покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд. Метою цих досліджень було обґрунтування необхідної і достатньої кількості зразків для проведення експериментального визначення температур у них та обґрунтування параметрів теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, що ідентифікуються, шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності за даними термометрії зразків.

Під час обґрунтування оптимальної кількості зразків для експериментального визначення температурних полів було проведено дослідження впливу похибки у вимірюванні температури на їх обігрівній поверхні під шаром вогнезахисного покриття, а також похибки у завданні теплофізичних характеристик бетону на точність визначення вогнезахисної здатності покриттів. За оптимальну кількість зразків приймали таку їх кількість, за якої досягається прийнятна точність у визначенні необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття, а збільшення цієї кількості не призводить до значного зменшення похибки у визначенні цієї товщини. Для зазначених досліджень застосовували метод обчислювального експерименту [2, 3] та алгоритм, який наведено на рисунку 1.

Товщину вогнезахисного покриття визначали шляхом розв'язання ПЗТ таким чином, щоб температура T_B на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття для заданого часу, який відповідає нормованій межі вогнестійкості, становила $T_{кр\ B} = 380$ °С. Це значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття приймали за «точне» (b_T). Отримані значення температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття приймали як «точні» експериментальні дані. У ці «точні» експериментальні дані за допомогою генератора випадкових чисел вносили випадкові похибки, і в подальшому такі «збурені» дані застосовували як вихідні для розв'язання ОЗТ.

