

УДК 699.61

*В.А. Андронов, д-р техн. наук, профессор, проректор, НУЦЗУ,
Є.О. Рибка, науковий співробітник, НУЦЗУ*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕАКТИВНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ РЕАЛЬНИХ ПОЖЕЖ

Проведено математичне планування та обробка результатів експерименту для встановлення закономірностей впливу температурного режиму пожежі на вогнезахисні властивості реактивних покриттів для металевих конструкцій.

Ключові слова: реактивне покриття, температурний режим, експеримент, фактор, дослід, коефіцієнт регресії, дисперсія.

Постановка проблеми. З метою забезпечення регламентованої [1] межі вогнестійкості металевих конструкцій застосовуються переважно реактивні вогнезахисні покриття, завдяки їх високій ефективності, низькій витраті вогнезахисного матеріалу та незначного навантаження на фундамент та конструкцію. Практика сьогодення при проектуванні та забезпеченні вогнезахисту потребує нових достовірних даних щодо комплексу вогнезахисних властивостей реактивних покриттів. Тому встановлення закономірностей впливу різних факторів на вогнезахисні властивості покриттів є актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проаналізувавши багаторічні дослідження розвитку пожеж в будівлях та спорудах [2-8] встановлено, що інтенсивність і тривалість пожежі змінюється в кожному конкретному випадку і відрізняється від стандартної кривої "температура-час" [1] (Рис. 1), яка застосовується для відтворюваності стандартних експериментальних досліджень.

В існуючих методах дослідження вогнезахисної здатності [1, 9-10] та ідентифікації теплофізичних характеристик (ТФХ) [11-12] реактивних вогнезахисних покриттів випробування проводяться в умовах стандартного температурного режиму та не враховуються температурні режими реальних пожеж, що приводить до недостовірних даних щодо вогнезахисних властивостей покриттів.

Постановка завдання та його вирішення. В зв'язку з вище сказаним виникає необхідність у встановленні математичних залежностей комплексу вогнезахисних властивостей (вогнезахисна здатність, коефіцієнт спучення, коефіцієнт втрати маси та механічна міцність) від товщини реактивного покриття та режиму нагрівання.

