

УДК 614.842

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.156644

Встановлення закономірностей теплообмінного процесу при займанні зразків очерету

Ю. В. Цапко, О. Ю. Цапко, О. П. Бондаренко

Проведеними дослідженнями впливу індукційного періоду на займання очерету встановлено механізми процесу передавання тепла до матеріалу, що дає можливість впливати на цей процес. Доведено, що вони полягають у нагріванні матеріалу до критичної температури, коли починається інтенсивний розклад з виділенням необхідної кількості горючих газів та їх займання. Завдяки цьому стає можливим визначення впливу вогнезахисту та властивостей покрівельних композицій на процес гальмування процесу загорання очерету. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що необроблений очерет, під термічною дією протягом 58 с зайнявся, що відповідно склав індукційний період розкладу матеріалу, полум'я поширилося по всій поверхні, що призвело до його повного згорання, тривалість індукційного періоду збільшується до 587,45 с за рахунок розкладанням антипіренів під дією температури з виділенням негорючих газів, які гальмують процеси окиснення матеріалу та суттєво підвищує утворення на поверхні очерету теплозахисного шару коксу. Це приводить до підвищення товщини шару коксу та гальмування теплопередачі високотемпературного полум'я до матеріалу. Завдяки цьому стало можливим визначення умов вогнезахисту очерету, шляхом утворення бар'єру для теплопровідності. Окрім того, при застосуванні вогнезахисного покриття температурний вплив здійснюється у напрямку реакцій у передполуменевій області у бік утворення сажеподібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу. Це дозволяє стверджувати про відповідність виявленого механізму формування властивостей вогнезахисту очерету спучуючими композиціями та практичну привабливість запропонованих технологічних рішень. Останні, зокрема, стосуються визначення кількості полімерної складової, оскільки очерет характеризується гідрофобністю і водний розчин антипірену стікає з поверхні. Таким чином, є підстави стверджувати про можливість спрямованого регулювання процесів формування вогнезахисту очерету шляхом використання комплексної покрівельної композиції з суміші антипіренів, яка містить природний полімер, здатної утворювати на поверхні матеріалу вогнезахисну плівку.

Ключові слова: вогнезахист очерету, вогнезахисні покриття, теплопровідність, оброблення поверхні, теплофізичні властивості

1. Вступ

На сьогоднішній день все більшої популярності набирає екологічно безпечна покрівля з очерету, яка за групою горючості відносять до легкозаймистих матеріалів. Для зниження цих недоліків використовується вогнезахисне оброб-

лення, що дозволяє надати матеріалу здатності протистояти дії високотемпературного полум'я.

Засобами вогнезахисту просочують покрівлю як зовні, так і всередині. І після висихання на поверхні утворюється надійне захисне покриття, яке не змивається ні дощем, ні снігом. Вогнезахист служить декілька років і запобігає загоряння даху від випадкового попадання на нього джерел займання.

Основні вимоги до вогнезахисту природних горючих матеріалів є здатність протистояти дії вогню та не поширювати полум'я поверхнею. Зміна розкладу такого матеріалу, при вогнезахисному обробленні, направлена в сторону утворення негорючих газів і важкогорючого коксового залишку, а також гальмування окиснення в газовій і конденсованій фазі.

Для вогнезахисту будівельних конструкцій з горючих матеріалів знайшли широке застосування спеціальні покриття, які при дії високої температури виділяють воду, але вони не завжди забезпечують вогнестійкість. Тому у останній час набули поширення засоби, що здатні до утворення на поверхні будівельної конструкції теплоізоляційного шару пінококсу, який у значній мірі знижує процеси передачі тепла до матеріалу [1, 2].

Використання композицій з полімерних речовин та антипіренів може підвищити вогнезахист матеріалу за рахунок утворення захисного шару коксу. Це дозволить розробити новий тип вогнезахисних покрівельних засобів для будівельних конструкцій з очерету, що переводить його до важкозаймистих матеріалів. До того вогнезахист будівельної конструкції дозволяє перенести процес займання у більш часові терміни [3, 4].

