

УДК 614.841.332

А.І. Ковальов, к.т.н., с.н.с., Є.В. Качкар, к.т.н., доц., Н.В. Зобенко,  
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України,  
Ю.В. Долішній, УкрНДІЦЗ

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЗДАТНОСТІ ПОКРИТТЯ «AMOTHERM STEEL WB» ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМУ РЕЖИМОВІ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ ПОЖЕЖІ

Наведено результати вогневих випробувань сталевих пластин, покритих вогнезахисною речовиною «Amotherm Steel Wb» при температурному режимові вуглеводневої пожежі. Показано труднощі, що виникають при відтворенні такого режиму в печі. На основі отриманих даних (температури з необігрівної поверхні металеві пластилини), визначено теплофізичні характеристики утвореного покриття, що залежать від температури, та характеристику вогнезахисної здатності покриття, що досліджувалось. Виявлено взаємозв'язок між товщиною вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb», що спучується, та товщиною металеві конструкції, а також розраховані необхідні мінімальні товщини такого покриття для забезпечення регламентованих нормативними вимогами пожежної безпеки значень межі вогнестійкості металеві конструкції 30 хвилин.

**Ключові слова:** вогнезахисне покриття, металеві конструкція, температурний режим вуглеводневої пожежі, вогнезахисна здатність, характеристика вогнезахисної здатності, теплофізичні характеристики.

*Постановка задачі та її розв'язання.* При беззаперечних перевагах, застосування сталевих конструкцій в будівництві супроводжується необхідністю їх вогнезахисту для підвищення межі вогнестійкості конструкцій. В умовах пожежі незахищений метал швидко втрачає свою міцність, що в кінцевому випадку призводить до втрати несучої здатності аж до руйнування будівель та споруд. Тому, підвищення вогнестійкості металевих конструкцій за рахунок використання різноманітних вогнезахисних речовин, а саме речовин, що утворюють покриття на поверхні, що захищається, та експериментальне дослідження вогнезахисної здатності таких покриттів є актуальною науково-технічною задачею та **метою** даної роботи.

*Аналіз останніх досягнень і публікацій.* Питаннями експериментального дослідження вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій займалися велика кількість вчених, результати яких неодноразово публікувались в багатьох працях. Проте, в їх роботах недостатньо висвітленими залишилися питання визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій в умовах їх випробувань при температурних режимах, відмінних від стандартного, а саме температурному режимові вуглеводневої пожежі.

*Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.* Визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій проводиться використовуючи дані вогневих випробувань металевих конструкцій з вогнезахисними покриттями в умовах їх випробувань при стандартному температурному режимові [1]. При цьому приймалося допущення, що для визначення характеристики вогнезахисної здатності (ХВЗ) покриття при режимові вуглеводневої пожежі теплофізичні характеристики (ТФХ) вогнезахисного покриття задаються такими, що знайдені розв'язанням обернених задач теплопровідності (ОЗТ), використовуючи дані вогневих випробувань при стандартному температурному режимові пожежі. На думку авторів, більш точні значення характеристики вогнезахисної здатності покриття будуть отримані в тому випадку, коли використовувати ТФХ покриття, знайдені розв'язанням ОЗТ, в умовах випробувань металевих конструкцій з покриттям при температурному режимові вуглеводневої пожежі або наближеному до неї.

*Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.*

Як відомо [2-4] експериментальний метод визначення вогнестійкості будівельних конструкцій є найбільш точним і надійним методом у порівнянні з розрахунковим та

розрахунково-експериментальним. Проте, має ряд недоліків, таких як великі працевитрати, матеріальні витрати та не завжди є можливим проведення тих чи інших випробувань. Розрахунковий в цьому випадку, звичайно, виграє, так як не вимагає дорогого обладнання та устаткування, людського ресурсу, проте обмежений із-за відсутності достовірних даних про ТФХ матеріалів, що досліджуються. Тому, останнім часом все більшого поширення набув розрахунково-експериментальний метод (РЕМ), який дозволяє за результатами одного або декількох експериментів (вогневих випробувань), використовуючи математичні моделі, оцінювати вогнезахисну здатність покриттів і вогнестійкість конструкцій.

Серед різноманіття вогнезахисних речовин, про вогнезахисну здатність яких неодноразово описано в літературі, особливе місце займають ті, що під дією високої температури спучуються, утворюючи шар пористого покриття, який володіє добрими теплоізоляційними властивостями. Однією із таких речовин є вогнезахисна речовина «Amotherm Steel Wb» виробництва італійської фірми Amonn Fire S.r.l.

