

УДК 614.841.332

МЕТОДИКА ПОПЕРЕДНЬОЇ ОЦІНКИ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОКРИТТІВ ДЛЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ ПОЖЕЖІ

А.І. Ковальов*, канд. техн. наук, ст. наук. співр., Н.В. Зобенко

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції 15.06.2016
Пройшла рецензування: 18.07.2016

Ключові слова:

вогнезахисне покриття, вогневий вплив, вогнезахисна здатність, математична модель, обернена задача теплопровідності, сталева конструкція, температурний режим вуглеводневої пожежі

АНОТАЦІЯ

Викладено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій розрахунково-експериментальним методом в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі. Наведено дані щодо апробації цієї методики при оцінці вогнезахисної здатності покриття на водній основі «Amotherm Steel Wb», що случується. Показано, що для критичної температури сталі 500 °С і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв значення мінімальної товщини зазначеного вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі у 2 рази більші, ніж для стандартного температурного режиму

Постановка проблеми. Для оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій існує стандартизована методика [1], згідно якої випробування зразків проводять в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Проте, ця методика не враховує поведінку сталевих конструкцій при їх випробуваннях в умовах інших температурних режимів, наприклад режимі вуглеводневої пожежі. На сьогоднішній день в Україні впроваджуються європейські стандарти і відкритим залишається питання визначення вогнезахисної здатності покриттів для альтернативних режимів, наприклад режиму вуглеводневої пожежі. Температурний режим вуглеводневої пожежі відноситься до жорсткіших режимів, ніж режим стандартної пожежі. Цей режим призначений для представлення впливів пожеж вуглеводневих пожежних навантажень і його використовують при оцінці вогнестійкості будівельних конструкцій, що застосовують переважно на об'єктах нафтової промисловості, температура горіння яких зростає значно швидше і має більші значення, ніж при горінні будь-яких інших будівельних і облицювальних матеріалів. Також температурний режим вуглеводневої пожежі застосовують для оцінки вогнестійкості несучих конструкцій на об'єктах підвищеної пожежонебезпеки – залізничних і автомобільних тунелях, обладнання з видобутку, переробці і транспортуванні газу, нафти і нафтопродуктів тощо. Тому актуальною на теперішній час є розробка методики оцінки

вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі. **Метою даної роботи** є розробка методики попередньої оцінки (далі – методика оцінки) вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі, яка дозволяє визначати значення мінімальної товщини покриттів залежно від тривалості вогневого впливу та критичної температури сталі за результатами випробувань зразків зменшених розмірів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Попередня оцінка вогнезахисної здатності покриттів є одним із етапів визначення цієї здатності для покриттів сталевих конструкцій і передуює проведенню випробувань на вогнестійкість зразків сталевих конструкцій (балок та колон) встановлених в стандарті [1] розмірів. Розробка такої методики оцінки, яка б враховувала специфіку роботи сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі, можливо за рахунок використання розрахунково-експериментального методу, який дозволяє за результатами випробувань, використовуючи математичні та фізичні моделі, оцінювати вогнезахисну здатність покриттів і вогнестійкість сталевих конструкцій. Слід відзначити, що даний метод добре зарекомендував себе в роботах таких вчених, як Круковський П.Г., Харченко І.О., Новак С.В., Цвіркун С.В., Поздєєв С.В., Качкар Є.В., Довбиш А.В., Ковальов А.І., Якименко О.П. та ін.

* E-mail: naucovec@ukr.net (A.Kovaliov)

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

Запропонована методика попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів сталевих конструкцій в умовах температурного режиму вуглеводневої пожежі має такі етапи:

1. Проведення експериментів по визначенню температури з необігрівної поверхні сталеві пластина з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

2. Визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття шляхом розв’язання оберненої задачі теплопровідності (далі – ОЗТ).

3. Визначення характеристики вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття – залежності мінімальної товщини покриття від товщини сталеві пластина, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі, шляхом розв’язання прямих задач теплопровідності (далі – ПЗТ).