Процес займання (самозаймання) різних видів матеріалів характеризується індукційним періодом, тобто тривалістю проміжку часу після якого матеріал нагрівається до критичної температури, при якій виділяється необхідна кількість горючих газів. Величина цього періоду необхідна для обґрунтування вибору вогнезахисних засобів будівельних конструкцій з легкозаймистих матеріалів.

Тому моделювання процесу займання очерету, дослідження теплофізичних параметрів та самого вогнезахисту і впливі компонентів, які входять до складу, на цей процес є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій. І відповідно визначають необхідність проведення таких досліджень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

За останні роки з запропонованого напрямку досліджень відомі роботи, які направлені на розроблення вогнезахисних композицій з використанням неорганічних речовин, які модифіковані органічними сполуками, здатними утворювати на поверхні коксовий шар [5–7]. В роботі [5] приведені результати досліджень поведінки вогнезахисного покриття під дією температурного впливу. Показано як поведінку спучувального покриття, так і подальший теплоперенос. Але залишається невирішеним питання, які пов'язані з встановленням температури утворення пінококсу, що знижує якість отриманих результатів. У більшості випадків такі композиції модифікують полімерними комплексами і антипіре-

нами, однак засоби відносяться до матеріалів, що характеризується низькою адгезією та при дії високої температури виділяють токсичні продукти горіння [6].

В роботі [7] приведені найбільш перспективні вогнезахисні композиції спучуючи покриттів, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів, але залишаються невисвітленими питання щодо прояву спільної дії компонентів покриття при спіненні. Матеріали, які наведено у роботі [8] характеризуються високою інтумесцентною здатністю, але не показано механізм утворення коксу та температурні переходи покриття в пінококс.

Доцільність використання доломітової глини підтверджується зміною структури пінококсу та суттєвим зниженням теплових характеристик, що обумовлено утворенням проміжних з'єднань, які утворюють значну кількість наноструктур [9]. Однак для підтвердження цього процесу не наведені відповідні фізико-хімічні розрахунки. Так на думку авторів [10], це обумовлено утворенням при розкладу наповнювачів у складі покриття значної кількості високотемпературних з'єднань, які при температурі ущільнюються та утворюють міцний скелет.

У напрямку даних досліджень [11] розроблена аналітична модель для розрахунку теплопровідності захисного шару коксу, яка враховує форми пір. Однак дана модель не враховує саме як зміна форми пір впливає на теплопередачу до самої конструкції. Крім того, багато покриттів мають цілу низку недоліків, таких як нанесення окремих компонентів, втрати функціональних властивостей при збільшенні температури середовища [12]. Це означає, що не визначено, як саме протікає процес за умов температур у діапазоні розкладу вогнезахисного покриття. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з визначенням оптимальної кількості інертних добавок. Дана обставина пов'язана з тим, що введення їх у композиції суттєво змінює механізм та кінетику процесів коксоутворення.

Для подолання цієї проблеми в роботі [13] проведені дослідження впливу неорганічних наповнювачів на зсувну в'язкість та вогнезахисні властивості водяних спучувальних покриттів. Показано, що завдяки встановленим аналітичним залежностям стає можливим корегування вмісту модифікаторів для забезпечення процесу термічного захисту матеріалу.

Тому моделювання параметрів займання очерету та впливі вогнезахисного покриття на цей процес є невирішеною складовою забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій, що і обумовило проведення досліджень.

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є виявлення закономірностей теплообмінного процесу та встановлення параметрів займання зразків очерету. Це дає можливість обґрунтувати застосування вогнезахисту.

Для досягнення мети вирішувались наступні завдання:

- провести моделювання параметрів теплообмінного процесу при загоранні зразків очерету та впливі вогнезахисту на пригнічення займання;
- встановити особливості зниження часу займання при температурному впливі на зразок вогнезахисного очерету.

4. Матеріали та методи дослідження фронту фазових перетворень при спучуванні вогнезахисного покриття

4. 1. Досліджувані матеріали, які використовувались в експерименті

Для встановлення теплопровідності та займання використовували зразки очерету, необроблений та які оброблювали покриттям, що утворює на поверхні безбарвну плівку та здатне під дією високої температури створити на поверхні пінококсовий захисний шар, а саме, покрівельним просочувальним розчином «Skela-i» (суміш карбаміду 28÷30 % і фосфорних кислот 23÷24 % та крохмалю 20 %). Отриману масу перемішували, додавали воду до 100 % і наносили на зразок очерету.