Для визначення вогнезахисної здатності цього покриття було сплановано та проведено вогневі випробування двох пластин зі сталі Ст. 3, розмірами 500 мм × 500 мм × 5 мм з нанесеним вогнезахисним складом, що спучується «Amotherm Steel Wb» на водній основі згідно [5].

На обігрівну поверхню сталеві пластини перед нанесенням вогнезахисної речовини був нанесений шар ґрунтовки ГФ-021, товщиною 0,065 мм. Речовина наносилася механізованим способом агрегатом безповітряного розпилення відповідно до регламенту робіт з вогнезахисту [6]. Для вимірювання товщини утвореного вогнезахисного покриття використовували товщиномір, яким було здійснено вимірювання в 9 точках (рис. 1), середня товщина складала 0,42 мм.

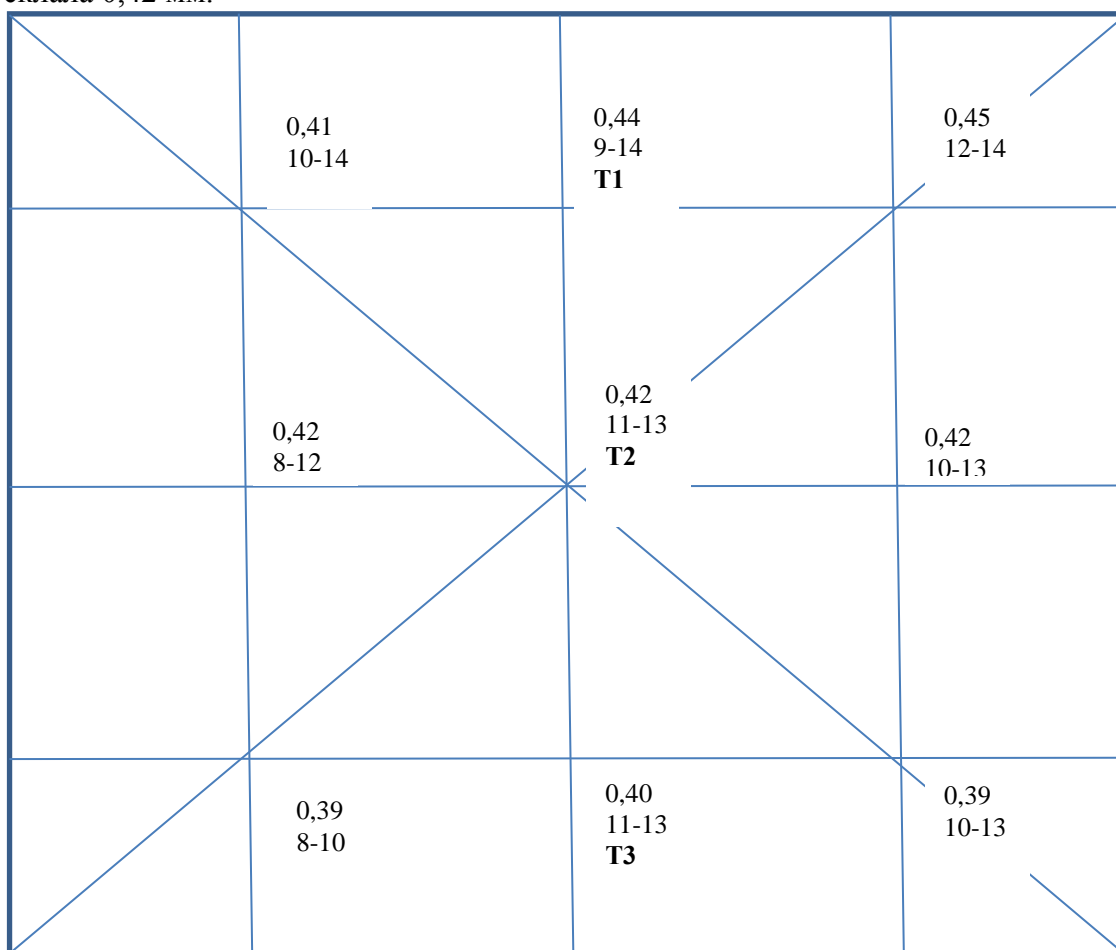


Рисунок 1 – Схема розміщення термопар та товщина покриття в місцях вимірювання: перша цифра – товщина вогнезахисного покриття з ґрунтом, мм; друга цифра – товщина спучення, мм; третя цифра – місце розміщення термопари.