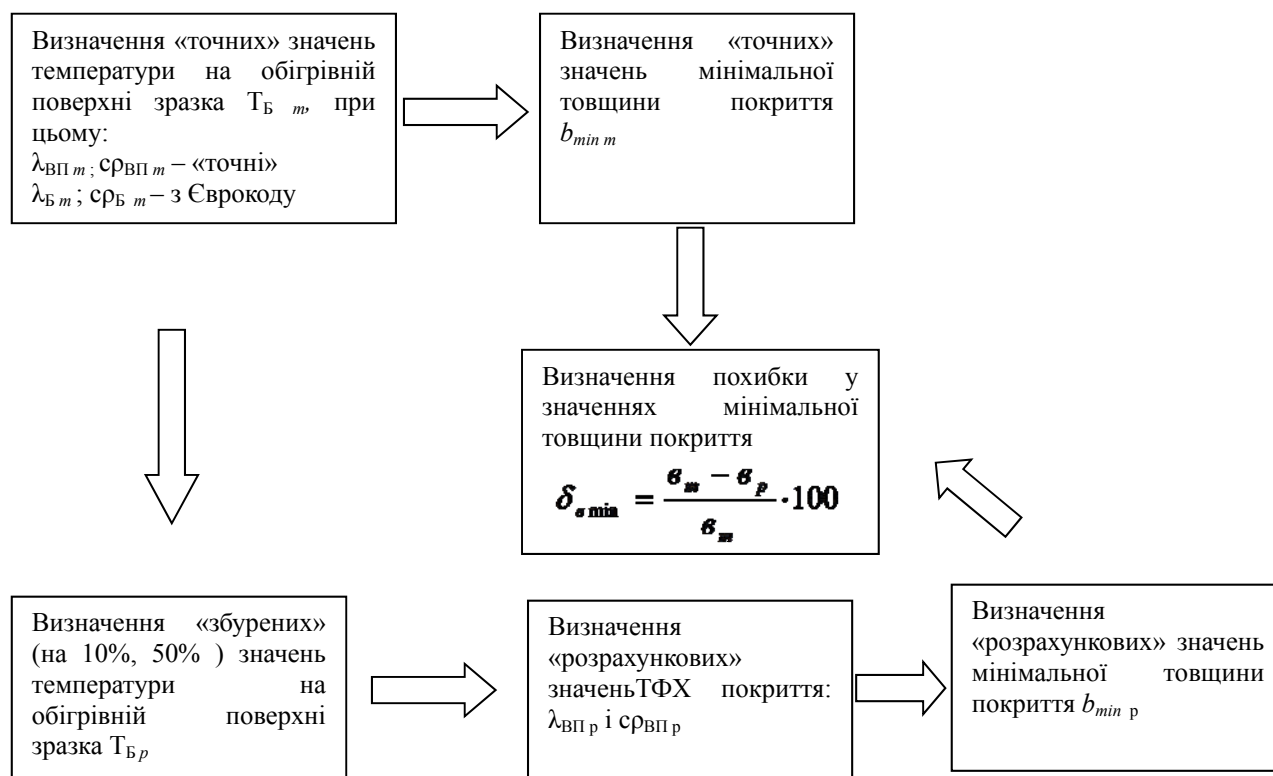


Рисунок 1 – Алгоритм розв'язання задачі щодо визначення впливу похибки у вимірюванні температури на обігрівній поверхні зразків під шаром вогнезахисного покриття на точність визначення його мінімальної товщини

За цими «збуреними» даними шляхом розв’язання ОЗТ для одного зразка визначали коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{ВПР}$ і питому об’ємну теплоємність покриття $c\rho_{ВПР}$. Отримані дані порівнювали з «точними» значеннями ТФХ вогнезахисного покриття ($\lambda_{ВПТ}$, $c\rho_{ВПТ}$) і за формулами (1) та (2) розраховували похибку у визначенні коефіцієнту теплопровідності та питомої об’ємної теплоємності (зазначений етап порівняння є проміжним і на рисунку 1 не наведений).

$$\delta\lambda = \frac{\lambda_p - \lambda_m}{\lambda_m} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\delta_{c\rho} = \frac{c\rho_p - c\rho_m}{c\rho_m} \cdot 100\% \quad (2)$$

Дані щодо розрахункових значень ТФХ застосовували для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття шляхом розв’язання ПЗТ. Отримане розрахункове значення необхідної мінімальної товщини (b_p) порівнювали з «точним» значенням і визначали похибку за такою формулою:

$$\delta_b = \frac{b_p - b_m}{b_m} \cdot 100\% \quad (3)$$

Було розглянуто вогнезахисні покриття, які мають такі значення ТФХ: $\lambda_{ВПТ} = 0,03; 0,1; 0,3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$; $c\rho_{ВПТ} = 3\cdot 10^4; 3\cdot 10^5; 3\cdot 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Варіанти завдання теплофізичних характеристик для задач, які були досліджені за зазначеним вище алгоритмом, є такими:

- варіант № 1: $\lambda_{ВПТ} = 0,03 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $c\rho_{ВПТ} = 3\cdot 10^4 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$;
- варіант № 2: $\lambda_{ВПТ} = 0,1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $c\rho_{ВПТ} = 3\cdot 10^5 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$;
- варіант № 3: $\lambda_{ВПТ} = 0,3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $c\rho_{ВПТ} = 3\cdot 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$.

Значення межі вогнестійкості приймалися такі: $t_{fr} = 30; 45; 60; 90; 120$ хв. Максимальні значення похибки у вимірюванні температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття приймалися 10% та 50% при дисперсії 1,0. Наприклад, значення «точних» та «збурених» до +10%, +50% температур для варіанту № 2 і значення межі вогнестійкості 30 хв наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення «точних» та «збурених» до +10% , +50% температур для варіанту № 2 та значення межі вогнестійкості $t_{fr} = 30$ хв

Час, t, хв	«Точні» значення температури, T, °C	«Збурені» до +10% значення температури, T, °C	«Збурені» до +50% значення температури, T, °C
1	29,06	29,84	28,97
2	51,62	51,51	51,63
4	94,18	96,29	94,43
6	121,68	121,60	146,00
8	148,77	148,77	173,06
10	176,81	176,90	184,91
12	204,72	212,90	262,29
14	229,18	236,66	244,74
16	251,63	253,94	294,66
18	273,46	288,84	266,32
20	293,83	297,82	293,20
22	313,03	323,73	332,46
24	331,39	329,66	346,34
26	348,70	348,55	395,72
28	364,94	369,46	344,47
30	380,39	383,82	396,53