Для дослідження ефективності вогнезахисного матеріалу використовували зразки очерету середніми розмірами діаметром до 10 мм, довжиною 310 мм, які зв'язували у мати розміром 310×140 мм товщиною 28÷32 мм. Даний виріб обробляли покрівельним просочувальним розчином у кількості 22÷23 г на поверхню всієї кількості очерету, що складала 0,467 м² (площа поверхні однієї очеретини дорівнювала близько 0,0078 м²) і після сушки становила близько 49,25 г/м².

4. 2. Методика визначення показників властивостей зразків

Дослідження з моделювання параметрів теплообмінного процесу при займанні зразків очерету проводили з застосуванням основних положень математичної фізики.

Дослідження з експериментального визначення параметрів займання очерету проводили за методикою, суть якої полягала у тому, що зразок поміщали у випробувальній камері та піддавали впливу радіаційної панелі. Після запалювання зразка, проводили вимірювання часу займання, максимальну температуру продуктів горіння і часу її досягнення, часу проходження фронтом полум'я ділянок поверхні, довжину згорілої частини зразка [2].

Критерієм визначення індукційного періоду займання зразка очерету при термічній дії є загорання та скачко подібне підвищення температури димових газів, часу проходження фронтом полум'я ділянок поверхні зразка очерету.

5. Моделювання параметрів теплообмінного процесу від теплофізичних властивостей матеріалу

Процес самозаймання різних видів матеріалів характеризується тривалістю проміжку часу після якого матеріал нагрівається до критичної температури (індукційним періодом). Величина цього періоду необхідна для обґрунтування вибору вогнезахисних засобів будівельних конструкцій з легкозаймистих матеріалів. При цьому передбачається, що тривалість цього періоду збігається із проміжком часу t_m , протягом якого температура нагрівання матеріалу досягає критичного розміру. Залежність параметрів теплообмінного процесу від теплофізичних властивостей матеріалу визначаємо на підставі рівняння теплопереносу:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \cdot \tilde{c}_p \cdot \nabla(\tilde{\rho} \cdot \tilde{w} \cdot T) = \lambda \cdot \nabla^2(T) + \Psi, \quad (1)$$

де ε – відносна пористість середовища;

$$\varepsilon = \frac{\Pi}{1 - \Pi}, \quad (2)$$

де Π – пустотність середовища (відношення обсягу порожнеч до об'єму середовища).

Знак "хвилі" над символом указує на його значення для газової фази; $\nabla(\vec{w} \cdot F)$ оператор дивергенції ("розбіжності") функції $F = \tilde{\rho} \cdot T$ по вектору \vec{w} [14]:

$$\nabla(\vec{w} \cdot F) = \frac{\partial}{\partial z}(u \cdot F) + \frac{\partial}{\partial r}(v \cdot F), \quad (3)$$

де $\nabla^2(F)$ – оператор Лапласа (дивергенція градієнта функції):

$$\nabla^2(F) = \text{div}(\text{grad}F) = \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right); \quad (4)$$

ψ – функція щільності потужності теплових джерел, Вт/м³;

ρ – щільність матеріалу, кг/м³;

c_p – теплоємність матеріалу Дж/(кг·К);

T – температура матеріалу, К;

t – час, з моменту надходження матеріалу в сховище, с;

λ – теплопровідність матеріалу Вт/(м·К).

