

УДК 614.841.45

## ОЦІНЮВАННЯ ЗБІЖНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ВОГНЕВОГО ВПЛИВУ ДО ДОСЯГНЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛІ

С.В.Новак\*, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., О.В.Добростан, канд. техн. наук, Ю.В.Долішній, О.В.Ратушний

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 03.10.2017

Пройшла рецензування: 04.12.2017

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

вогневий вплив, вогнезахисне покриття, збіжність, критична температура сталі, нерівномірність температури, стандартний температурний режим.

### АНОТАЦІЯ

Наведено результати оцінювання збіжності експериментальних даних щодо тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі, отриманих за результатами вимірювань температури трьох однакових зразків, які складаються зі сталеві пластини і вогнезахисного покриття із гіпсокартонної плити. Показано, що має місце значна нерівномірність температури на необігрівній поверхні захищеної сталеві пластини в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Встановлено різницю між значеннями максимального та мінімального часу досягнення критичної температури сталі, визначеними за результатами вимірювань температури трьох однакових зразків.

Для визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів несучих сталевих конструкцій проводять випробування у стандартному температурному режимі певного набору зразків захищених сталевих конструкцій (колон та балок) за ДСТУ Б В.1.1-17 [1] та захищених сталевих пластин, параметри яких наведено в [2]. За даними випробувань захищених сталевих пластин визначають проміжки часу від початку вогневого впливу до досягнення на пластині значень критичної температури сталі 350 °С, 400 °С, 450 °С, 500 °С, 550 °С, 600 °С. У подальшому отримані експериментальні дані щодо цих проміжків застосовують для визначення залежності часу досягнення критичної температури сталі від товщини вогнезахисного покриття і товщини незахищеної сталеві пластини [2]. На теперішній час відсутні дані щодо збіжності (повторюваності) результатів визначення зазначених вище проміжків часу, що не дозволяє провести оцінку випадкової складової похибки результатів випробувань. Тому метою досліджень, які розглянуто у даній статті, була оцінка показника збіжності експериментальних даних, яким є різниця між значеннями максимального та мінімального часу досягнення критичної температури сталі, отриманими за результатами випробувань однакових зразків сталеві конструкції (захищеної сталеві пластини).

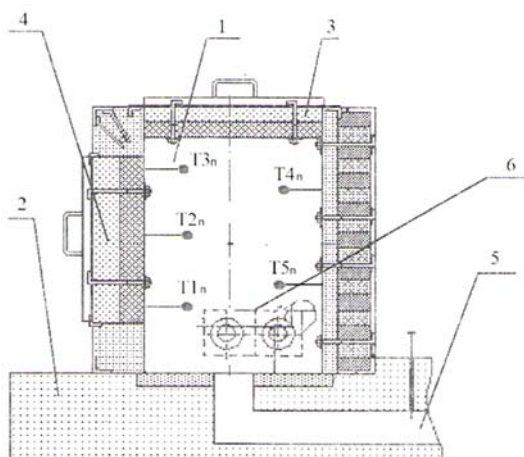
нестационарного прогріву вогнезахисного покриття в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом при застосуванні в якості основи для зразків сталеві пластини квадратної форми зі стороною 500 мм і товщиною 5 мм, а також шару теплової ізоляції на необігрівній поверхні зразків. За результатами вимірювань температури сталевих пластин, на які нанесено вогнезахисне покриття, для кожного зразка визначають значення часу  $t_{cr}$  досягнення на цих пластині критичної температури сталі в діапазоні від 350 °С до 600 °С (з кроком 50 °С).

Вогневий вплив на зразки здійснювали у печі (див. рисунок 1), яка має глибину 850 мм, ширину 650 мм, висоту 730 мм. Дослідженням піддавали три однакові зразки з вогнезахисним покриттям із гіпсокартонної плити виду ГКП завтовшки 12,5 мм.