Визначення ТФХ вогнезахисного покриття проводили шляхом розв'язання ОЗТ з використанням «збурених» даних температури на обігрівній поверхні зразків під шаром вогнезахисного покриття за даними одного та двох експериментів одночасно. За отриманими результатами розрахунків проводилось порівняння значень похибок, отриманих для ОЗТ за даними одного та двох експериментів, і робилися висновки щодо стійкості розв'язання ОЗТ та мінімальної кількості зразків, для якої досягається прийнятна для інженерних розрахунків точність.

Із отриманих результатів випливає, що при застосуванні даних одного експерименту із завданням «збурених» до 10% значень температури досягаються стійкі рішення ОЗТ, для яких похибка у визначенні коефіцієнту теплопровідності перебуває у межах від 0% до 5%, а похибка у визначенні питомої об'ємної теплоємності – від 3,33% до 66,7%. При застосуванні даних двох експериментів максимальні значення похибки у визначенні коефіцієнту теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності залишаються такими ж самими. При цьому максимальна похибка у визначенні необхідної мінімальної товщини покриття за даними одного експерименту становить 3,3%, за даними двох експериментів 6,16%.

При «збуренні» значень температури до 50% також досягаються стійкі рішення ОЗТ, як при розв'язанні задачі за даними одного експерименту, так і двох експериментів. При цьому максимальне значення похибки у розрахунках коефіцієнту теплопровідності становить 30,0% та 27,7% при застосуванні даних одного та двох експериментів відповідно, а значення похибки у розрахунках питомої об'ємної теплоємності співпадають і становлять 66,7%. Максимальне значення похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини покриття становлять 13,21% та 10,0% відповідно для одного та двох експериментів.

З вищенаведеного випливає, що у разі застосування як одного так і двох експериментів, досягаються стійкі рішення ОЗТ при значних випадкових похибках у визначенні температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття. При цьому, похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини покриття майже однакові, як під час застосування даних одного, так і двох експериментів. Наприклад, на рисунку 2 наведено залежність значення цієї похибки від межі вогнестійкості для «точних» значень $\lambda_{вп\tau} = 0,1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$, $c_{р\text{ вп}\tau} = 3\cdot 10^5, \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{°C}^{-1}$.

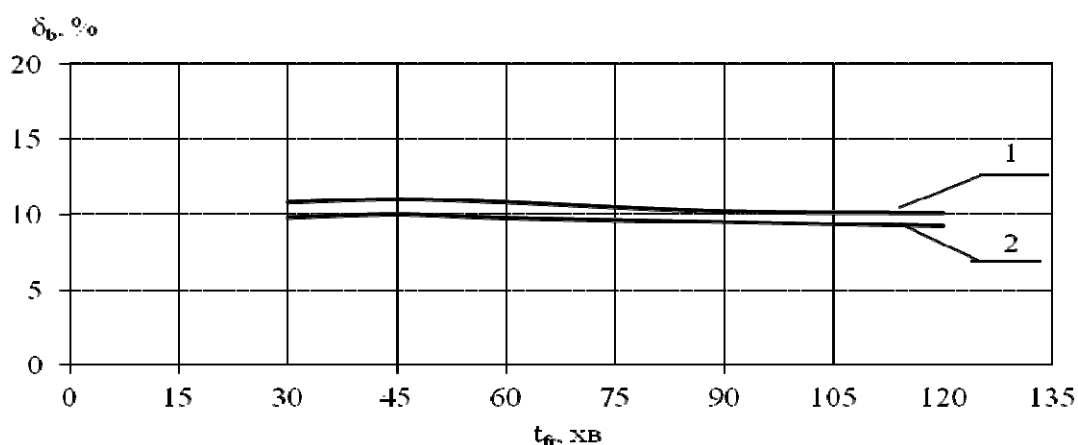


Рисунок 2 – Залежність похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття від значення межі вогнестійкості:

- 1 – при застосуванні даних одного експерименту;
- 2 – при застосуванні даних двох експериментів.