Для вимірювання температури з необігрівної поверхні сталеві пластини було встановлено 3 термопари типу ТХА (рис. 2) з діаметром дроту 0,5 мм (Т1–Т3), одна термопара (Т2) у центрі зразка та дві (Т1, Т3) на відстані 100 мм від країв пластини. Спаї термопар зачеканені в метал на глибину 2 мм та прикріплені теплоізолювальним матеріалом.

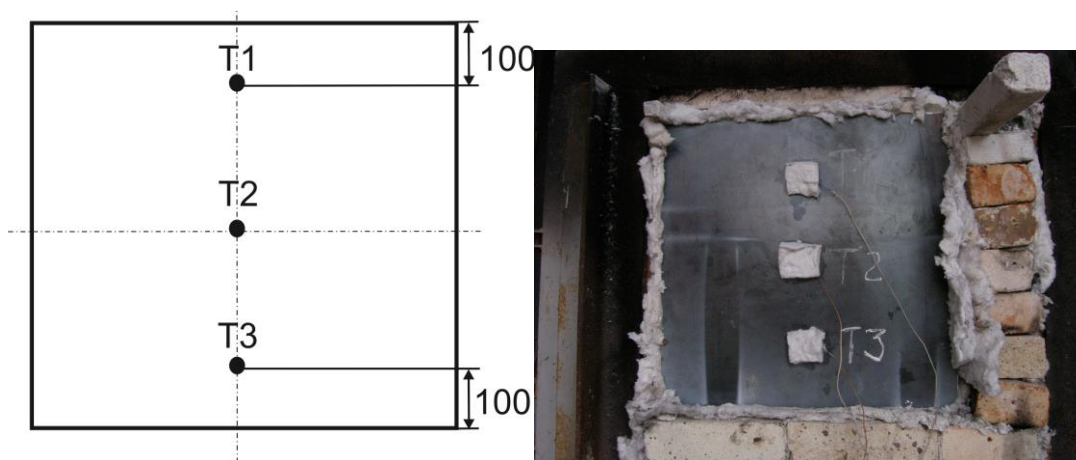


Рисунок 2 – Схема розміщення термопар з необігрівної поверхні сталеві пластини.

З необігрівної поверхні пластини була захищена двома шарами мулітокремнеземового фетру, товщиною 20 мм, та плитою мінеральної вати, густиною  $75 \text{ кг/м}^3$  і товщиною 50 мм.

Суть випробування полягала у створенні температурного режиму в печі, наближеного до режиму вуглеводневої пожежі, під час теплової дії на дослідний зразок і визначенні часу від початку теплової дії до досягнення температури  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  з необігрівної поверхні сталеві пластини.

Випробування проводились при температурі повітря  $20,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , відносній вологості повітря 48 % та тискові 743 мм. рт. ст.

Випробування зразків проводилися в умовах, близьких до температурного режиму вуглеводневої пожежі протягом 15 хвилин (рис. 3).