За експериментальними даними для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначали середню температуру  $\theta_a$  сталеві пластини дослідного зразка, як середнє арифметичне значення показників термпар Т1 – Т5 (див. рисунок 2), розміщених на необігрівній поверхні сталеві пластини. Результати вимірювання температури  $\theta_1 - \theta_5$  в різних точках необігрівної поверхні сталеві пластини та розрахунку середньої температури  $\square_a$  сталеві пластини залежно від часу вогневого впливу для зразків № 1, № 2, № 3 наведено в таблиці 1. У цій таблиці значення, виділені напівжирним шрифтом та підкресленням, відповідають максимальним та мінімальним величинам температури поверхні сталеві пластини для часу  $t_j$ .

Метод і результати досліджень  
Застосовано метод, який полягає в експериментальному визначенні

\*E-mail: novak.s.fire@gmail.com



1 – вогнева камера печі; 2 – бетонна основа; 3,4 – теплоізоляційні кришки; 5 – канал виходу продуктів згоряння; 6 – пальники; T1п - T5п – термопары в печі

Рисунок 1 – Загальний вигляд вогневої печі

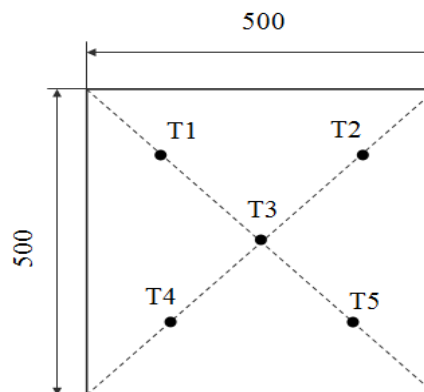


Рисунок 2 – Схема розташування термопар на необігрітій поверхні сталевій пластині

Таблиця 1 – Експериментальні дані щодо температури сталевих пластин зразків № 1 – № 3

Номер зразка	Час $t_f$ , хв	Температура сталевій пластині, °C					
		Експериментальні дані					Середнє значення
		$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	
1	0	<b>15,6</b>	<b>14,2</b>	15,3	14,8	14,7	14,9
	5	<b>34,8</b>	<b>43,1</b>	42,4	35,8	37,9	38,8
	10	<b>71,0</b>	80,7	<b>82,1</b>	77,7	79,5	78,2
	15	<b>87,3</b>	92,4	<b>98,8</b>	93,4	92,5	92,9
	20	<b>136,8</b>	169,6	<b>177,6</b>	154,5	164,1	160,5
	25	<b>195,8</b>	241,0	<b>255,3</b>	211,9	235,7	227,9
	30	<b>252,2</b>	310,5	<b>327,5</b>	269,8	309,6	293,9
	35	<b>307,0</b>	377,5	<b>392,8</b>	327,3	377,6	356,4
	40	<b>356,5</b>	433,2	<b>447,4</b>	374,7	432,9	408,9
	45	<b>405,5</b>	484,6	<b>494,9</b>	422,5	475,6	456,6
	50	<b>451,8</b>	527,3	<b>535,9</b>	467,7	512,6	499,1
	55	<b>493,8</b>	571,2	<b>580,9</b>	507,0	547,8	540,1
60	<b>537,9</b>	619,8	<b>629,9</b>	546,6	585,2	583,9	
65	<b>578,4</b>	666,2	<b>676,1</b>	580,6	620,2	624,3	
2	0	13,5	<b>14,8</b>	13,6	<b>12,7</b>	14,1	13,7
	5	<b>30,3</b>	33,9	32,4	30,8	<b>35,2</b>	32,5
	10	<b>61,3</b>	68,1	66,9	65,8	<b>69,3</b>	66,3
	15	<b>80,6</b>	86,6	85,0	83,2	<b>89,2</b>	84,9
	20	<b>134,5</b>	140,8	139,2	137,4	<b>141,2</b>	138,6
	25	185,5	206,1	<b>223,7</b>	184,1	195,9	199,1
	30	<b>250,2</b>	277,9	<b>305,1</b>	255,4	272,3	272,2
	35	<b>316,2</b>	355,1	<b>391,4</b>	324,0	346,3	346,6
	40	<b>377,5</b>	423,2	<b>462,3</b>	383,9	407,2	410,8
	45	<b>433,2</b>	478,2	<b>516,8</b>	434,5	449,8	462,5
	50	471,0	511,1	<b>545,3</b>	<b>467,4</b>	477,8	494,5
	55	514,7	566,4	<b>602,3</b>	504,8	512,5	540,1
60	<b>605,2</b>	<b>695,9</b>	688,2	<b>553,1</b>	558,1	620,1	
3	0	<b>14,3</b>	14,0	14,1	<b>13,9</b>	14,0	14,1
	5	40,6	<b>42,4</b>	38,3	41,5	41,8	40,9
	10	70,7	72,6	<b>67,3</b>	72,8	<b>73,8</b>	71,4
	15	94,0	<b>97,7</b>	<b>90,1</b>	92,8	92,8	93,5
	20	158,9	<b>167,4</b>	154,4	151,8	<b>151,6</b>	156,8
	25	228,9	<b>238,0</b>	225,3	211,3	<b>211,3</b>	223,0
	30	301,8	<b>311,8</b>	296,2	<b>271,1</b>	274,9	291,2
	35	378,7	<b>385,4</b>	364,7	<b>334,6</b>	341,8	361,0
	40	447,4	<b>451,9</b>	433,2	<b>399,0</b>	407,6	427,8
	45	501,6	<b>505,5</b>	484,1	460,0	466,2	483,5
	50	<b>546,5</b>	543,9	528,3	<b>506,8</b>	508,8	526,9
	55	<b>587,7</b>	582,7	571,6	<b>542,4</b>	547,9	566,5
60	<b>625,8</b>	620,6	612,4	<b>575,7</b>	583,5	603,6	