Спочатку визначимо вхідну в це рівняння функцію потужності джерел тепловиділення $\Psi(t)$. Тому що будь-який елементарний об'єм перебуває в однакових умовах – уважаємо, що в теплообмінному процесі бере участь весь об'єм. Робимо припущення, що займання матеріалу починається з моменту t_m досягнення критичної температури, тобто з урахуванням індукційного періоду нагрівання об'єму матеріалу максимальне тепловиділення описується наступним рівнянням:

$$\psi(t) = q \cdot \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\}. \quad (5)$$

З урахуванням індукційного періоду нагрівання об'єму матеріалу запишемо рівняння (1) у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \cdot \tilde{c}_p \cdot \left[\frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot u \cdot T)}{\partial z} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot v \cdot T)}{\partial r} \right] = \\ = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q \cdot \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Припускаємо, що критична по температурі ситуація виникає, коли в деякому горизонтальному шарі середня температура близька до температури заpalення. Середньою температурою шаруючи називаємо осереднену по площі перетину об'єму $S=\pi \cdot R^2$, температуру $T_z=T(z, t)$, К, відповідно до формули:

$$T_z = \frac{1}{S} \int_0^S T \cdot ds = \frac{1}{\pi \cdot r^2} \int_0^R T \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr, \quad (7)$$

$ds=2\pi \cdot r dr$ – елементарна площа перетину, m^2 ; dr – елементарне збільшення радіальної координати, m

Перетворимо (6), використовуючи рівняння стану газового середовища у вигляді:

$$p = p_0 \pm \Delta p = \tilde{\rho} \cdot T \cdot R, \quad (8)$$

де p_0 – атмосферний тиск, Па; Δp – відхилення фактичного тиску в насипі від атмосферного, обумовленим швидкісним напором фільтраційних потоків, Па.

Відомо [15], що швидкість фільтраційних потоків у будинках, де середній діаметр, наприклад очерету, який змінюється в межах $d=4,5 \dots 20,0$ мм, що не перевищує $w=10^{-3}$ м/с. При цьому, по даним [13], коефіцієнт проникності $k=1,8 \cdot 10^{-6} \dots 1,0 \cdot 10^{-5}$ m^2 , а макрошорсткість матеріалу – величина порядку $l \sim 7,0 \cdot 10^{-3}$ м. Враховуючи, що динамічна в'язкість повітря в діапазоні температури $T=20 \dots 300$ °С практично не відрізняється від значення $\mu \approx 1,8 \cdot 10^{-7}$ Па·с²; $\tilde{\rho}=1,2$ кг/м³ при $T=20$ °С; $\tilde{\rho}=0,9$ кг/м³ при $T=230$ °С [16].

Оцінимо характеристику представленої області фільтрації при середній щільності $\tilde{\rho}=(1,2+0,9)/2=1,05$ кг/м³:

$$a = \frac{\mu}{k} + \frac{\tilde{\rho}}{l} w \leq \frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{1,8 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,05}{7,0 \cdot 10^{-3}} 10^{-3} \sim 10, \text{ кг} / (\text{с} \cdot \text{м}^3). \quad (9)$$

Враховуючи, що фільтраційні потоки повітря в середовищі моделюються системою диференціальних рівнянь Ейлера [14], визначимо максимальний з можливих меж зміни депресії по шляху фільтрації:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial z} &= |a \cdot u + (\tilde{\rho} - \rho_0) \cdot g| \leq \\ &\leq |10 \cdot 10^{-3} + (1,05 - 1,2) \cdot 9,8| = 10^{-1} \text{ Н/м}^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Інтегруємо (10) по висоті об'єму очерету $L=30$ мм, тоді

$$\Delta p = -\int_0^L \frac{\partial p}{\partial z} = |a \cdot w + (\tilde{\rho} - \rho_0) \cdot g| \cdot L \leq 30 \text{ Па}, \quad (11)$$

що є нескінченно малою величиною порівняно з атмосферним тиском $p_0 \sim 10^5$ Па.

Відмітимо, якщо примусова вентиляція дозволяє підвищити швидкість вентиляційних потоків у об'ємі до стандартної для промислових будинків і споруджень величини $u_0 \sim 1$ м/с, та роблячи оцінку

$$a \leq \frac{1,8 \cdot 10^{-7}}{1,8 \cdot 10^{-6}} + \frac{1,05}{7,0 \cdot 10^{-3}} 1,0 = 10 + 157 \approx 170 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3); \quad (12)$$

$$\Delta p \leq |170 \cdot 1,0 - 1| \cdot 30 \approx 5 \cdot 10^2 \text{ Па}. \quad (13)$$

Тобто відхилення тиску не може перевищити 0,5 % атмосферного.