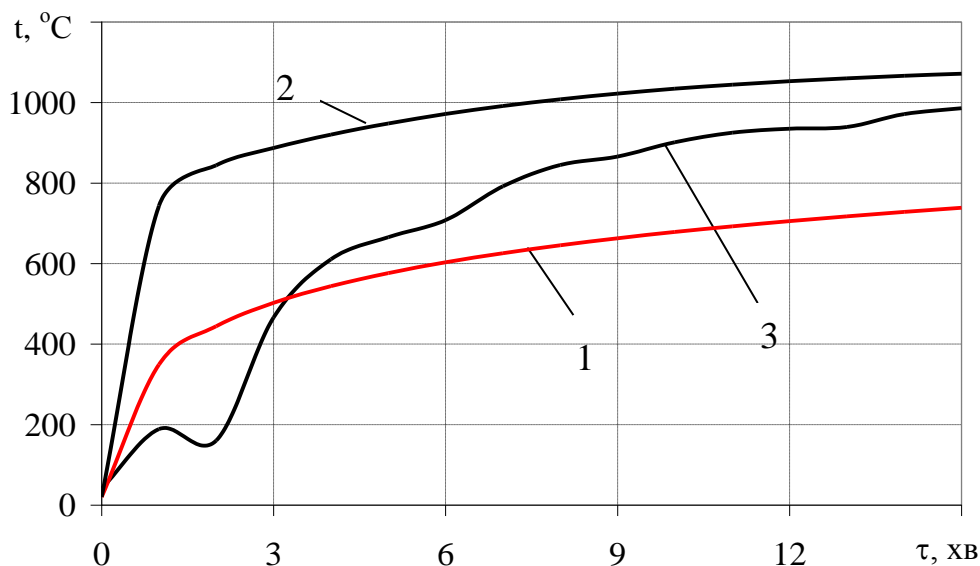


Рисунок 3 – Залежність температури в печі від часу вогневого впливу на обігрівну поверхню металеві пластини з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb»: 1 – крива стандартного температурного режиму, крива 2 – температурна крива вуглеводневої пожежі; 3 – температурна крива пожежі, наближена до вуглеводневої пожежі, що отримана в печі реально.

Як видно із рис. 3, температура в печі в початковий момент часу до 3 хв. відрізняється від кривої вуглеводневої пожежі, так як дуже складно забезпечити швидке наростання температури у перші хвилини випробування. Після 3 хв. випробування реальна температура в печі починає наближатися до температури вуглеводневої пожежі і до 15 хв. досягає 985,9 °С. Температура з необігрівної поверхні при цьому за 15 хвилин випробувань досягла критичної температури для металевої пластини (500 °С).

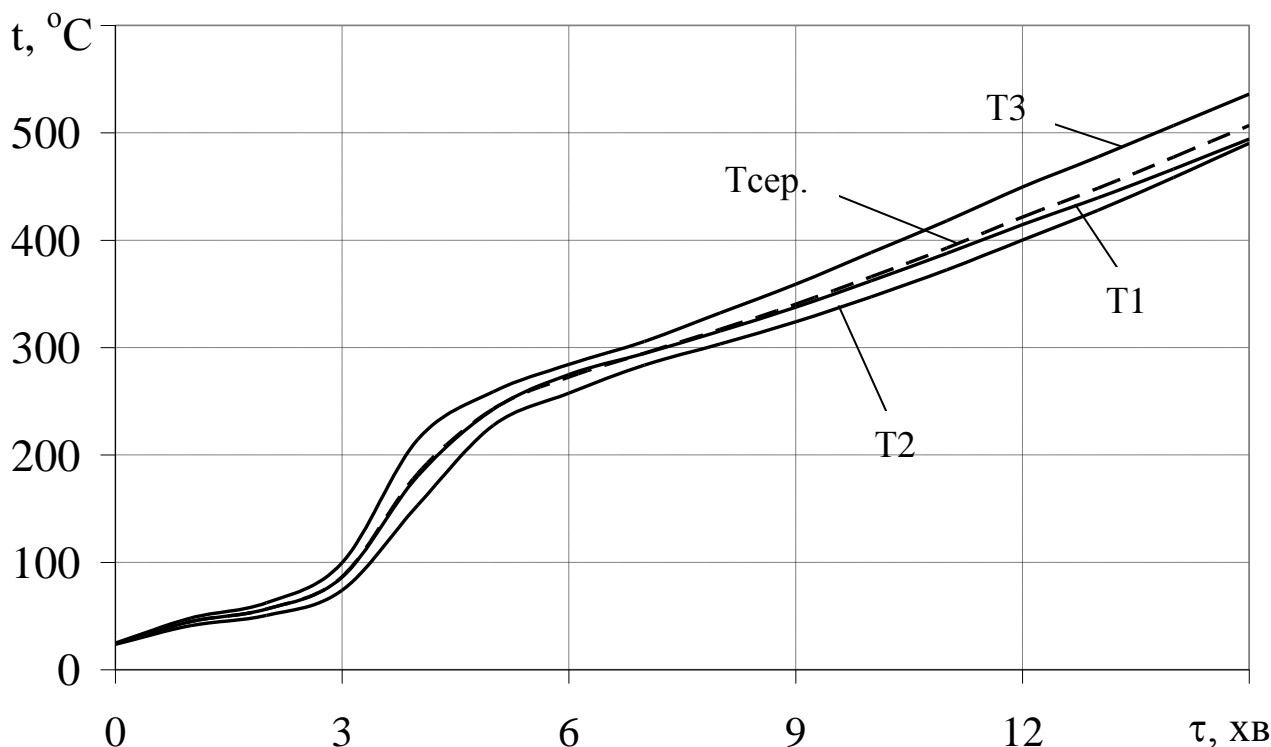


Рисунок 4 – Залежність температури з необігрівної поверхні сталевих пластин від часу вогневого впливу в різних точках вимірювання температур: T1 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від верхнього краю пластини; T2 – термопара, встановлена по центру пластини; T3 – термопара, встановлена на відстані 100 мм від нижнього краю пластини; Tсер. – середнє значення показників трьох термопар.

