

УДК 614.841.45

ОЦЕНКА ОГНЕЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ ВСПУЧИВАЮЩЕГОСЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ НЕСУЩИХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТАНДАРТИЗИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

С.В. Новак*¹, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., П.Г. Круковский², докт. техн. наук, проф., Н.Б. Григорьян³, канд. техн. наук, Б.Б. Григорьян³, канд. техн. наук, доц.

¹Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Украина

²Институт технической теплофизики НАН Украины

³Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты, Украина

ИНФОРМАЦИЯ ПРО СТАТЬЮ

Поступила в редакцию: 28.04.2018
Прошла рецензирование: 11.06.2018

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

задача теплопроводности, критическая температура стали, огнезащитная способность, предел огнестойкости, стальная конструкция, стандартизированные методы.

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты определения характеристики огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС» для несущих стальных конструкций стандартизированными методами, которые указаны в ДСТУ Б В.1.1-17. Показано, что большая часть значений минимальной толщины этого огнезащитного покрытия, полученных методом числовой регрессии и методами, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности, превышает величины, полученные методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности и решение обратной задачи теплопроводности. При этом наибольшее отклонение толщины огнезащиты от значений, полученных методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности, имеет место при использовании метода числовой регрессии.

Для оценки огнезащитной способности огнезащитных материалов (покрытий, облицовок и т. д., далее – ОЗП) для несущих стальных конструкций может быть применен один из следующих методов (далее – стандартизированные методы), приведенных в национальном стандарте ДСТУ Б В.1.1-17 [1]: метод числовой регрессии; два метода, в которых использовано упрощенное уравнение теплопроводности (с постоянной и переменной теплопроводностью); два метода, в которых использовано уточненное уравнение теплопроводности (с постоянными и переменными теплофизическими характеристиками) и решение обратной задачи теплопроводности (далее – ОЗТ) в общей постановке; графический метод. Учитывая то, что в этом стандарте отсутствуют данные о точности стандартизированных методов, были проведены расчетные исследования [2], которые показали, что наиболее приближенными к точным решениям являются решения, полученные методами, в которых используется уточненное уравнение теплопроводности и решение обратной задачи теплопроводности. Наименее точными являются решения, полученные методом числовой регрессии и графическим методом. Методы, в которых используют упрощенное уравнение теплопроводности, по точности занимают промежуточное место среди вышеуказанных методов. Приведенная выше оценка точности

стандартизированных методов была получена только расчетным путем с использованием метода вычислительного эксперимента [2]. В работе [3] для подтверждения приведенных выше результатов расчетных исследований, с использованием экспериментальных данных, определенных по ДСТУ Б В.1.1-17 [1], проведена оценка отклонений значений минимальной толщины пассивного огнезащитного материала, при которых обеспечиваются нормированные пределы огнестойкости несущих стальных конструкций, полученных разными стандартизованными методами. Нерешенным остается вопрос оценки этих отклонений для реактивных (вспучивающихся) огнезащитных покрытий, чему и посвящена данная работа.

В качестве исходных данных для решения поставленной задачи были приняты экспериментальные данные, полученные при испытаниях по ДСТУ Б В.1.1-17 [1] вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС». В таблице 1 приведены типоразмеры стальных профилей, значения их приведенной толщины V/A_p и толщины ОЗП для 10-ти образцов стальных колонн, для которых экспериментально определялись температуры в условиях их четырехстороннего нагрева при огневому воздействию по стандартному температурному режиму.

Таблиця 1 – Типоразмери профилей, значення їх приведенної товщини V/A_p і товщини ОЗП для 10-ти образців сталевих колонн

№ образца	Типоразмер профиля	Приведенная толщина профиля $V/A_p, мм$	Толщина ОЗП $d_p, мм$
1	HEM 280	13,25	0,931
2	HEM 280	13,25	0,250
3	HEB 450	9,78	1,885
4	HEB 300	8,11	0,245
5	HEA 300	5,94	1,669
6	HEA 300	5,94	0,251
7	HEA 200	4,37	1,692
8	HEA 200	4,37	0,252
9	IPE 200	3,47	1,700
10	IPE 200	3,47	0,877