Отже, з огляду на незначні відхилення газової постійної повітря від значення $R=0,237$ Дж/(кг·К), рівняння (8) з достатньою точністю можна представити у вигляді:

$$\tilde{\rho} = \rho_0 \frac{T}{T_0}. \quad (14)$$

Це означає, що повітря в об'ємі термічно деформуємо, але через $\Delta p \ll p_0$ є нестисливим газовим середовищем у гідродинамічному змісті, тобто $\partial \rho / \partial t = 0$, і рівняння нерозривності повітря представляється в такий спосіб:

$$\nabla(\tilde{\rho} \cdot \vec{w}) = 0, \quad (15)$$

або в проекціях на координатні осі:

$$\frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot u)}{\partial z} = 0, \Rightarrow \tilde{\rho} \cdot u = \rho_0 \cdot u_0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot v)}{\partial r} = 0, \Rightarrow \tilde{\rho} \cdot v = \rho_0 \cdot v_0, \quad (17)$$

де змінні з індексом "0" ставляться до характерного шару очерету, наприклад, до верхнього, що є границею між об'ємом матеріалу і вільним простором сховища.

Підставимо вираз (16) і (17) у рівняння (6), тоді

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon \rho_0 \tilde{c}_p u_0 \frac{\partial T}{\partial z} + \varepsilon \rho_0 \tilde{c}_p v_0 \frac{\partial T}{\partial r} = \\ = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q \cdot \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Помножимо обидві частини рівняння (18) на елементарну площу ds , інтегруємо по r у межах $r=0...R$ і розділимо на площу торцевого перетину S , у результаті, з огляду на вираз (8), одержимо:

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T_z}{\partial t} + \varepsilon \rho_0 \tilde{c}_p u_0 \frac{\partial T_z}{\partial z} = \\ = \lambda \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} + q \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) \frac{\Delta}{2} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Оцінимо порядок величин, що входять у рівняння (19). Із цією метою введемо безрозмірні змінні: координату ξ час τ і температуру θ у такий спосіб:

$$\xi = \frac{z}{H}; \quad \tau = t \frac{u_0}{H}; \quad \theta = \frac{T_z - T_0}{T_{\text{кр}} - T_0}. \quad (20)$$

Запишемо рівняння (19) у цих змінних:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\rho_0 \tilde{c}_p}{\rho c_p} \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{H}{u_0} \frac{1}{\rho c_p (T_{\text{кр}} - T_0)} \times \\ \times \left(\frac{\lambda}{H^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + q \{ 1 - \text{th}^2 [0,5 \Delta (1 - \tau / \tau_m)] \} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

де $\tau_m = t_m \cdot u_0 / H$ відносна величина індукційного періоду.

Перейдемо до оцінки. Перший член лівої частини рівняння (21) величина порядку 1. З роботи [16] встановлено, що для повітря $\rho_0 \tilde{c}_p \sim 10^3$ Дж/(кг·К), а для рослинної сировини $\rho c_p \sim 10^4$ Дж/(кг·К) і $\varepsilon < 0,5$, то другий доданок лівої частини не перевищує 0,01, їм можна зневажити у порівнянні з першим $\lambda / H^2 = 9 \cdot 10^3$. У зв'язку з тим, що тепловий потік, який діє на товщину матеріалу (0,03 м) знаходиться у межах $q \sim 333 \div 1500$ кВт/м³, то перший доданок в круглих скобках значно менше другого і його не враховуємо.

У результаті зробленої оцінки, рівняння (21) зводиться до наступного:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{qH}{\rho u_0 c_p (T_{\text{кр}} - T_0)} \left\{ 1 - \text{th}^2 \left[0,5 \Delta (1 - \tau / \tau_m) \right] \right\}. \quad (22)$$

Прийmemo, що в початковий момент температура матеріалу не відрізняється від температури навколишнього середовища, а до кінця індукційного періоду дорівнює критичній температурі:

$$T_z|_{t=0} = T_n = T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_z|_{t=t_m} = T_{\text{кр}} = 230 \text{ }^\circ\text{C}, \quad (23)$$