Як видно із рис. 4, характер кривих залежності температури з необігрівної поверхні сталевих пластин від часу вогневого впливу співпадає. Видно, що пластина рівномірно прогривається у різних частинах вимірювання температури, а відмінності у швидкості прогрівання, що спостерігаються, пояснюються неоднорідністю товщини вогнезахисного покриття (рис. 1). Для теплових розрахунків брали середнє значення показників трьох термопар, встановлених з необігрівної поверхні сталевих пластин (рис. 2).

Після випробувань при візуальному огляді зразків встановлено (рис. 5):

- вогнезахисна речовина «Amotherm Steel Wb», нанесена на сталеву пластину, розмірами 500 мм × 500 мм × 5 мм з ґрунтовкою ГФ-021 (товщина 0,065 мм), має задовільну адгезійну міцність;
- відшарування утвореного покриття від сталевих пластин за площею не спостерігалось;
- середня товщина спученого шару після проведення випробувань склала 10 мм (8-14 мм).



Рисунок 5 – Загальний вигляд сталеві пластини з покриттям «Amotherm Steel Wb» після випробувань.

Порівнюючи час прогріву металеві пластини з вогнезахисним покриттям «Amotherm Steel Wb» при її випробуванні в умовах стандартного температурного режиму та в умовах температурного режиму, наближеного до режиму вуглеводневої пожежі, можна зробити висновок, що при однаковій товщині покриття час, за який металева пластини товщиною 5 мм з вогнезахисним покриттям товщиною близько 0,42 мм прогрівається до критичної температури для сталі (500 °C), при стандартному температурному режимові в 1,5 рази більший, ніж при температурному режимові, наближеному до режиму вуглеводневої пожежі (рис. 6).