Згідно **першого пункту методики** проводять експерименти з визначення проміжку часу від початку температурного впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі на сталеву пластину з нанесеним засобом вогнезахисту до підвищення її температури до критичної. Експерименти проводять у вогневій печі.

Температурний режим вуглеводневої пожежі визначається за формулою [2]:

$$T_g = 1080 (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20, \quad (1)$$

T_g – температура газового середовища біля конструкції, °C;

t – час, хв.

Згідно **другого пункту методики** за експериментальними даними вимірювання температури сталевих пластин та температури в печі шляхом розв’язання ОЗТ визначають теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття. При цьому застосовують таку математичну модель, яку побудовано для прийнятої фізичної моделі теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталеві пластина – теплоізоляція» (рис. 1):

$$c_v(x, t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x, t) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\lambda_p \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \alpha^* [T_{c1}(t) - T(0, t)], \quad (3)$$

$$\alpha^* = \alpha_{c1} + \frac{C_0 \varepsilon}{T_{c1}(t) - T(0, t)} \left\{ \left[\frac{T_{c1}(t) + 273}{100} \right]^4 - \left[\frac{T(0, t) + 273}{100} \right]^4 \right\}, \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(X, t)}{\partial x} = \alpha^{**} [T(X, t) - T_{c2}], \quad (5)$$

де c_v – питома об’ємна теплоємність, Дж/(м³·К), λ_p – коефіцієнт теплопровідності вогнезахисного покриття, Вт/(м·К), λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), T – температура, t – час, x – координата, α_{c1} – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від гарячих газів до поверхні вогнезахисного покриття, що нагрівається, α^{**} – коефіцієнт тепловіддачі від необігрівної поверхні теплоізоляції, C_0 – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла ($C_0 = 5,67$), ε – коефіцієнт випромінювання поверхні вогнезахисного покриття, що нагрівається; T_{c1} – температура гарячих газів у печі при випробуванні; T_{c2} – температура повітря з необігрівної поверхні теплоізоляції, T_0 – початкова температура. Багатошаровість системи враховується залежностями c_v і λ від координати.

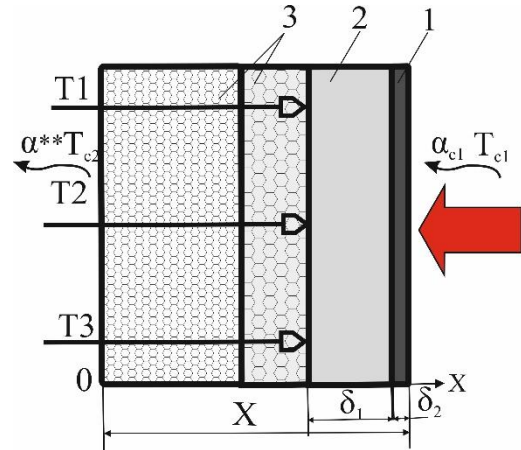


Рисунок 1 – Фізична модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталеві пластина – теплоізоляція»: 1 – вогнезахисне покриття; 2 – сталеві пластина; 3 – 2 шари теплоізоляційного матеріалу.

Зазначена математична модель враховує те, що обігрівна поверхня вогнезахисного нагрівається конвективно-радіаційним шляхом від гарячих газів в печі з температурою T_{c1} . Усередині системи «вогнезахисне покриття – сталеві пластина – теплоізоляція» тепло передається кондуктивним шляхом.

Приймається умова ідеального теплового контакту між шарами системи. З необігрівної поверхні теплоізоляції теплообмін відбувається шляхом конвекції.