На рисунку 1 приведені експериментальні залежності від часу огневого впливу середньої температури в печі і температури образців сталевих колон №7 і №8, які мають однакову приведену товщину профіля і різну товщину ОЗП. Указані експериментальні залежності, отримані при випробуваннях 10-ти образців сталевих колонн (см. таблицю 1), використовувалися для визначення огнезахисної здатності ОЗП стандартизованими методами, наведеними в ДСТУ Б В.1.1-17 [1]. При цьому визначалися значення мінімальної товщини ОЗП, які для заданих величин критичної температури сталі (від 350 °С до

750 °С, з кроком 50 °С) і наведеної товщини сталевий профіля (від 3 мм до 15 мм) забезпечують нормовані межі огнестійкості несучих сталевих конструкцій (30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв). В таблиці 2 наведені значення мінімальної товщини ОЗП для меж огнестійкості 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв і критичної температури сталі 350 °С, 500 °С, 750 °С, які визначені методом, заснованим на використанні уточненого рівняння теплопровідності і розв'язанні ОЗТ з змінними теплофізичними характеристиками ОЗП. Теплофізичні характеристики ОЗП, отримані розв'язком ОЗТ, наведені в [4].

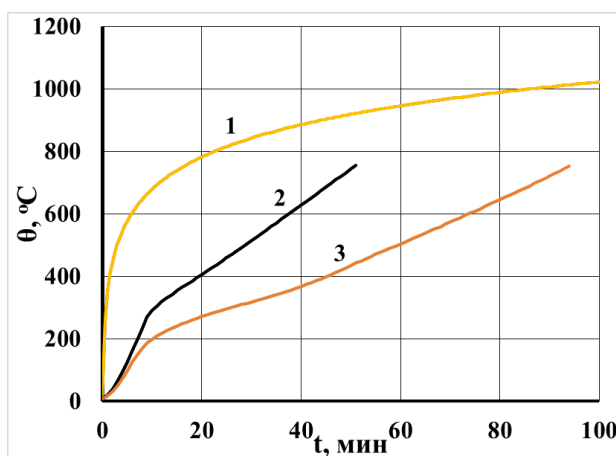


Рисунок 1 – Залежності температури в печі (1) і температури образців сталевих колон №7 (3) і №8 (2) від часу огневого впливу

Таблиця 2 – Значення мінімальної товщини ОЗП для меж огнестійкості 30 хв, 45 хв, 60 хв, 90 хв і критичної температури сталі 350 °С, 500 °С, 750 °С, які визначені методом, заснованим на використанні уточненого рівняння теплопровідності і розв'язанні ОЗТ

Предел огнестойкости $t_{cr}, мин$	30			45			60			90		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Приведенная толщина $V/A_p, мм$	Минимальная толщина огнезащитного покрытия $d_{pmin}, мм$											
3,0	1,97	0,55	0,07	-	1,27	0,30	-	-	0,73	-	-	-
4,0	1,48	0,40	0,05	-	0,95	0,21	-	1,82	0,52	-	-	1,59
5,0	1,18	0,32	0,03	-	0,75	0,15	-	1,46	0,40	-	-	1,25
10,0	0,58	0,14	-	1,03	0,34	0,05	1,67	0,70	0,15	-	1,73	0,55
15,0	0,38	0,08	-	0,69	0,21	0,02	1,09	0,44	0,08	-	1,11	0,33

Величини мінімальної товщини ОЗП, визначені цим методом, були прийняті як

базові значення $d_{pminБ}$ при порівнянні розрахункових значень товщини, отриманих застосуванням стандартизованих методів.

Это сравнение проведено с использованием следующей формулы:

$$\delta_d = 100 (d_{Pmin p} - d_{Pmin Б}) / d_{Pmin Б} \quad (1)$$

где δ_d – отклонение расчетных значений минимальной толщины $d_{Pmin p}$ огнезащитного покрытия, полученных рассматриваемым методом, от базовых значений $d_{Pmin Б}$ этой толщины, %.