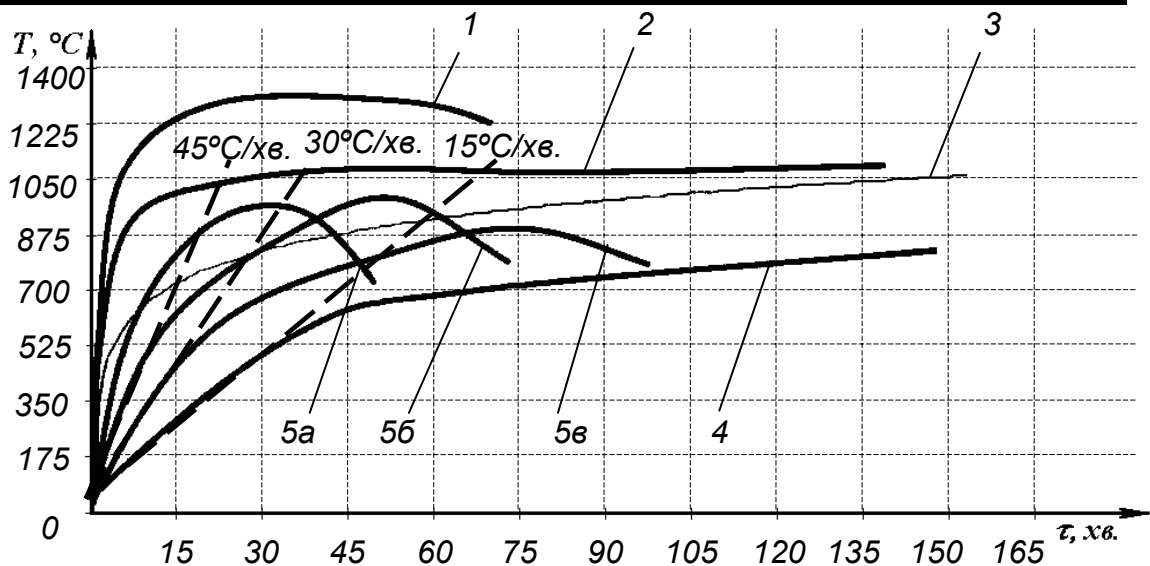


Рис. 1 – Температурні режими пожежі в приміщеннях будівель і споруд різного призначення: 1 - для пожеж у тунелях; 2 - для пожеж у будинках нафтопереробної і хімічної промисловості; 3 - стандартна температурна крива пожежі; 4 - для пожеж у підвалах; 5 - режими пожеж у житлових приміщеннях з різними площами прорізів (від а до в площа прорізів зменшується від 2 м^2 до 1 м^2).

Для описання цих залежностей в роботі використовували повний факторний експеримент (ПФЕ). Вогнезахисні властивості обрано в якості вихідної змінної y (відгуку).

Мета дослідження полягає у визначенні та аналізі y як функції від наступних факторів:

$$y = \varphi(h, V), \quad (1)$$

де y – значення вогнезахисної властивості реактивного покриття;
 h – товщина реактивного покриття в початковому стані, мм;
 V – швидкість нагріву, $^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$

На основі аналізу даних, отриманих під час проведення пошукового експерименту, зроблено висновок, що для забезпечення необхідної межі вогнестійкості (30, 45, 60, 90 хв.) товщина реактивного покриття h змінюється в межах від 1 до 3 мм відповідно; а всі температурні режими на етапі розвитку пожежі (перших 10 – 40 хв.) мають лінійну швидкість зміни температури V . Також передбачається, що криві відгуку (вогнезахисні властивості) від вищевказаних факторів будуть мати деяку кривизну, тому для побудови математичної моделі необхідний поліном другого ступеня. Відповідно до математичної теорії експерименту [13], можливість передбачити поведінку функції відгуку дає ортогональний центральний композиційний план другого порядку. Проведення експерименту відповідно до цього плану дозво-

ляє встановити аналітичну залежність функції відгуку y від відповідних факторів у вигляді поліноміального рівняння другого ступеня:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2)$$

де x_i, x_j – незалежні змінні (фактори); b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії.

Конструювання ортогонального плану другого порядку полягає в додаванні експериментальних точок до ядра ПФЕ, а саме, нарощування точок до розташованих у центрі плану (на нульовому рівні факторів) і на деякій відстані від центра («зоряних точках»). У випадку двох факторного експерименту ($k = 2$) при варіюванні фактору на двох рівнях загальна кількість дослідів: $n = 2^k + 2k + 1 = 9$, тому що 2^k – число точок ядра ПФЕ, $2k$ – кількість зоряних точок, 1 – одна нульова точка в центрі плану.

Планування, проведення та обробка результатів експерименту складається з наступних обов'язкових етапів: кодування факторів; складання план-матриці експерименту; реалізація плану експерименту; перевірка відтворюваності дослідів; перевірка адекватності поліноміальної моделі.

Кодування факторів застосовано для переведення натуральних факторів (товщина реактивного покриття, швидкість нагрівання) в безрозмірні величини для можливості побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту. Для переведення натуральних змінних в кодовані x_i заповнено таблицю кодування змінних (Табл. 1). В якості нульового рівня факторів обрано центр інтервалу, в якому передбачено проводити експеримент.

Таблиця 1 – Кодування факторів, їх значення та інтервали варіювання при дослідженні вогнезахисних властивостей реактивних покриттів для металевих конструкцій.

| Інтервал варіювання та рівень факторів | Товщина шару (до спучення) h , мм | Швидкість нагріву V , °C/хв. |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| Нульовий рівень $x_i = 0$ | 2 | 25 |
| Інтервал варіювання δ_i | 1 | 15 |
| Нижній рівень $x_i = -1$ | 1 | 10 |
| Верхній рівень $x_i = +1$ | 3 | 40 |
| Кодове позначення | x_1 | x_2 |

Межі зміни факторів x_1 та x_2 задані з урахуванням проведених попередніх досліджень, а інтервал варіювання є мінімальним для отримання рівняння та достатнім для відсутності помилкового висновку про незначимість одного із факторів.