або в безрозмірних змінних:

$$\theta|_{\tau=0} = 0; \quad \theta|_{\tau=\tau_m} = 1. \quad (24)$$

Інтегруючи вираз (22) за часом, маємо

$$\theta = \frac{qH\tau_m}{\rho u_0 c_p (T_{\text{кр}} - T_0)} \frac{1}{x} \left\{ \text{th}x - \text{th} \left[\left(1 - \frac{\tau}{\tau_m} \right) x \right] \right\}, \quad (25)$$

де x – константа інтегрування, отримана з урахуванням початкової умови (24):

$$\theta|_{\tau=0} = 0 \Rightarrow x = \Delta / 2.$$

Використовуючи вирази (20), запишемо формулу (25) у розмірних змінних

$$T_z = T_0 + \frac{qt_m}{\rho c_p} \frac{1}{x} \left\{ \text{th}x - \text{th} \left[\left(1 - \frac{t}{t_m} \right) x \right] \right\}. \quad (26)$$

Тому що у відповідності із другою крайовою умовою (23) потрібно при $t=t_m: T_z=T_{\text{кр}}$ то на основі виразу (26) виходить рівняння щодо параметрів обмінного процесу t_m і $x = \Delta / 2$:

$$\text{th}x = \frac{\rho c_p}{qt_m} (T_{\text{кр}} - T_0) \cdot x. \quad (27)$$

Параметр χ є теплофізичною характеристикою матеріалу:

$$\chi = \frac{\rho c_p}{qt_m} (T_{\text{кр}} - T_0), \quad (28)$$

який дорівнює тривалості проміжку часу, протягом якого температура одиничного об'єму матеріалу підвищується на один градус.

На рис. 1 представлені результати обробки даних про тривалість індукційного періоду при займанні очерету. Дані оброблялися за допомогою Microsoft Excel статичною функцією:

$$t_m = a \cdot q^{-b}, \quad (29)$$

де a і b – емпіричні константи с і м³/Вт.

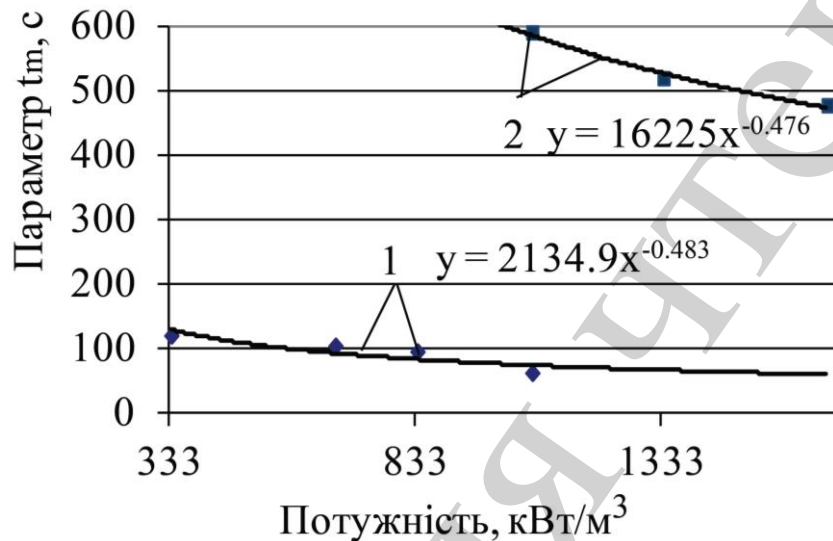


Рис. 1. Залежність параметру індукційного періоду займання очерету від потужності температурного впливу на об'єм матеріалу:
1 – необробленого, 2 – вогнезахищеного

Грунтуючись на рівнянні (28), переходимо до визначення другого параметра обмінного процесу χ . Завдання вирішуємо в наступному порядку. Спочатку обчислюється теплофізична характеристика матеріалу χ , наприклад, для очерету при температурі займання [16] $T_{кр}=503$ К; за початкової температури $T_0=293$ К; $\rho \cdot c_p=0,5 \cdot 10^4$ Дж/(м³·К) при $q=1,01 \cdot 10^5$ Вт/м³:

$$\chi = \frac{0,5 \cdot 10^4}{1,01 \cdot 10^5} (503 - 293) = 10,4 \text{ с.} \quad (30)$$

Із рис. 2, при апроксимації кривої 1 маємо: $a=436,77$ с; $b=0,265$ м³/кВт, тоді по формулі (29) тривалість індукційного періоду дорівнює:

$$t_m = 2134,9 \cdot 1066^{-0,483} = 76,61 \text{ с.} \quad (31)$$

Обчислюємо параметр:

$$A = \chi / t_m = 10,4 / 76,61 = 0,141 \quad (32)$$

і вирішуємо графічно рівняння (27) та одержуємо $x=\Delta/2=7,0$ (рис. 3).