Для визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття запропоновано застосувати екстремальний метод розв'язання ОЗТ, згідно з яким необхідно знайти такі значення параметрів (P) теплофізичних характеристик, для яких величина середньоквадратичного відхилення ϕ розрахункових $T_{M,i}$ і експериментальних $T_{E,i}$ значень середньої температури на необігрівній поверхні сталеві пластини буде мінімальною

$$\phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n [T_{M,i}(P) - T_{E,i}]^2} \quad (6)$$

де n – кількість експериментальних значень температури сталеві пластини в часі.

При розв'язанні ОЗТ математичну модель (2)-(5) інтегрують чисельно методом кінцевих різниць з використанням неявної схеми апроксимації похідних по координаті x і часу t.

Згідно **третього пункту методики** використовуючи математичну модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталеві пластини» (без шару теплоізоляції), яка відрізняється від моделі (2)-(5) тим, що на

внутрішній поверхні сталеві пластини задається умова теплової симетрії (відсутність теплового потоку), розв'язанням серії ПЗТ визначають залежність мінімальної товщини покриття від товщини сталеві пластини, нормованої тривалості вогневого впливу та критичної температури сталі.

Запропоновану методику було апробовано при оцінці вогнезахисної здатності покриття на водній основі «Amotherm Steel Wb», що случується.

Було сплановано та проведено експерименти в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі та за стандартного температурного режиму (для порівняння часу досягнення критичної температури сталі). Експерименти проводили із застосуванням металевих пластин зі сталі Ст. 3 розмірами 500 мм × 500 мм × 5 мм. Вогнезахисне покриття наносили механізованим способом із застосуванням агрегату безповітряного розпилення відповідно до [3]. Середня товщина покриття складала 0,42 мм. Експерименти проводили при температурі повітря 20 °С, відносній вологості повітря 48 % та тискові 743 мм рт. ст. Результати вимірювань температури в печі та на необігрівній поверхні сталеві пластини в умовах вогневого впливу тривалістю 15 хв за температурним режимом вуглеводневої пожежі наведені на рис. 2,3.

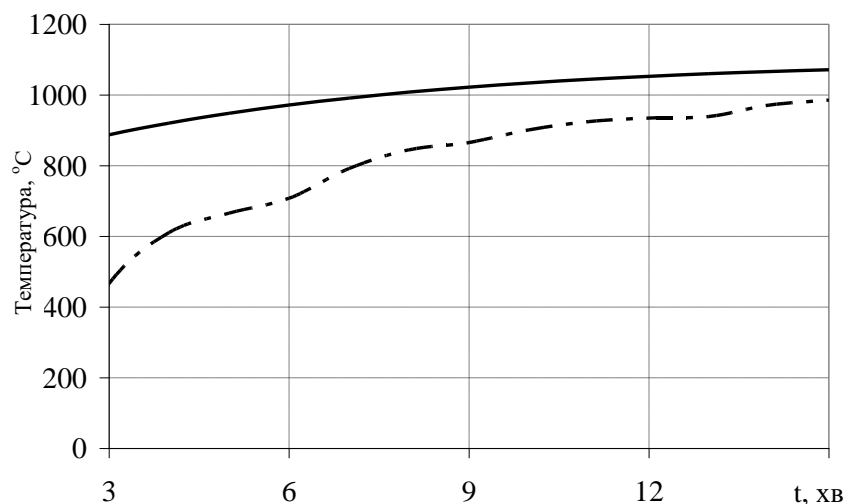


Рисунок 2 – Залежність температури в печі від тривалості вогневого впливу:

- вуглеводнева крива по ДСТУ Б В 1.1-4 [2];
- - - - температурна крива під час експерименту в печі.

Як видно із рис. 2, після 3 хв вогневого впливу температура в печі наближається до температури вуглеводневої пожежі і на 15 хв досягає 986 °С. Температура з необігрівної

поверхні сталеві пластини при цьому за 15 хв досягла критичної температури сталі 500 °С (рис. 3).