Таким чином, можна зробити висновок, що застосування даних одного експерименту дозволяє отримати стійке рішення ОЗТ, а збільшення кількості експериментів не призводить до зменшення похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття.

Необхідність дослідження впливу похибки у завданні теплофізичних характеристик бетону на точність визначення вогнезахисної здатності покриттів пов'язана з тим, що, зазвичай, ТФХ бетону залежать від низки чинників, зокрема, від його густини, вологості, наявності домішок різного призначення тощо. Тому, значення його теплофізичних характеристик можуть відрізнятися від тих, які наведені в Єврокоді [4] і застосовують під час визначення вогнезахисної здатності покриття при розв'язанні прямої та оберненої задач.

Для оцінки впливу відмінності ТФХ бетону, який застосовують у зразках для проведення експериментального визначення температур, від ТФХ, наведених в Єврокоді, також було застосовано метод обчислювального експерименту з алгоритмом, аналогічним наведеному на рисунку 1.

При визначенні «точних» значень температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття задавали «точні» значення ТФХ бетону ($\lambda_{Б\ T}$; $ср_{Б\ T}$), які відрізняються від наведених у Єврокоді ($\lambda_{Б\ p}$; $ср_{Б\ p}$). При цьому кожне значення коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{Б\ p}$ та (або) питомої об'ємної теплоємності $ср_{Б\ p}$ у вузлових точках по температурі змінювалось на деякий відсоток у різних комбінаціях. Наприклад, одночасно збільшували (зменшували) значення обох коефіцієнтів на 20%, 50%; збільшували на 50% значення $\lambda_{Б\ p}$, а значення $ср_{Б\ p}$ зменшували на такий же відсоток і навпаки; задавали значення $\lambda_{Б\ p}$ (або $ср_{Б\ p}$) з Єврокоду, при цьому збільшуючи (зменшуючи) на 50% відповідні коефіцієнти.

Для кожного варіанту відхилень у завданні ТФХ бетону шляхом розв'язання ПЗТ визначали «точні» значення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття (b_T) і відповідні значення температури на обігрівній поверхні зразка під шаром вогнезахисного покриття T_B . За цими даними із застосуванням ТФХ бетону ($\lambda_{Б\ p}$; $ср_{Б\ p}$), які відповідають Єврокоду, шляхом розв'язання ОЗТ визначали теплофізичні характеристики покриття ($\lambda_{ВП\ p}$, $ср_{ВП\ p}$), порівнювали їх з «точними» значеннями $\lambda_{ВП\ T}$, $ср_{ВП\ T}$ та розраховували похибку у їх визначенні за формулами (1), (2).

Ці значення ТФХ покриття задавали під час розв'язання ПЗТ для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття (b_p). При цьому застосовували ТФХ бетону з відхиленнями ($\lambda_{Б\ T}$; $ср_{Б\ T}$). Отримані значення необхідної мінімальної товщини (b_p) порівнювали з «точними» (b_T) і визначали похибку за формулою (3).

При розрахунках під час розв'язання ОЗТ застосовували дані одного, двох та трьох експериментів для значення часу, який дорівнював межі вогнестійкості $t_{fr} = 30; 60; 120$ хв. Необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття розраховували для значень межі вогнестійкості $t_{fr} = 30; 45; 60; 90; 120$ хв.

У таблиці 2 представлено максимальні значення похибки у визначенні ТФХ покриття та його необхідної мінімальної товщини для всіх варіантів розрахунків за умов застосування даних одного експерименту. За максимальні приймалися найбільші значення похибки, які мали місце для різних варіантів відхилень у значеннях ТФХ бетону.