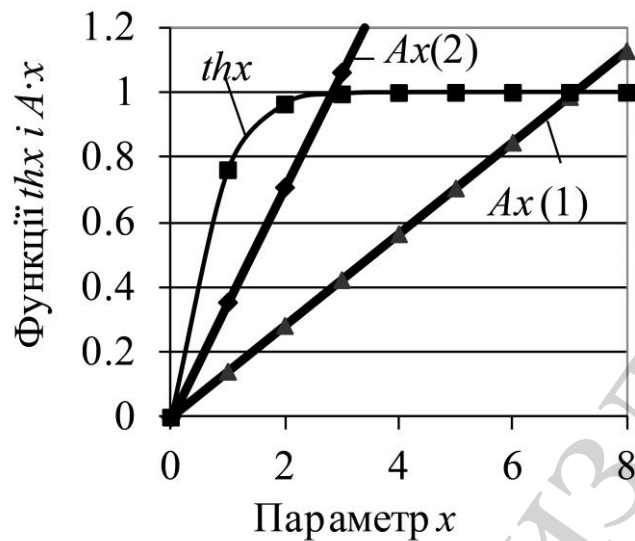


Рис. 2. Визначення параметру обмінного процесу x для очерету:
1 – необробленого, 2 – вогнезахищеного

Аналогічно проводимо обчислення і у разі застосування вогнезахисту. Так, для вогнезахищеного матеріалу з рослинної сировини $\rho \cdot c_p = 0,5 \cdot 10^5$ Дж/(м³·К) [16], збільшується індукційний період: параметр $\chi=207,9$ с; t_m становить 587,45 с; $A=0,35$; $x=\Delta/2=2,8$ (рис. 3).

Таким чином вогнезахисне оброблення очерету призводить до розкладу компонентів покриття і утворення пінококсу, що ізолює високу температуру, та збільшує тривалість індукційного періоду більш ніж у 8 разів.

6. Експериментальні дослідження процесу займання очерету та пригнічення процесу при вогнезахисті і їх результати

Для встановлення горючості очерету були проведені дослідження щодо його займання при дії пальника, що імітує низькокалорійне джерело.

Результати досліджень з визначення приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °С) та тривалості індукційного часу займання очерету виконували за методикою та на обладнанні, які наведені в [2], у лабораторних умовах, отримані результати наведено на рис. 3.

Дослідження показали, що, необроблений вогнезахисним засобом, очерет, під дією пальника протягом 74 с, зайнявся, максимальна температура димових газів піднялася до 733 К, полум'я поширилося по всій поверхні очерету, що привело до його згорання.