Зв'язок між кодовим та натуральним значенням фактора задається формулою:

$$x_i = \frac{X_i - x_{i_0}}{\delta_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (3)$$

де X_i – натуральне значення фактора; x_{i_0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; δ_i – інтервал варіювання i -го фактора.

Основними функціями відгуку є коефіцієнт вогнезахисної здатності y_1 , коефіцієнт спучення y_2 , коефіцієнт втрати маси y_3 , механічна міцність y_4 спученого вогнезахисного шару.

Складання план-матриці експерименту здійснюється за рахунок чергування рівнів фактора x_2 в кожному досліді, а x_1 – через три досліді (Табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту з вивчення залежності вогнезахисних властивостей реактивного покриття від його товщини (x_1) та швидкості нагріву (x_2)

| № досліді | Кодовані значення вхідних змінних | | | | |
|-----------|-----------------------------------|-------|---------|---------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | x_1 | x_2 | x_1^2 | x_2^2 | $x_1 x_2$ |
| 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | -1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 3 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 4 | 0 | -1 | 0 | 1 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Експеримент проводився на розробленій лабораторній установці з дослідження вогнезахисних властивостей [17]. В таблиці 3 представлені результати реалізації плану експерименту.

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводився за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} Y_u}{x_{iu}^2}, \quad (4)$$

де i – номер стовпця в матриці планування; x_{iu} – елементи i -того стовпця.
 Дослідження вогнезахисних властивостей реактивних покриттів для металевих конструкцій з 11 урахуванням температурних режимів реальних пожеж

Таблица 3 – Результати експерименту з вивчення залежності вогнезахисних властивостей реактивного покриття від його товщини (x_1) та швидкості нагріву (x_2).

| № дослідю | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 3 | 1,50 | 78,55 | 2 |
| 2 | 5 | 3,00 | 76,41 | 10 |
| 3 | 8 | 15,0 | 64,78 | 12 |
| 4 | 4 | 1,80 | 69,16 | 3 |
| 5 | 6 | 3 | 73,00 | 15 |
| 6 | 10 | 10 | 65,87 | 13 |
| 7 | 7 | 1,8 | 70,45 | 5 |
| 8 | 12 | 4 | 69,89 | 12 |
| 9 | 22 | 9,00 | 67,33 | 15 |

Розраховані значення коефіцієнтів регресії представлені в Таблиці 4.

Таблица 4 – Значення коефіцієнтів регресії

| Коефіцієнт регресії | Значення коефіцієнтів регресії | | | |
|---------------------|--------------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 |
| b_0 | 5,778 | 2,811 | 71,839 | 13,00 |
| b_1 | 4,167 | <u>-0,783</u> | -2,011 | 1,333 |
| b_2 | 4,33 | 4,816 | -3,363 | 5,000 |
| b_{11} | 2,833 | <u>0,783</u> | <u>1,892</u> | <u>-1,00</u> |
| b_{22} | <u>1,333</u> | 3,183 | -3,743 | -4,00 |
| b_{12} | 2,500 | -1,575 | 2,662 | <u>0</u> |

Для перевірки значимості коефіцієнтів регресії знаходили його дисперсію за формулою:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}. \quad (5)$$

Дисперсія помилок дослідю визначається за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n \sum_{q=1}^m (y_q^{4i} - \bar{y}_u)^2}{n(m-1)}, \quad (6)$$

де m – число паралельних досвідів; n – число незалежних оцінок дисперсії.

Коефіцієнт регресії вважається значимим, якщо виконується нерівність:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \cdot S_{bi}, \quad (7)$$

де $t_{(0,05;f_y)}$ – 5 %-я точка розподілу Стюдента з f_y ступенями свободи; Δb_i – довірчий інтервал для коефіцієнта регресії.