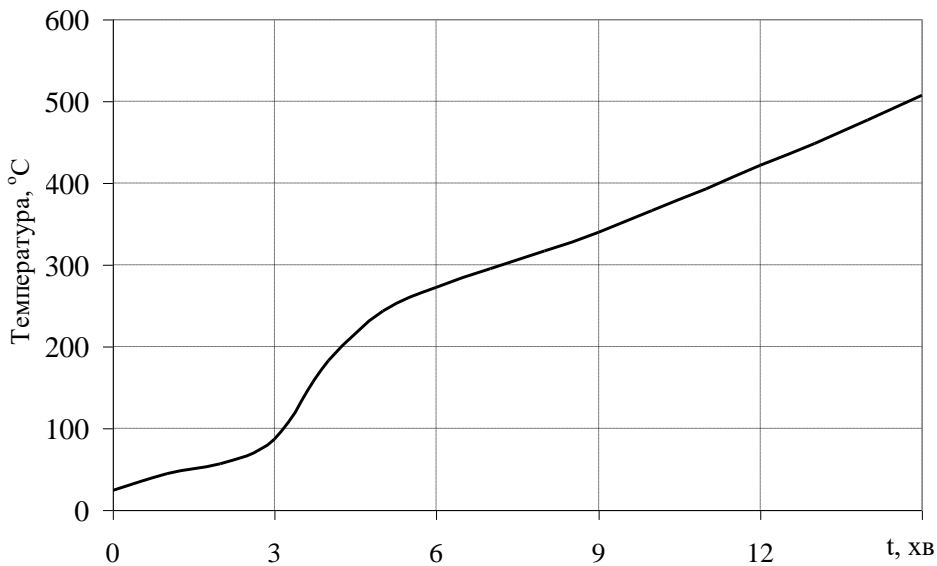


Рисунок 3 – Залежність середньої температури з необігрівної поверхні сталеві пластины з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» від часу вогневого впливу за температурним режимом вуглеводневої пожежі.

Порівнюючи час прогріву сталеві пластины з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» при вогневому впливі за температурного режиму вуглеводневої пожежі та за стандартного температурного режиму, впливає, що при товщині покриття 0,42 мм,

час, за який сталеві пластины товщиною 5 мм прогрівається до критичної температури 500 °С при стандартному температурному режимі в 1,9 разів більший, ніж при температурному режимі вуглеводневої пожежі (рис. 4).

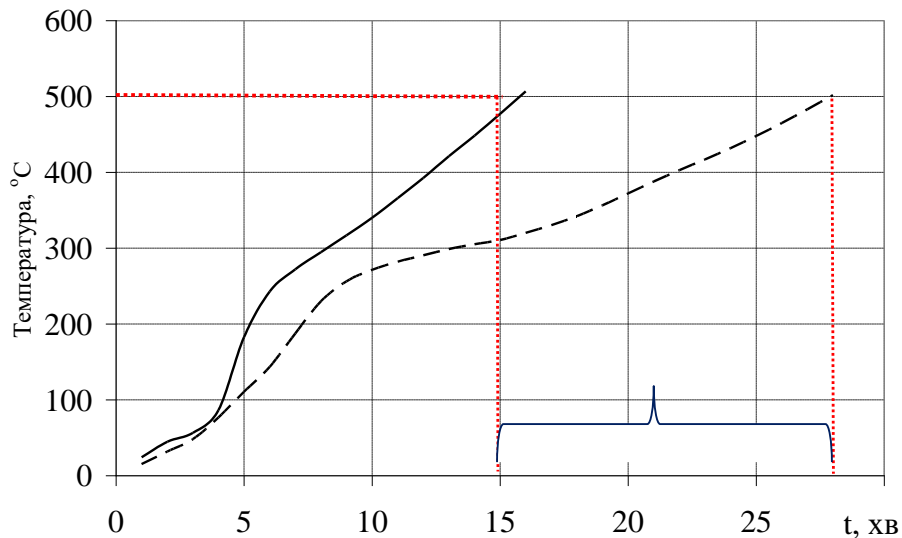


Рисунок 4 – Залежність температури з необігрівної поверхні сталеві пластины від часу вогневого впливу при різних температурних режимах пожежі: суцільна крива – при стандартному температурному режимі пожежі; пунктирна крива – при температурному режимі вуглеводневої пожежі.