Таблиця 2 – Значення показників нерівномірності температури для зразків № 1 – № 3

Номер зразка	Час $t_j$ , хв	$\theta_{min}$ , °C	$\theta_{max}$ , °C	$\theta_a$ , °C	$\theta_{max} - \theta_{min}$ , °C	$\delta_{\theta}$ , %
1	0	14,2	15,6	14,9	1,4	9,4
	5	34,8	43,1	38,8	8,3	21,4
	10	71,0	82,1	78,2	11,1	14,2
	15	87,3	98,8	92,9	11,5	12,4
	20	136,8	177,6	160,5	40,8	25,4
	25	195,8	255,3	227,9	59,5	26,1
	30	252,2	327,5	293,9	75,3	25,6
	35	307,0	392,8	356,4	85,8	24,1
	40	356,5	447,4	408,9	90,9	22,2
	45	405,5	494,9	456,6	89,4	19,6
	50	451,8	535,9	499,1	84,1	16,9
	55	493,8	580,9	540,1	87,1	16,1
	60	537,9	629,9	583,9	92,0	15,8
	65	578,4	676,1	624,3	97,7	15,6
2	0	12,7	14,8	13,7	2,1	15,3
	5	30,3	35,2	32,5	4,9	15,1
	10	61,3	69,3	66,3	8,0	12,1
	15	80,6	89,2	84,9	8,6	10,1
	20	134,5	141,2	138,6	6,7	4,8
	25	184,1	223,7	199,1	39,6	19,9
	30	250,2	305,1	272,2	54,9	20,2
	35	316,2	391,4	346,6	75,2	21,7
	40	377,5	462,3	410,8	84,8	20,6
	45	433,2	516,8	462,5	83,6	18,1
	50	467,4	545,3	494,5	77,9	15,8
	55	504,8	602,3	540,1	97,5	18,1
	60	553,1	695,9	620,1	142,8	23,0
	3	0	13,9	14,3	14,0	0,4
5		38,3	42,4	40,9	4,1	10,0
10		67,3	73,8	71,4	6,5	9,1
15		90,1	97,7	93,5	7,6	8,1
20		151,6	167,4	156,8	15,8	10,1
25		211,3	238,0	223,0	26,7	12,0
30		271,1	311,8	291,2	40,7	14,0
35		334,6	385,4	361,0	50,8	14,1
40		399,0	451,9	427,8	52,9	12,4
45		460,0	505,5	483,5	45,5	9,4
50		506,8	546,5	526,9	39,7	7,5
55		542,4	587,7	566,5	45,3	8,0
60		575,7	625,8	603,6	50,1	8,3

З аналізу даних, наведених в таблиці 1, впливає, що температура поверхні сталеві пластини має максимальні значення у її верхній та центральній частинах (термопари Т1 – Т3, рисунок 2) і мінімальні значення у її нижній частині (термопари Т4, Т5, рисунок 2).