В таблицах 3 – 5 приведены результаты определения значений отклонения δ_d ,

рассчитанные по формуле (1), для методов, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности, и метода числовой регрессии. Прочерки в этих таблицах вызваны тем, что расчетные значения толщины $d_{Pmin p}$ для рассматриваемых параметров не попадают в диапазон приемлемых расчетных значений толщины ОЗП, который был определен согласно положениям ДСТУ Б В.1.1-17 [1]. Этот диапазон для каждого метода определен, исходя из допустимых отклонений расчетной толщины ОЗП от данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 3 – Значения отклонения δ_d , определенные для метода числовой регрессии

Предел огнестойкости t_r , мин	30			45			60			90		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Критическая температура θ_{cr} , °C												
Приведенная толщина V/A_p , мм	Отклонение δ_d , %											
3,0	-	138,35	285,71	-	-	272,09	-	-	170,60	-	-	-
4,0	-5,28	35,41	-	-	37,89	37,20	-	-	63,08	-	-	24,29
5,0	-10,80	-	-	-	20,91	-	-	8,70	20,20	-	-	13,39
10,0	-22,34	-	-	-	-3,49	-	-	26,54	-	-	-	29,48
15,0	-26,96	-	-	56,65	-	-	72,89	59,77	-	-	55,97	69,72

По полученным расчетным данным относительно отклонения δ_d для рассматриваемых методов определены диапазоны отклонения δ_d и количество значений этого отклонения в интервалах этих диапазонов, которые приведены в таблице 6. Из анализа этих расчетных данных следует, что 76,6 % значений минимальной толщины ОЗП, полученных методом числовой регрессии и методами, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности, превышает величины, полученные методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности и решение ОЗТ. Наибольшее отклонение толщины δ_d , составляющее 286 %, имеет место при использовании метода числовой регрессии. Для этого метода 80,0 % значений отклонения δ_d имеют положительную величину (расчетные толщины ОЗП превышают базовые $d_{Pmin Б}$) и 20,0 % – отрицательную величину (расчетные толщины меньше базовых на величину до 23 %). Для методов, в которых

используется упрощенное уравнение теплопроводности, это отклонение меньше, чем для метода числовой регрессии. При этом имеют положительную величину 69,2 % значений отклонения δ_d для метода при задании коэффициента теплопроводности постоянной величиной и 80,5 % – для метода с переменной теплопроводностью. Отрицательную величину имеют 30,8 % значений этого отклонения для метода с постоянной теплопроводностью и 19,5 % – для метода с переменной теплопроводностью.

Величины среднеквадратичного отклонения F_d значений расчетной толщины ОЗП, определенных рассматриваемыми методами, от базовых величин $d_{Pmin Б}$, рассчитанные по формуле (2), составляют 93,8 %, 52,1 % и 79,9 %, соответственно для метода числовой регрессии и методов, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности при задании коэффициента теплопроводности постоянной и переменной величиной.

Таблица 4 – Значения отклонения δ_d , определенные для метода, в котором используется упрощенное уравнение теплопроводности при задании коэффициента теплопроводности постоянной величиной

Предел огнестойкости t_r , мин	30			45			60			90		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Критическая температура θ_{cr} , °C												
Приведенная толщина V/A_p , мм	Отклонение δ_d , %											
3,0	-	133,03	-	-	-	57,48	-	-	26,37	-	-	-
4,0	-	101,75	-	-	-	61,84	-	-	18,85	-	-	1,20
5,0	20,75	86,98	-	-	85,35	70,39	-	-	17,17	-	-	-37,61
10,0	-19,59	78,26	-	1,55	40,41	-	-	18,51	-	-	-	-22,78
15,0	-27,23	-	-	-20,52	40,78	-	-10,71	5,45	-	-	-10,60	-19,27

Таблица 5 – Значения отклонения δ_d , определенные для метода, в котором используется упрощенное уравнение теплопроводности при задании коэффициента теплопроводности переменной величиной

Предел огнестойкости t_r , мин	30			45			60			90		
	350	500	750	350	500	750	350	500	750	350	500	750
Критическая температура θ_{cr} , °C												
Приведенная толщина V/A_p , мм	Приведенная толщина						Отклонение δ_d , %					
3,0	4,43	93,39	255,7	-	38,03	101,33	-	-	37,77	-	-	-5,37
4,0	8,46	100,75	-	-	42,63	121,26	-	7,85	46,15	-	-	-1,95
5,0	11,31	106,35	-	-3,32	46,60	142,11	-	9,80	54,29	-	-	0,96
10,0	15,81	138,41	-	1,74	63,37	-	-14,29	18,22	105,3	-	-19,4	15,55
15,0	17,80	182,05	-	1,88	82,04	-	-11,36	25,45	173,3	-27,26	-15,6	30,89