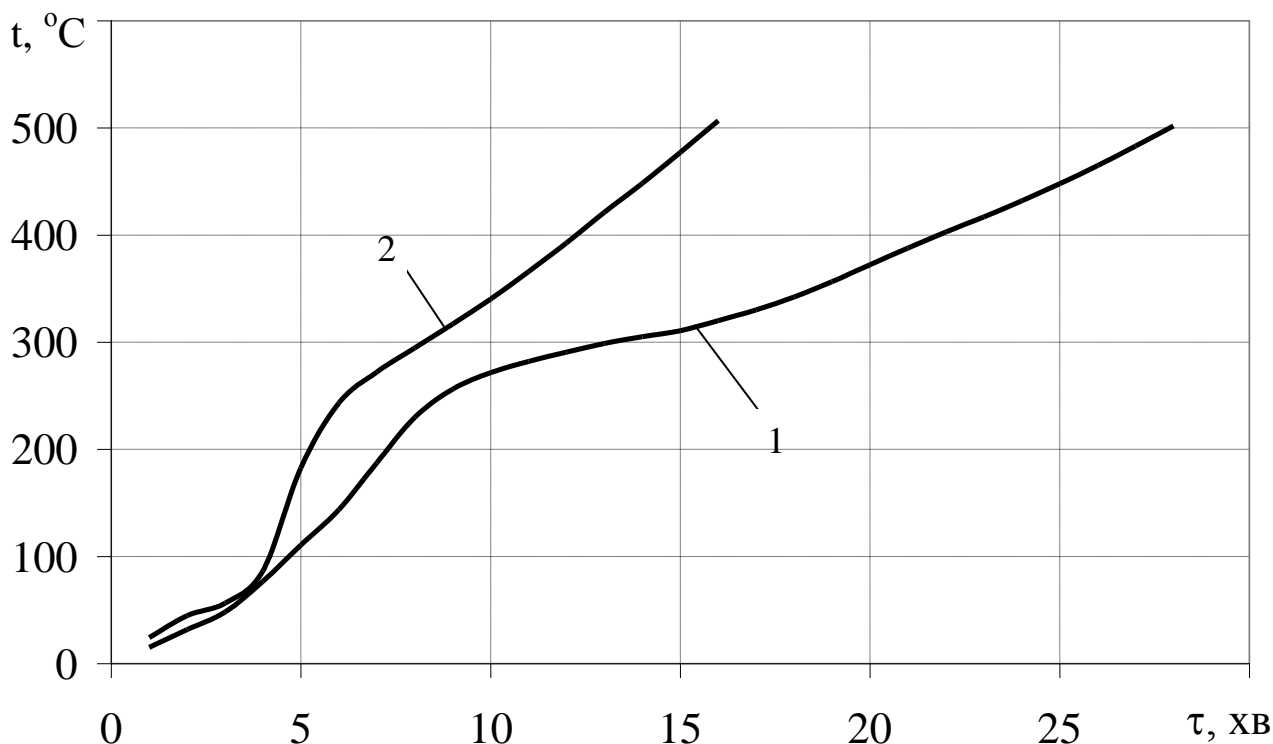


Рисунок 6 – Залежність температури з необігрівної поверхні сталеві пластини від часу вогневого впливу при різних температурних режимах пожежі: 1 – при стандартному температурному режимові; 2 – при температурному режимові, наближеному до режиму вуглеводневої пожежі, що отримано в печі реально.

Із рис. 6 випливає, що сталеві пластини, а відповідно і металеві конструкції, при більш жорстких умовах пожежі прогріється швидше, а отже і товщина вогнезахисного покриття для забезпечення нормованої межі вогнестійкості повинна бути більшою. Тому,

можливо припустити про можливі розбіжності у значеннях межі вогнестійкості металевих конструкцій при їх застосуванні на об'єктах різного функціонального призначення.

На основі отриманих даних (температури з необігрівної поверхні металевої пластини), розв'язанням оберненої задачі теплопровідності, розраховані теплофізичні характеристики (ТФХ) вогнезахисного покриття: залежність коефіцієнту теплопровідності від температури (рис. 7) та постійне значення питомої об'ємної теплоємності. Обернена задача теплопровідності розв'язана екстремальним методом, що заснований на використанні ітераційного методу Ньютона - Гауса пошуку мінімуму функції  $F$  і методу регуляризації Тихонова А.М. [7].

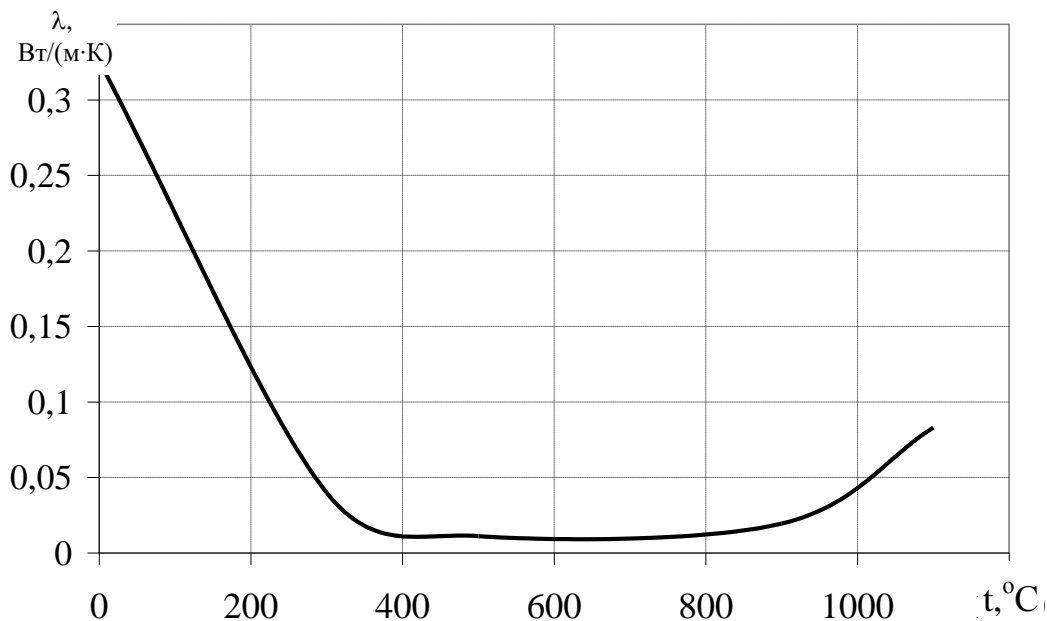


Рисунок 7 – Залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності покриття «Amotherm Steel Wb» від температури, знайденого розв'язанням обернених задач теплопровідності.