За даними таблиці 1 для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначали показники нерівномірності температури сталевих пластин, якими є різниця між максимальною  $\theta_{max}$  та мінімальною  $\theta_{min}$  температурою на необігрітій поверхні сталеві пластини та відносне значення  $\delta_{\theta}$  цієї різниці, яке розраховували за такою формулою:

$$\delta_{\theta} = 100 \cdot (\theta_{max} - \theta_{min}) / \theta_a \quad (1)$$

Результати розрахунку показників нерівномірності температури для зразків № 1, № 2, № 3 наведено в таблиці 2.

З аналізу таблиці 2 випливає наявність значної нерівномірності температур на необігрітій поверхні сталеві пластини: значення  $\theta_{max} - \theta_{min}$  та  $\delta_a$  досягають 142,8 °C та 26,1 %, відповідно. При цьому величина  $\theta_{max} - \theta_{min}$  в основному підвищується зі збільшенням часу вогневого впливу, а більша частина значень  $\delta_{\theta}$  знаходиться в діапазоні від 10 % до 20 %.

За даними таблиці 1 для кожного моменту часу  $t_j$  за формулою (2) розраховували середнє для 3-х зразків значення температури  $\theta_a$  ср сталеві пластини, визначали різницю між максимальним  $\theta_{a \max}$  та мінімальним  $\theta_{a \min}$  значеннями середньої температури  $\theta_a$  та за формулою (3) розраховували відносне значення  $\delta_a$  цієї різниці. Результати розрахунків наведено в таблиці 3.

$$\theta_{a \text{ ср}} = (\theta_{a1} + \theta_{a2} + \theta_{a3}) / 3; \quad (2)$$

$$\delta_a = 100 \cdot (\theta_{a \max} - \theta_{a \min}) / \theta_{a \text{ ср}}, \quad (3)$$

де  $\theta_{a \text{ ср}}$  – середнє для 3-х зразків значення температури сталеві пластини, °C;

$\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$  – значення  $\theta_a$  для зразків № 1, № 2, № 3, відповідно, °C;

$\theta_{a \max}, \theta_{a \min}$  – відповідно максимальне та мінімальне значення  $\theta_a$  серед  $\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}$ , °C.

За результатами аналізу таблиці 3 випливає, що різниця між максимальним  $\theta_{a \max}$  та мінімальним  $\theta_{a \min}$  значеннями середньої температури  $\theta_a$  досягає 36,2 °C, а максимальна відносна величина цієї різниці становить 16,5 %.

За розрахунковими даними щодо температури  $\theta_a$  визначали значення часу  $t_{cr}$  досягнення критичної температури  $\theta_{cr}$  сталі в діапазоні від 350 °C до 600 °C для зразків № 1, № 2, № 3 (див. таблицю 4). При цьому значення  $t_{cr}$  визначали із приведенням цього часу до номінальної початкової температури, яка становить 20 °C. Тобто для заданої критичної температури  $\theta_{cr}$  встановлювали час  $t_{cr}$  досягнення температури  $\theta_a$ , величину якої розраховано за такою формулою:

$$\theta_a = \theta_{cr} + \theta_0 - 20, \quad (4)$$

де  $\theta_a$  – середня температура сталеві пластини, яка відповідає критичній температурі  $\theta_{cr}$ , °C;

$\theta_{cr}$  – критична температура сталі, °C;

$\theta_0$  – початкова температура сталеві пластины в експерименті, °С.