Таблиця 2 – Варіанти завдання похибок у значеннях теплофізичних характеристик бетону, максимальні похибки у визначенні ТФХ вогнезахисного покриття та у визначенні його необхідної мінімальної товщини за умови застосування даних одного експерименту

№ варіанта	Відхилення у значеннях ТФХ бетону у вузлових точках		Похибка у визначенні ТФХ покриття		Похибка у визначенні необхідної мінімальної товщини
	λ_p	$ср_p$	$\delta_{\lambda}, \%$	$\delta_{ср}, \%$	
1	+20%	+20%	-20,0	110,0	4,13
2	-20%	-20%	31,0	70,0	4,04

№ варіанта	Відхилення у значеннях ТФХ бетону у вузлових точках		Похибка у визначенні ТФХ покриття		Похибка у визначенні необхідної мінімальної товщини
	λ_p	$c_{p,p}$	$\delta_{\lambda, \%}$	$\delta_{c,p, \%}$	$\delta_b, \%$
3	+50%	+50%	40,0	380,0	11,1
4	-50%	-50%	119,0	63,3	9,30
5	+50%	-50%	18,0	20,0	1,96
6	-50%	+50%	20,0	83,3	2,73
7	0%	+50%	-22,0	180,0	4,80
8	0%	-50%	49,0	20,0	5,11
9	+50%	0%	-22,0	93,3	4,23
10	-50%	0%	50,0	30,0	4,65

Із отриманих даних випливає, що похибка у визначенні коефіцієнту теплопровідності суттєво залежить від значення відхилення у ТФХ бетону. Найбільше значення (119%) вона має для варіанту № 4, для якого значення коефіцієнту теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності бетону одночасно зменшуються на 50%, а найменше (18%) - для варіанту № 5 (коефіцієнт теплопровідності бетону збільшено на 50%, питома об'ємна теплоємність бетону зменшена на 50%). Похибка у визначенні питомої об'ємної теплоємності покриття досягає 380% для варіанту № 3, коли одночасно на 50% збільшуються значення теплофізичних характеристик бетону.

Результати розрахунків необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття у разі використання даних одного експерименту показують, що значення похибки у визначенні цієї величини також залежить від значення відхилень у ТФХ бетону. Найбільші значення цієї похибки (11,1%) відмічаються для варіанту № 3, у якому одночасно на 50% збільшені значення теплофізичних характеристик бетону та варіанту № 4 (9,3%), для якого ці значення одночасно зменшені на 50%. У разі застосування варіанту № 5 (значення коефіцієнту теплопровідності збільшено на 50%, питомої об'ємної теплоємності зменшено на 50%) похибка суттєво зменшується і досягає значення 1,96%.

У таблиці 3 наведено максимальні значення похибки у визначенні теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття та його необхідної мінімальної товщини для найбільших значень відхилень ТФХ бетону за умов застосування даних двох та трьох експериментів.

Таблиця 3 – Максимальні похибки у визначенні ТФХ вогнезахисного покриття та у визначенні його необхідної мінімальної товщини за умови застосування даних двох та трьох експериментів

Відхилення у значеннях ТФХ бетону у вузлових точках		Похибка у визначенні ТФХ покриття				Похибка у визначенні необхідної мінімальної товщини	
λ_{Bp}	c_{Bp}	$\delta_{\lambda, \%}$		$\delta_{c,p, \%}$		$\delta_b, \%$	
		ОЗТ(2)	ОЗТ(3)	ОЗТ(2)	ОЗТ(3)	ОЗТ(2)	ОЗТ(3)
+50%	+50%	-36	-36	300	243	-3,53	-3,15
-50%	-50%	108	106	40	3,33	-5,08	-5,42
+50%	-50%	17	17	-3,33	-10	-1,23	-1,23
-50%	+50%	17	18	-10	50	0,63	0,84