Із застосуванням отриманих експериментальних даних шляхом розв'язання оберненої задачі теплопровідності екстремальним методом [4] були визначені теплофізичні характеристики вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb»: залежність коефіцієнту теплопровідності від температури

та постійне значення питомої об'ємної теплоємності, які наведено в [5].

Використовуючи математичну модель теплового стану в системі «вогнезахисне покриття – сталеві пластины» і дані щодо теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» [5], шляхом

розв'язання серії ПЗТ визначено залежність мінімальної товщини покриття від товщини сталеві пластини для критичної температури сталі 500 °С і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв, наведену на рис. 5. При розрахунках теплофізичні характеристики сталі

та інші параметри математичної моделі брались з [6]. Прямі задачі теплопровідності розв'язували чисельним методом кінцевих різниць. Кількість вузлів становило 25 вузлів по просторовій координаті, крок за часом 30 с.

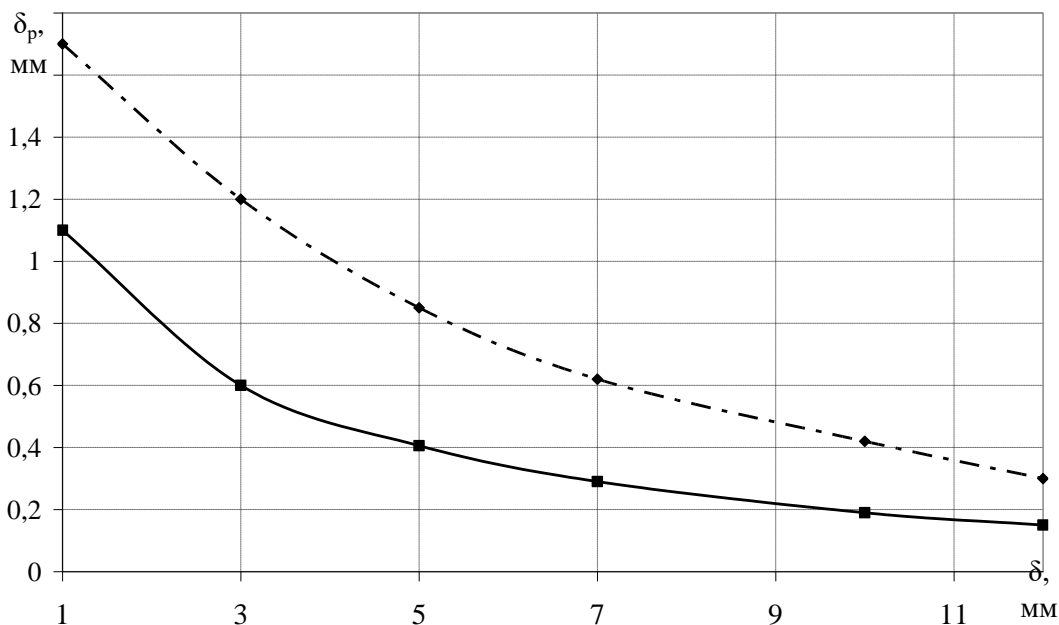


Рисунок 5 – Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» від товщини сталеві пластини для критичної температури сталі 500 °С і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв:

суцільна крива – при стандартному температурному режимі пожежі;
пунктирна крива – при температурному режимі вуглеводневої пожежі.

Порівнюючи залежності, наведені на рис. 5, можна навести те, що значення мінімальної товщини вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі у 2 рази більші, ніж для стандартного температурного режиму.

Висновки.