Таблиця 3 – Розрахункові значення параметрів  $\theta_{a\text{cp}}$ ,  $\theta_{a\text{max}} - \theta_{a\text{min}}$ ,  $\delta_a$

Час $t_j$ , хв	$\theta_{a1}$ , °С	$\theta_{a2}$ , °С	$\theta_{a3}$ , °С	$\theta_{a\text{cp}}$ , °С	$\theta_{a\text{max}} - \theta_{a\text{min}}$ , °С	$\delta_a$ , %
0	14,9	13,7	14,1	14,2	0,8	5,7
5	38,8	32,5	40,9	37,4	2,1	5,6
10	78,2	66,3	71,4	72,0	11,9	16,5
15	92,9	84,9	93,5	90,4	8,6	9,5
20	160,5	138,6	156,8	152,0	21,9	14,4
25	227,9	199,1	223,0	216,7	28,8	13,3
30	293,9	272,2	291,2	285,8	21,7	7,6
35	356,4	346,6	361,0	354,7	14,4	4,1
40	408,9	410,8	427,8	415,8	18,9	4,5
45	456,6	462,5	483,5	467,5	26,9	5,8
50	499,1	494,5	526,9	506,8	32,4	6,4
55	540,1	540,1	566,5	548,9	26,4	4,8
60	583,9	620,1	603,6	602,5	36,2	6,0

Таблиця 4 – Значення часу досягнення критичної температури для зразків № 1, № 2, № 3

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °С	350	400	450	500	550	600
№ зразка	Значення часу досягнення критичної температури сталі $t_{cr}$ , хв					
1	34,6	39,3	44,4	50,3	56,3	62,1
2	35,2	39,5	43,1	50,1	55,3	58,5
3	34,2	38,2	41,4	46,8	52,1	58,9

За даними таблиці 4 для кожної температури  $\theta_{cr}$  за формулою (5) розраховували середнє для 3-х зразків значення часу  $t_{cr\text{cp}}$  досягнення критичної температури, визначали різницю між максимальним  $t_{cr\text{max}}$  та мінімальним часом  $t_{cr\text{min}}$  та за формулою (6) розраховували відносне значення  $\delta_t$  цієї різниці. Результати розрахунків наведено в таблиці 5.

$$t_{cr\text{cp}} = (t_{cr1} + t_{cr2} + t_{cr3})/3, \quad (5)$$

$$\delta_t = 100 \cdot (t_{cr\text{max}} - t_{cr\text{min}}) / t_{cr\text{cp}}, \quad (6)$$

де  $t_{cr\text{cp}}$  – середнє для 3-х зразків значення часу досягнення критичної температури сталі, хв;

$t_{cr1}$ ,  $t_{cr2}$ ,  $t_{cr3}$  – значення  $t_{cr}$  для зразків № 1, № 2, № 3, відповідно, хв;

$t_{cr\text{max}}$ ,  $t_{cr\text{min}}$  – відповідно максимальне та мінімальне значення  $t_{cr}$  серед  $t_{cr1}$ ,  $t_{cr2}$ ,  $t_{cr3}$ , хв.

Таблиця 5 – Розрахункові значення параметрів  $t_{cr\text{cp}}$ ,  $t_{cr\text{max}} - t_{cr\text{min}}$ ,  $\delta_t$

Критична температура сталі $\theta_{cr}$ , °С	$t_{cr1}$ , хв	$t_{cr2}$ , хв	$t_{cr3}$ , хв	$t_{cr\text{cp}}$ , хв	$t_{cr\text{max}} - t_{cr\text{min}}$ , хв	$\delta_t$ , %
350	34,6	35,2	34,2	34,7	1,0	2,9
400	39,3	39,5	38,2	39,0	1,3	3,3
450	44,4	43,1	41,4	42,9	3,0	7,0
500	50,3	50,1	46,8	49,1	3,5	7,1
550	56,3	55,3	52,1	54,6	4,2	7,7
600	62,1	58,5	58,9	59,8	3,6	6,0

Із даних таблиці 5 випливає, що різниця між максимальним  $t_{cr\text{max}}$  та мінімальним часом  $t_{cr\text{min}}$  досягнення критичної температури сталі в діапазоні від 350 °С до 600 °С становить від 1,0 хв до 4,2 хв, а відносне значення цієї різниці – від 2,9 % до 7,7 %.