Аналіз отриманих результатів показав, що при застосуванні даних двох експериментів під час розв'язання ОЗТ максимальна похибка у визначенні коефіцієнту теплопровідності дещо зменшується – зі 119% до 108%, а у визначенні питомої об'ємної теплоємності – з 380% до 300%. При застосуванні даних трьох експериментів спостерігається подальше незначне зменшення похибок у визначенні цих коефіцієнтів: до 106% – коефіцієнт теплопровідності, до 243% – питома об'ємна теплоємність. Застосування даних двох експериментів одночасно під час розв'язання ОЗТ дозволяє зменшити похибку у визначенні необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття на 68%. Максимальне значення цієї похибки зменшується з 11,10% до 3,53%. Застосування даних трьох експериментів не призводить до зменшення похибки у визначенні необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття. За отриманими результатами можна зробити висновок, що застосування даних двох експериментів для розв'язання ОЗТ дозволяє суттєво підвищити точність визначення вогнезахисної здатності покриття, порівняно із застосуванням даних одного експерименту, а застосування даних трьох експериментів не призводить до зменшення похибки у визначенні цієї величини.

Таким чином, було обгрунтовано, що при застосуванні експериментально-розрахункового метода для визначення необхідної мінімальної товщини вогнезахисного покриття необхідно і достатньо використовувати два зразки для експериментального визначення температури в них.

Для обгрунтування параметрів теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття, що ідентифікуються шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності за даними термометрії зразків, було використано результати розв'язання низки тестових і практичних задач. При цьому було враховано дані, отримані методом обчислювального експерименту, які наведені вище.

Сутність ідентифікації ТФХ вогнезахисних покриттів будівельних конструкцій при застосуванні експериментально-розрахункових методів полягає у наступному [1, 3].

За отриманими під час експерименту значеннями температури в зразках конструкцій з вогнезахисним покриттям шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності визначають значення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів, а саме коефіцієнт теплопровідності й питому об'ємну теплоємність, за яких забезпечується мінімальна розбіжність F розрахункових T_p і експериментальних T_e значень температур на зразках. Цю розбіжність F визначають за формулою:

$$F = \left[\sum_{j=1}^m (T_{pj} - T_{ej})^2 / m \right]^{0,5}, \quad (4)$$

де m – кількість експериментальних значень T_e .

Розрахункові значення температури T_p для кожного із зразків визначають розв'язанням прямої задачі теплопровідності методом кінцевих різниць за неявною схемою апроксимації із застосуванням теплової схеми та математичної моделі процесів у конструкції з вогнезахисним покриттям.

Розв'язання оберненої задачі теплопровідності проводять екстремальним шляхом, заснованим на ітераційному методі Ньютона – Гауса пошуку мінімуму функції F і методі регуляризації Тихонова А.М. за допомогою комп'ютерної програми FRIEND [1]. При цьому розглядають сплайн-апроксимації коефіцієнта теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності нульового, першого та третього порядків (нульовий порядок – сталі значення, перший – лінійна залежність, третій – кубічний сплайн).

Для визначення порядків сплайн-апроксимації ТФХ вогнезахисного покриття залізобетонних оправ тунельних споруд, які доцільно використовувати під час розв'язання ОЗТ, проведено параметричний аналіз чутливості математичної моделі. За результатами

цього аналізу визначено, що найбільший вплив на температуру зразка має значення коефіцієнта теплопровідності покриття, а вплив питомої об'ємної теплоємності на цю температуру є несуттєвим. Отримані результати були використані в алгоритмі розв'язання ОЗТ для визначення ТФХ вогнезахисних покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд, який є однією із складових методичного забезпечення і полягає в наступному.