Таблица 6 – Диапазоны отклонения δ_d , рассчитанного по формуле (1), и количество значений этого отклонения в интервалах этих диапазонов, определенные для стандартизированных методов

Стандартизированный метод	Диапазон отклонения δ_d , %	Количество значений отклонения δ_d в следующих интервалах, %			
		меньше 0	от 0 до 10 %	от 10 до 50 %	более 50 %
Числовая регрессия	от -23 до 286	20,0	4,0	36,0	40,0
Упрощенное уравнение $\lambda_p = \text{const}$	от -38 до 133	30,8	11,5	26,9	30,8
Упрощенное уравнение $\lambda_p = \text{var}$	от -27 до 256	19,5	17,1	29,3	34,1

$$F_d = \left[\sum_{j=1}^m (\delta_{d_j})^2 \right]^{0,5} \cdot m^{-0,5}, \quad (2)$$

где m – количество значений отклонения δ_d .

Из сравнения приведенных выше расчетных данных относительно отклонения δ_d и полученных для пассивного огнезащитного материала «Эндотерм 210104» [3] следует, что

для вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС» значения этого отклонения значительно выше, чем для указанного пассивного материала. В частности для материала «Эндотерм 210104» величина среднеквадратичного отклонения F_d значений минимальной толщины покрытия, определенных методом числовой регрессии, от значений, полученных методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности, составляет 53,3 %. Для

методов, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности при задании коэффициента теплопроводности постоянной и переменной величиной, отклонение F_d составляет соответственно 14,1 % и 16,6 %. Для огнезащитного покрытия «Феникс СТС» соответствующие отклонения составляют 93,8 %, 52,1 % и 79,9 %.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Стандартизированными методами (методом числовой регрессии, методами, в которых используется уточненное и упрощенное уравнения теплопроводности), приведенными в ДСТУ Б В.1.1-17, определены данные о значениях минимальной толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС» для диапазона изменения приведенной толщины стального профиля конструкции от 3 мм до 15 мм, критической температуры стали от 350 °С до 750 °С и нормируемого предела огнестойкости конструкции от 30 мин до 90 мин.

Установлено, что большая часть (76,6 %) значений минимальной толщины этого огнезащитного покрытия, полученных методом числовой регрессии и методами, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности, превышает величины, полученные методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности и решение обратной задачи теплопроводности. Наибольшее отклонение толщины огнезащиты от значений, полученных методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности, имеет место при использовании метода числовой регрессии. Величина среднеквадратичного отклонения

значений минимальной толщины огнезащиты, определенных этим методом, от значений, полученных методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности, составляет 93,8 %. Для методов, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности, это отклонение меньше, чем для метода числовой регрессии. Величина среднеквадратичного отклонения составляет 52,1 % и 79,9 %, соответственно для методов, в которых используется упрощенное уравнение теплопроводности при задании коэффициента теплопроводности постоянной и переменной величиной.

Определено, что расчетные данные относительно отклонения значений минимальной толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС», полученных методом, в котором используется уточненное уравнение теплопроводности и решение обратной задачи теплопроводности, от значений, полученных другими стандартизированными методами, значительно отличаются от аналогичных расчетных данных для пассивного огнезащитного материала «Эндотерм 210104». Значения этого отклонения для вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС» значительно выше, чем для указанного пассивного огнезащитного материала.

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) (Защита от пожара. Огнезащитные покрытия для строительных несущих металлических конструкций. Метод определения огнезащитной способности (ENV 13381-4:2002, NEQ)).
2. Григорьян Н.Б. Определение границ применимости и точности стандартизированных методов оценки огнезащитной способности покрытий несущих металлических конструкций / Н.Б. Григорьян, П.Г. Круковский, С.В. Новак // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2014. – № 1(29). – С. 50 – 59.
3. Новак С.В. Оценка огнезащитной способности вермикулито-цементной плиты «Эндотерм 210104» стандартизированными методами / С.В. Новак, П.Г. Круковский, Н.Б. Григорьян // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2017. – № 1 (3). – С. 11 – 18.
4. Григорьян Н.Б. Оценка огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия «Феникс СТС» / Н.Б. Григорьян, В.Д. Полищук, П.Г. Круковский, С.В. Новак // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2014. – № 17 – С. 34–38.