Як видно із рис. 7, в діапазоні температур від початкової температури до 400 °C значення коефіцієнту теплопровідності покриття «Amotherm Steel Wb» падає, що можна пояснити спученням покриття та збільшенням його пористості і проходить через мінімальне значення приблизно 0,01 Вт/м·К (при температурі від 400 °C до 1000 °C). Зростання коефіцієнту теплопровідності в діапазоні температур після 1000 °C, на думку авторів, пояснюється появою радіаційної складової в порах покриття в поєднанні з його високотемпературною усадкою і обвуглюванням. Постійне значення питомої об'ємної теплоємності склало  $C_v = 6 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>·К. При цьому спостерігалася найбільша збіжність експериментальних і розрахункових температур, а критерій середньоквадратичного відхилення склав 12,5 °C.

У даній роботі прийнято, що отриманий ефективний коефіцієнт теплопровідності (рис. 7) та питомої об'ємної теплоємності покриття відноситься до початкової товщини покриття, тому розрахункові моделі процесу теплопровідності теж бралися з товщиною покриття, незмінною в часі.

На основі отриманих ТФХ покриття, використовуючи розроблені раніше моделі [7], розв'язанням прямих задач теплопровідності (ПЗТ), визначили залежність товщини вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» від товщини металевої пластини при її випробуванні в умовах температурного режиму, наближеному до режиму вуглеводневої пожежі.

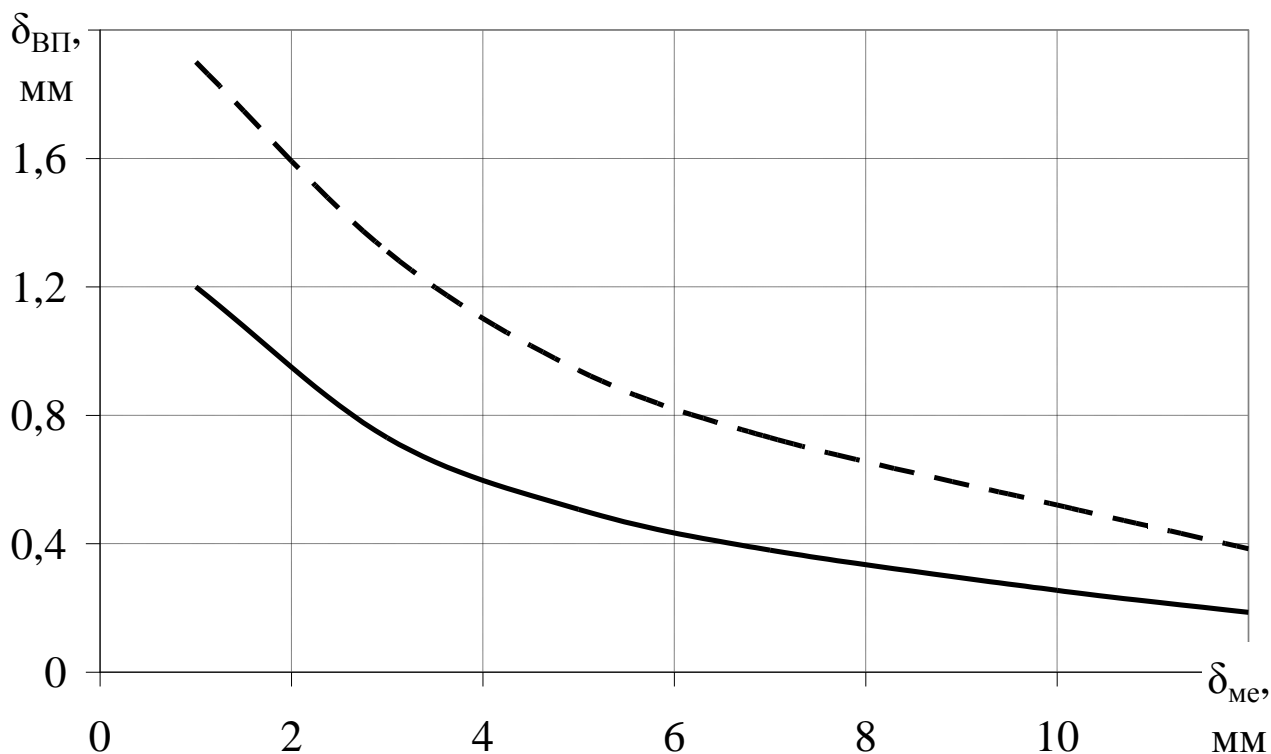


Рисунок 8 – Залежність мінімальної товщини вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» від товщини сталевих пластини та межі вогнестійкості конструкції 30 хв., отримані для критичної температури 500 °С розв'язанням обернених задач теплопровідності: суцільна лінія – стандартний температурний режим; пунктирна лінія – режим пожежі, наближений до вуглеводневої пожежі.