Перевірка адекватності моделі, що відповідає рівнянню регресії виконуємо за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, якщо виконується нерівність:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} \leq F_{(0,05;f_{ад};f_y)}, \quad (8)$$

де дисперсія адекватності $S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_{\text{мод}})^2}{f_{ад}}$; $y_{\text{мод}}$ – розрахункове значення відгуку в i -тому досліді; $f_{(0,05;3;9)}$ – критерій Фішера при 5% рівні значимості; $f_{ад} = n - 0,5(k+2)(k+1)$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності $9 - 0,5(2+2)(2+1) = 3$; f_y – число ступенів свободи при визначенні помилки досліді.

Результати перевірки значимості коефіцієнтів регресії та адекватності моделі представлені в Таблиці 5.

Таблиця 5 – Статистичний аналіз рівнянь регресії

| Коефіцієнт регресії | Значення коефіцієнтів регресії | | | |
|---------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 |
| S_y^2 | 2,26 | 2,19 | 1,84 | 3,11 |
| Δb_0 | 1,90 | 1,87 | 2,98 | 2,24 |
| Δb_1 | 1,04 | <u>1,03</u> | 1,63 | 1,22 |
| Δb_2 | 1,04 | 1,03 | 1,63 | 1,22 |
| Δb_{11} | 1,80 | <u>1,78</u> | <u>2,82</u> | <u>2,12</u> |
| Δb_{22} | <u>1,80</u> | 1,78 | 2,82 | 2,12 |
| Δb_{12} | 1,28 | 1,26 | 1,99 | <u>1,49</u> |
| S_{bi}^2 | 6,78 | 6,56 | 5,52 | 9,33 |
| $f_{ад}$ | 3 | 3 | 3 | 3 |
| F | 3 | 2,99 | 3 | 3 |
| $F_{(0,05;3;9)}$ | 3,86 | 3,86 | 3,86 | 3,86 |

Статистичний аналіз рівнянь регресії показав, що отримані рівняння регресії адекватні експериментальним даним при рівні значимості 0,05 (критерій Фішера). Аналіз даних таблиць 4 та 5 показав, що деякі коефіцієнти регресії являються не значимими, так як вони

накриваються довірчими інтервалами і відповідно рівні нулю.

За допомогою програми «Maple» за отриманими рівняннями регресії були побудовані поверхні відгуків (Рис. 2-5), що дають можливість зорового сприйняття відповідного геометричного образу.

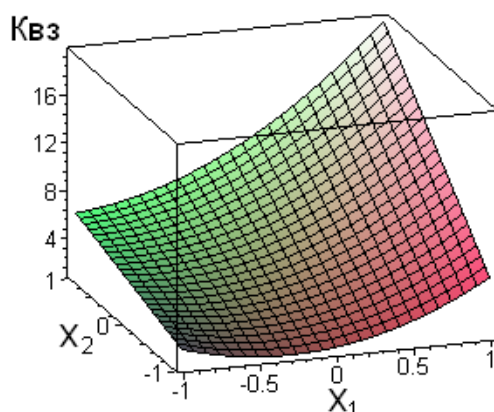


Рис. 2 – Поверхня відгуку, що описується рівнянням регресії $y_1 = 5,78 + 4,17x_1 + 4,33x_2 + 2,83x_1^2 + 2,5x_1x_2$ залежності коефіцієнта вогнезахисної здатності ($K_{вз}$) покриття від початкової товщини (x_1) та швидкості нагрівання (x_2).

З поверхні відгуку залежності коефіцієнта вогнезахисної здатності від товщини покриття та швидкості нагрівання (Рис. 2) видно, що зміна коефіцієнта вогнезахисної здатності від відповідних факторів носить квадратичний характер. При зростанні швидкості нагрівання та товщини покриття коефіцієнт вогнезахисної здатності покриття теж підвищується. А при інтенсивності нагрівання більше 30 °С/хв. спостерігається різкий стрибок коефіцієнта вогнестійкості.