EVALUATION OF THE FIREPROOF ABILITY OF INTUMESCENT COATING FOR LOAD-BEARING STEEL CONSTRUCTIONS BY STANDARDIZED METHODS

S. Novak¹, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Fellow, P. Kruckovsky², Doc. of Sc. (Eng.), Prof., N. Hryhorian³, Cand. of Sc. (Eng.), B. Hryhorian³, Cand. of Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

¹The Ukrainian Civil Protection Research Institute, Ukraine

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

³Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS

heat conduction problem, critical temperature of steel, fireproof ability, fire resistance limit, steel construction, standardized methods.

ANNOTATION

The results of determining the characteristics of the fireproof ability of intumescent coating for steel constructions "Phoenix STS" obtained by standardized methods given in National Standard DSTU B V.1.1-17 are presented. Data on the value of the minimum thickness of this coating is defined for ranges of the change in the thickness of the steel profile from 3 mm to 15 mm, the critical temperature of the steel from 350 °C to 750 °C, and the normalized fire resistance limit of the constructions from 30 minutes to 90 minutes. As the initial data for solving the task experimental data received from tests in accordance with DSTU B V.1.1-17 were accepted. It was established that most of the values of the minimum thickness of the fireproof coating obtained by the method of numerical regression and the methods in which the simplified equation of heat conductivity is used exceeds the values obtained by the method, which uses the refined equation of heat conduction and the solution of the inverse heat conduction problem. The greatest deviation of the thickness of the fireproofing from the values obtained by the method in which the refined equation of heat conductivity is used occurs when using the method of numerical regression. A comparison of these results with the data obtained for the passive fireproof material "Endotherm 210104" is made. It is determined that the calculated data on the deviation of the values of the minimum thickness of the fireproof covering "Phoenix STS" obtained by the method, which uses the refined equation of heat conduction and the solution of the inverse heat conduction problem, from the values obtained by other standardized methods, differ significantly from similar calculations for the fireproof material "Endotherm 210104". The value of this deviation for the fireproof coating "Phoenix STS" is much higher than for the specified passive fireproof material

ОЦІНКА ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ, ЩО СПУЧУЄТЬСЯ, ДЛЯ НЕСУЧИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ СТАНДАРТИЗОВАНИМИ МЕТОДАМИ

С.В. Новак¹, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., П.Г. Круковський², докт. техн. наук, проф., М.Б. Григор'ян³, канд. техн. наук, Б.Б. Григор'ян³, канд. техн. наук, доц.

¹Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Україна

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту, Україна

КЛЮЧОВІ СЛОВА

задача теплопровідності, критична температура сталі, вогнезахисна здатність, межа вогнестійкості, сталева конструкція, стандартизовані методи.

АНОТАЦІЯ

Наведено результати визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття «Фенікс СТС», що спучується, для несучих сталевих конструкцій стандартизованими методами, встановленими в ДСТУ Б В.1.1-17. Дані про значення мінімальної товщини цього вогнезахисного покриття визначено для діапазонів зміни зведеної товщини сталевого профілю від 3 мм до 15 мм, критичної температури сталі від 350 °C до 750 °C і нормованої межі вогнестійкості конструкції від 30 хв до 90 хв. В якості вихідних даних для вирішення поставленого завдання були прийняті експериментальні дані, отримані при випробуваннях по ДСТУ Б В.1.1-17. Встановлено, що більша частина значень мінімальної товщини вогнезахисного покриття, отриманих методом числової регресії і методами, в яких використовується спрощене рівняння теплопровідності, перевищує величини, отримані методом, в якому використовується уточнене рівняння теплопровідності і рішення оберненої задачі теплопровідності. Найбільше відхилення товщини вогнезахисту від значень, отриманих методом, в якому

використовується уточнене рівняння теплопровідності, має місце при використанні методу числової регресії. Зроблено порівняння цих результатів з даними, отриманими для пасивного вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104». Визначено, що розрахункові дані щодо відхилення значень мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Фенікс СТС», отриманих методом, в якому використовується уточнене рівняння теплопровідності і рішення оберненої задачі теплопровідності, від значень, отриманих іншими стандартизованими методами, значно відрізняються від аналогічних розрахункових даних для вогнезахисного матеріалу «Ендотерм 210104». Значення цього відхилення для вогнезахисного покриття «Фенікс СТС» значно вище, ніж для зазначеного пасивного вогнезахисного матеріалу.