Як видно із рис. 8, існують розбіжності у значеннях мінімально необхідної товщини покриття «Amotherm Steel Wb» для забезпечення нормованих значень межі вогнестійкості металевих конструкцій при її випробуванні в умовах різних температурних режимів пожежі. Порівнюючи характеристику вогнезахисної здатності покриття, що досліджувалося, визначену при стандартному температурному режимові, з характеристикою вогнезахисної здатності покриття, визначену по даним випробувань при температурному режимові вуглеводневої пожежі встановлено, що максимальна розбіжність товщини покриття для нормованого значення межі вогнестійкості 30 хв. складає 0,7 мм.

#### **Висновки.**

1. Наведені результати вогневих випробувань сталевих пластин (товщина 5 мм), покритих з однієї поверхні вогнезахисним складом «Amotherm Steel Wb», що спучується, в умовах нагріву в вогневій печі при температурному режимі, наближеному до режиму вуглеводневої пожежі.
2. За результатами вогневих випробувань (температури з необігрівної поверхні сталевих пластин) розв'язанням обернених задач теплопровідності знайдено ефективний коефіцієнт теплопровідності та питому об'ємну теплоємність покриття «Amotherm Steel Wb» при температурному режимові, наближеному до режиму вуглеводневої пожежі.
3. Виявлено взаємозв'язок між товщиною вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb» та товщиною сталевих конструкцій, а також розраховані необхідні мінімальні товщини такого покриття від товщини сталевих пластин для забезпечення значення межі вогнестійкості 30 хвилин при випробуваннях в умовах, наближених до режиму вуглеводневої пожежі. При цьому встановлено розбіжності (максимальна розбіжність 0,7 мм) у значеннях товщини вогнезахисного покриття «Amotherm Steel Wb», що

розраховані використовуючи дані вогневих випробувань в умовах стандартного температурного режиму та режиму, наближеного до вуглеводневої пожежі.

*Перспективою подальших досліджень* є дослідження впливу похибок у вимірюванні температур з необігрівної поверхні металеві пластина з покриттям на точність визначення теплофізичних характеристик та характеристики вогнезахисної здатності покриття «Amotherm Steel Wb».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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. : Укрархбудинформ, 1999. – 21с. – (Державний стандарт України).
2. Ковалев А.И. Усовершенствование метода оценки огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий: дисс. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Ковалев Андрей Иванович. – К., 2012. – 163 с.
3. Цвіркун С. В. Удосконалення методу визначення вогнезахисної здатності покриттів металевих конструкцій : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.02 "Пожежна безпека" / С. В. Цвіркун. – Київ, 2006. – 20 с.
4. Качкар Е. В. Обоснование параметров трехслойных перегородок с минераловатными плитами для зданий и сооружений с учетом их огнестойкости : дис. ... кандидата техн. наук : 21.06.02 / Качкар Евгений Владимирович. – К., 2009. – 157 с.
5. Захист від пожежі. Вогнезахисне оброблення будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання : ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. – [Чинний від 2011-11-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 9 с. – (Національний стандарт України).
6. Регламент робіт з вогнезахисту для вогнезахисної речовини «Amotherm Steel Wb», що спучується, для сталевих конструкцій / ДІТБ України, 2012. – № 95/1/36946711. – 29 с.
7. Круковский П. Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход) / Павел Григорьевич Круковский. – Киев : Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 218 с.
8. Ковалев А.И. Влияние показателей термодинамики на точность определения теплофизических характеристик покрытий металлических конструкций / А.И. Ковалев, Е.В. Качкар // Результаты деятельности подразделений информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки РСЧС, гражданской обороны и пожарной безопасности. Сборник научных работ (октябрь 2013 – апрель 2014) [Текст] / под общ. ред. И.А. Максимова. – Екатеринбург : Уральский институт ГПС МЧС России, 2014. – С. 48-53.