Отримана поверхня відгуку коефіцієнта спучення від відповідних факторів (Рис. 3) показала, що незалежно від товщини покриття при низьких швидкостях нагрівання (до 25 °С/хв.) ефекту спучування практично не спостерігається, а при підвищенні швидкості - коефіцієнт спучення збільшується обернено-пропорційно до початкової товщини покриття.

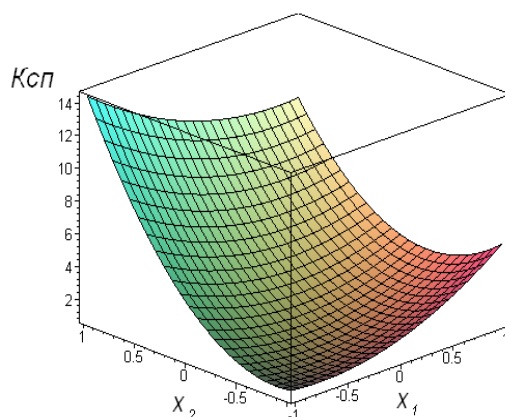


Рис. 3 – Поверхня відгуку, що описується рівнянням регресії $y_2 = 2,81 + 4,82x_2 + 3,18x_2^2 - 1,58x_1x_2$ залежності коефіцієнта спучення ($K_{сп}$) вогнезахисного покриття від початкової товщини (x_1) та швидкості нагрівання (x_2).

На Рисунку 4 представлена поверхня відгуку, що описується рівнянням регресії y_3 залежності коефіцієнта втрати маси (K_m) покриття від факторів (x_1) та (x_2).

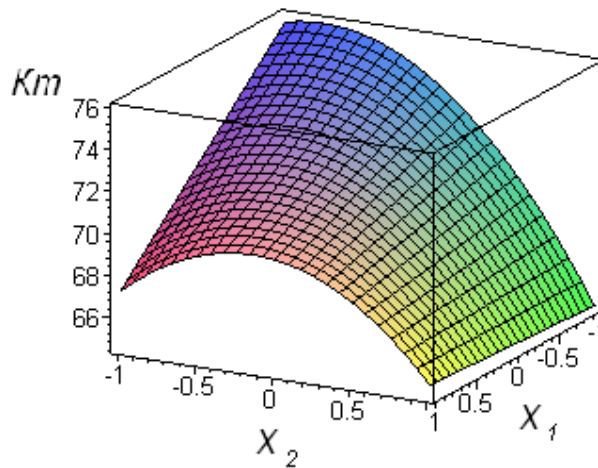


Рис. 4 – Поверхня відгуку, що описується рівнянням регресії $y_3=71,84-2,01x_1-3,36x_2-3,74x_2^2+2,27x_1x_2$ залежності коефіцієнта втрати маси (K_m) вогнезахисного покриття від початкової товщини (x_1) та швидкості нагрівання (x_2).

Встановлено, що механічна міцність (Рис. 5) спученого шару залежить майже лінійно від факторів (x_1 , x_2). Тобто при збільшенні товщини покриття та швидкості нагрівання механічна міцність спученого шару теж зростає.

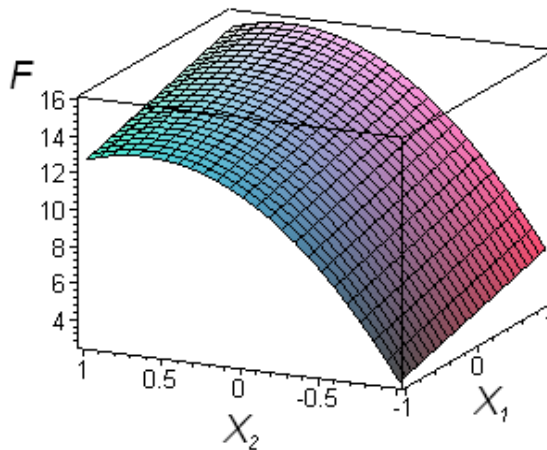


Рис. 5 – Поверхня відгуку, що описується рівнянням регресії $y_4=13+1,33x_1+5x_2+4x_2^2$ залежності механічної міцності (F) спученого вогнезахисного покриття від початкової товщини (x_1) та швидкості нагрівання (x_2).