На першій ітерації коефіцієнт теплопровідності та питому об'ємну теплоємність вогнезахисного покриття задають як сталі значення. Визначають величину відхилення F розрахункових і експериментальних значень температури на обігрівній поверхні зразків під шаром вогнезахисного покриття для цього розв'язання та значення теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності.

На наступних ітераціях задають апроксимацію коефіцієнта теплопровідності покриття першого (лінійна залежність від температури) та третього (кубічний сплайн) порядків з послідовним збільшенням кількості вузлових точок по температурі. При цьому питома об'ємна теплоємність залишається сталою (або апроксимується з використанням сплайну першого або третього порядку). Результати, отримані на зазначених ітераціях, наводяться у вигляді таблиці, в якій для кожного номеру ітерації вказують порядок сплайн-апроксимації та результати визначення ТФХ вогнезахисного покриття і середньоквадратичного відхилення F .

Наприклад, ітерація № 1 – порядок сплайн-апроксимації нульовий, λ - стала; c_p - стала, значення F ;

ітерація № 2 – сплайн-апроксимація першого порядку, λ - змінна; c_p - стала; кількість вузлових точок - n , значення F ;

ітерація № 3 – сплайн-апроксимація першого порядку, λ - змінна; c_p - стала; кількість вузлових точок - n , значення F ;

ітерація № 4 – сплайн-апроксимація третього порядку (кубічний сплайн), λ - змінна; c_p - стала; кількість вузлових точок - n , значення F .

Якщо подальше збільшення кількості вузлових точок по температурі для апроксимації коефіцієнта теплопровідності третього порядку, а також застосування апроксимації першого та третього порядку для питомої об'ємної теплоємності не призводить до зменшення значення відхилення розрахункових та експериментальних значень температури, розв'язання, отримане на ітерації з мінімальним значенням середньоквадратичного відхилення F , приймається як остаточне. Із застосуванням отриманих значень коефіцієнта теплопровідності та питомої об'ємної теплоємності шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності визначають необхідну мінімальну товщину вогнезахисного покриття залізобетонної оправ для різних нормованих значень межі вогнестійкості.

Висновки:

Методом обчислювального експерименту за розробленим алгоритмом встановлено, що при застосуванні експериментально-розрахункового метода визначення вогнезахисної здатності покриттів оправ тунельних споруд необхідно і достатньо використовувати два зразки конструкції з вогнезахисним покриттям різної товщини для експериментального визначення температури в них за умов стандартного температурного режиму.

За результатами параметричного аналізу чутливості математичної моделі визначено, що найбільший вплив на температуру зразка має значення коефіцієнта теплопровідності покриття, а вплив питомої об'ємної теплоємності на цю температуру є несуттєвим. Тому порядок сплайн-апроксимації коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного покриття має бути більшим, ніж для питомої об'ємної теплоємності, що впроваджено в алгоритмі розв'язання ОЗТ для визначення ТФХ вогнезахисних покриттів залізобетонних оправ тунельних споруд, який є однією із складових відповідного методичного забезпечення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Круковский П. Г. Универсальный программно – методический подход к решению обратных задач тепломассопереноса (программа FRIEND) Идентификация динамических систем и обратные задачи: труды II Междунар. Конференции. – СПб, 1994. – Т.1. – С. А.8.1. – А.8.12.
2. Новак С.В. Спосіб визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів та облицювань для залізобетонних перекриттів / С.В.Новак, Л.М.Нефедченко, О.П.Якименко // Науковий вісник УкрНДІПБ. - 2011. – № 1(23). –С. 118–121.
3. Круковский П. Г. Расчетно-экспериментальный поход к анализу процессов тепломассобмена (методология и примеры применения). Промышленная теплотехника (приложение к журналу). – 2003. – Т.25, № 4. – С. 396 – 398.
4. EN 1992-1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1–2: General rules – Structural fire design (Єврокод 2: Проектування залізобетонних конструкцій – Частина 1–2: Загальні вимоги. Вогнестійкість).