Із аналізу отриманих результатів можна зробити такі висновки:

За результатами вимірювань температури трьох однакових зразків сталеві пластины квадратної форми зі стороною 500 мм і товщиною 5 мм з вогнезахисним покриттям із гіпсокартонної плити виду ГКП завтовшки 12,5 мм в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі встановлено наявність значної нерівномірності температури на необігрітій поверхні сталеві пластины – різниця між значеннями максимальної та мінімальної температури досягає 26,1 %. При цьому температура поверхні сталеві пластины має максимальні значення у її верхній та центральній частинах, мінімальні значення – у її нижній частині. Такий розподіл температури по поверхні сталеві пластины може бути викликаний нерівномірністю теплового потоку на обігрітій поверхні зразків, який має дві складові – конвекційну та радіаційну, та (або) пов'язаний з особливостями поведінки гіпсокартонної плити в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі. Для встановлення фактичної причини цієї нерівномірності та визначення заходів щодо її зменшення мають бути проведені додаткові дослідження. Зокрема, це можуть бути експериментальні дослідження тривалості вогневого впливу до досягнення критичної температури сталі, проведені для інших вогнезахисних матеріалів, та розрахункові дослідження, при яких слід визначати розподіли температури в печі та зразках шляхом застосування польових моделей.

Різниця між значеннями максимального та мінімального часу досягнення критичної температури сталі, визначеними за

результатами вимірювань температури трьох однакових зразків з вогнезахисним покриттям із гіпсокартонної плити, становить від 2,9 % до 7,7 %, що можна вважати прийнятним при

проведенні попередньої оцінки вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій на зразках зменшених розмірів [2].

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.1.1-17:2007 Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ).
2. Новак С.В. Обґрунтування параметрів зразків для експериментального визначення температури сталевих пластин з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за стандартним температурним режимом пожежі / С.В. Новак // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2016. – № 2 (2). – С. 18 – 23.

## EVALUATION OF CONVERGENCE THE RESULTS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DURATION OF FIRE INFLUENCE TO ACHIEVE THE CRITICAL TEMPERATURE OF STEEL

*S.Novak, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Fellow, O.Dobrostan, Cand. of Sc. (Eng.), Y.Dolishnii, O.Ratushnyi*

*The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine*

---

### KEYWORDS

fire influence, fireproof coating, convergence, critical temperature of steel, unevenness of temperature, standard temperature regime.

### ANNOTATION

The results of evaluation of the convergence of experimental data on the duration of fire influence to reaching the critical temperature of steel are presented. These data are derived from the measurement of the temperature of three identical samples, which consist of a steel plate and a fireproof covering from a drywall plate. It is shown that there is a significant unevenness of temperature on a non-heating surface of a protected steel plate under conditions of fire influence at the standard temperature regime of a fire. The difference between the values of the maximum and minimum time for reaching the critical temperature of the steel, determined on the basis of the results of temperature measurements of the three identical samples, was established.

## ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОГНЕВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДО ДОСТИЖЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТАЛИ

*С.В.Новак, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А.В.Добростан, канд. техн. наук, Ю.В.Долышний, А.В.Ратушный*

*Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина*

---

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

огневое воздействие, огнезащитное покрытие, сходимость, критическая температура стали, неравномерность температуры, стандартный температурный режим.

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты оценки сходимости экспериментальных данных продолжительности огневого воздействия до достижения критической температуры стали, полученных по результатам измерений температуры трех одинаковых образцов, которые состоят из стальной пластины и огнезащитного покрытия из гипсокартонной плиты. Показано, что имеет место значительная неравномерность температуры на необогреваемой поверхности защищенной стальной пластины в условиях огневого воздействия при стандартном температурном режиме пожара. Установлена разница между значениями максимального и минимального времени достижения критической температуры стали, определенной по результатам измерений температуры трех одинаковых образцов.