Висновки. Встановлено, що при повільному нагріванні вогнезахисний ефект реактивних покриттів практично відсутній, що свідчить про неефективність існуючих методів випробування даних покриттів та необхідність розробки рекомендацій щодо їх удосконалення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги: ДСТУ Б.В. 1.1-4-98. – [Чинний від 1999-03-01]. – К. – Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1998. – 20 с. – (Національний стандарт України).
2. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Ройтман В.М. – М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука». 2001. — 382 с.
3. Яковлев А.И. Огнестойкость одноэтажных производственных зданий в зависимости от пожарной нагрузки / Яковлев А.И., Стороженко Т.Е. // Промышленное строительство. – 1979. - № 9. - С. 37-39.
4. Башкирцев М.П. Исследование температурного режима при пожарах в зданиях на моделях / Башкирцев М.П. // Труды Высшей школы МВД. – М: НИРЧО, 1966. - № 13.-С. 51-58.
5. Молчадский И.С. Расчет эквивалентной продолжительности пожара для основных строительных конструкций / Молчадский И.С., Гомазов А.В., Зотов СВ. // Поведение строительных конструкций в условиях пожара. - М.: ВНИИПО, 1987.- С. 60-68.
6. Стороженко Т.Е. Оценка пожарной опасности производственных зданий и помещений на основе пожарной нагрузки: Реферат, инф-я. / Стороженко Т.Е., Федоров В.В., Измаилов А.С. - М.: ЦНИИСК, 1978. - Серия IV. - Вып. 9.
7. Lie T.T. Characteristic temperature curves for various fire severities / Lie T.T. // Fire Technol. – 1974 (10). – № 4. - P. 315-326.
8. Rubini. P., SOFIE - Simulation of Fires in Enclosures, V 3.0 Users guide, School of Mechanical Engineering, Granfield University (UK), 2000.
9. Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (EN 13381-4:2002, NEQ) : ДСТУ Б В 1.1-17:2007. – [Чинний від 2008-01-01] – К.: УКРАРХБУДІНФОРМ, 2009. – XIV, 105 с. – (Національний стандарт України).
10. Круковский П.Г. Определение теплофизических характеристик вспучивающегося покрытия по данным испытаний на огнестойкость / Круковский П.Г., Цвиркун С.В. // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2005. – №1(11). – С. 5-13.
11. Огнезащитные составы для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности: НПБ 236-97. – [Действующий с 1997-06-01, введены в действие приказом ГУГПС МВД РФ от 29 апреля 1997 г. N 25] –М., 1997. – 8 с.

12. Определение теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий по металлу: Методика. – М.: ВНИИПО, 1998. - 19 с.

13. Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов / [Блохин В.Г., Глудкин О.П., Гуров А.И. Ханин М.А.]. – М.: Радио и связь, 1997. – 232 с.

14. Андронов В.А. Лабораторна установка для визначення вогнезахисних властивостей реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій / Андронов В.А., Рыбка Є.О. // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: УГЗУ, 2009. – Вып. 26. – С. 3 – 11.
puszu.edu.ua

Андронов В.А., Рыбка Е.А.

Исследование огнезащитных свойств реактивных покрытий для металлических конструкций с учетом температурных режимов реальных пожаров

Проведено математическое планирование и обработка результатов эксперимента для установления закономерностей влияния температурного режима пожара на огнезащитные свойства реактивных покрытий для металлических конструкций.

Ключевые слова: реактивное покрытие, температурный режим, эксперимент, фактор, опыт, коэффициент регрессии, дисперсия.

Andronov V.A., Rybka Ye.A.

Experiment planning on research of fireproof properties of reactive coverages for metal constructions taking into account temperature modes of real fires

The mathematical planning and processing of experimental data to establish patterns of influence of the temperature regime of fire retardants on the properties of reactive coverages for metal constructions.

Keywords: reactive coverage, temperature mode, experiment, the factor, experience, regress factor, dispersion.