1. Розроблено методику попередньої оцінки вогнезахисної здатності покриттів для сталевих конструкцій розрахунково-експериментальним методом в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі, яку засновано на експериментальному визначенню температури сталеві пластини з вогнезахисним покриттям в умовах вогневого впливу, розв'язанні обернених та прямих задач теплопровідності для визначення теплофізичних характеристик вогнезахисного покриття та залежності мінімальної товщини покриття від товщини сталеві пластини, тривалості вогневого впливу та значення критичної температури сталі.

2. Проведено апробацію зазначеної методики при оцінці вогнезахисної здатності покриття на водній основі «Amotherm Steel Wb», що спучується. Встановлено, що для критичної температури сталі 500 °С і нормованої тривалості вогневого впливу 30 хв значення мінімальної товщини цього вогнезахисного покриття для вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі у 2 рази більші, ніж для стандартного температурного режиму.

Перспективи подальших досліджень.

Подальші роботи мають бути направлені на апробацію даної методики при визначенні вогнезахисної здатності різних видів покриттів для сталевих конструкцій, а також на проведення випробувань на вогнестійкість зразків захищених сталевих конструкцій різних профілів в умовах вогневого впливу за температурного режиму вуглеводневої пожежі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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).
2. Захист від пожежі. Будівельні конструкції. Методи випробування на вогнестійкість. Загальні вимоги (ISO 834:1975) : ДСТУ Б В.1.1-4-98. – [Чинний від 1998-10-28]. – К.: Укрархбудінформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).
3. Регламент робіт з вогнезахисту для вогнезахисної речовини «Amotherm Steel Wb», що спучується, для сталевих конструкцій / ДІТБ України, 2012. – № 95/1/36946711. – 29 с.
4. Круковский П. Г. Обратные задачи теплопереноса (общий инженерный подход) / Павел Григорьевич Круковский. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.
5. Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «Amotherm Steel Wb» при температурному режимі вуглеводневої пожежі / А.І. Ковальов, Є.В. Качкар, Н.В. Зобенко [та ін.] // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2014. – № 17. – С. 53-60.
6. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1991-1-2:2005, IDT).

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ОГНЕЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОЖАРА

А.И. Ковалёв, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Н.В. Зобенко

Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

огнезащитное покрытие, огневое воздействие, огнезащитная способность, математическая модель, обратная задача теплопроводности, стальная конструкция, температурный режим углеводородного пожара

АННОТАЦИЯ

Изложена методика предварительной оценки огнезащитной способности покрытий для стальных конструкций расчетно-экспериментальным методом в условиях огневого воздействия температурного режима углеводородного пожара. Приведены данные об апробации этой методики при оценке огнезащитной способности покрытия на водной основе «Amotherm Steel Wb», что вспучивается. Показано, что для критической температуры стали 500 ° С и нормированной продолжительности огневого воздействия 30 мин значение минимальной толщины указанного огнезащитного покрытия для огневого воздействия температурного режима углеводородного пожара в 2 раза больше, чем для стандартного температурного режима

PRELIMINARY ASSESSMENT TECHNIQUE OF COATING FLAME RETARDANT CAPACITY FOR STEEL STRUCTURES UNDER HYDROCARBON FIRE TEMPERATURE CONDITIONS

A. Kovaliov, Cand. of Sc. (Eng.), Senior Researcher, N. Zobenko

Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine

KEYWORDS

flame retardant coating, fire exposure, fireproof capacity, mathematics model, inverse heat conduction task, steel structure, hydrocarbon fire temperature conditions

ANNOTATION

The preliminary assessment technique of coating flame retardant capacity for steel structures is set out with the help of calculation and experimental method under conditions of fire exposure and hydrocarbon fires temperature. Data on the technique testing when assessing the coating flame retardant capacity on the «Amotherm Steel Wb» water basis (which is bubbled) are presented. It is shown that in case of the steel critical temperature equaled 500° C and 30 minutes of fire exposure, the value of minimum thickness of specified flame retardant coating for fire exposure under hydrocarbon fire temperature conditions is 2 times higher than for standard temperature conditions.