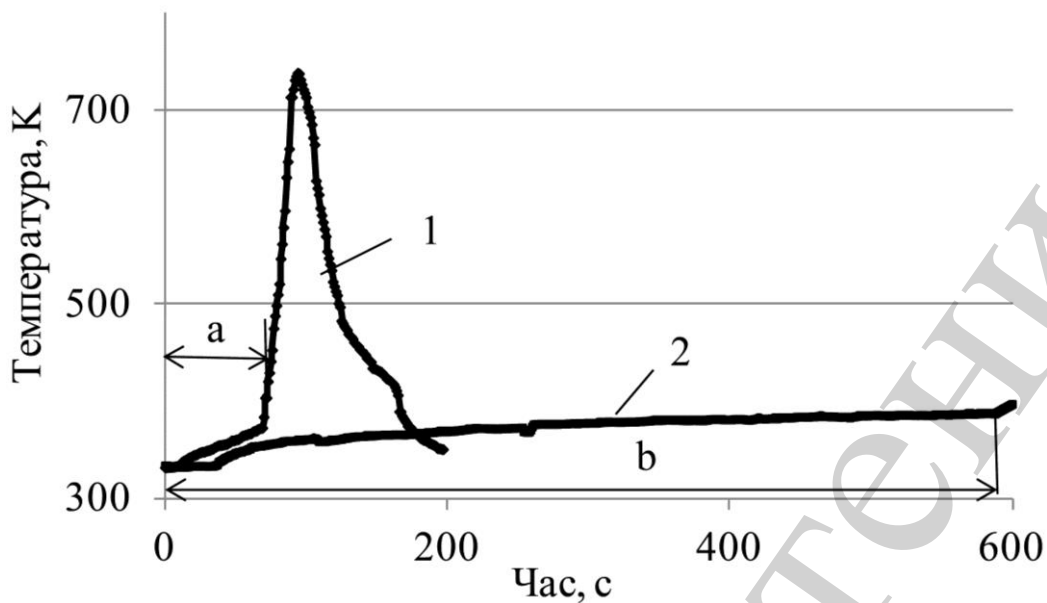


Рис. 3. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях очерету: 1 – необроблений; 2 – вогнезахисний; а – індукційний період необробленого очерету; b – індукційний період вогнезахисного очерету

Потім були проведені випробування вогнезахисного зразка. Встановлено, що зразок, який було оброблено покрівельним просочувальним розчином, зайнявся на 588 с, поширення полум'я поверхнею відбулося тільки на першу ділянку (спалах), максимальна температура димових газів становила 387 К.

Таким чином, на основі виведених залежностей теплофізичних характеристик матеріалів (27)–(29) та експериментальних досліджень рис. 1, 2 встановлені параметри теплообмінного процесу при загоранні очерету, у тому числі і вогнезахисного.

7. Обговорення результатів дослідження процесу просування фронту фазових перетворень

При дії високотемпературного полум'я на зразок очерету, на що вказують результати досліджень (рис. 2, 4), процес загорання може відбутися, коли матеріал прогріється до критичної температури. За цієї температури настає інтенсивний розклад очерету з утворенням необхідної кількості горючих газів і їх займання та поширенні полум'я поверхнею. Тому одним із способів гальмування процесу розкладу очерету є ізоляція високої температури. При додаванні вогнезахисних речовин процес загорання пригнічується. Вочевидь такий механізм впливу є фактором регулювання утворення горючих газів і ефективності теплоізолювання вогнезахисними засобами. Це погоджується з даними, відомими з робіт [5, 6], автори яких теж пов'язують процес займання матеріалу залежно від індукційного періоду та при додаванні антипіренів. На відміну від результатів досліджень [7, 8], отримані дані щодо впливу процесу займання на передавання тепла до матеріалу і зміни теплоізолювальних властивостей дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу займання є не тільки досягання критичної температури, а і формування необхідної кількості горючих газів, та розкладанням антипіренів під дією температури з поглинанням тепла і виділенням негорючих газів, гальмуванням процесу окислення в газовій і конденсованій фазі;

– суттєвий вплив на процес загорання горючого матеріалу при застосуванні вогнезахисного покриття здійснюється у напрямку реакцій у передполуменовій області у бік утворення сажеподібних продуктів на поверхні природного горючого матеріалу.

Такі висновки можуть вважатися за доцільні з практичної точки зору, тому що дозволяють обґрунтовано підходити до визначення індукційного періоду та пошуку необхідної рецептури вогнезахисного засобу. Результати визначення теплопровідності захищеного очерету (рис. 7) вказують на неоднозначний вплив природи засобу захисту на змінення температури. Зокрема, це передбачає наявність даних, достатніх для якісного проведення процесу гальмування температури та виявлення на його основі моменту часу, з якого починається падіння теплостійкості. Таке виявлення дозволить дослідити перетворення поверхні покриття, що переміщується у сторону підвищеної температури з утворенням коксу, та визначити ті змінні, що суттєво впливають на процес. Дані дослідження притаманні для будівельних матеріалів з природної рослинної сировини. Тому доцільним на сьогодні є застосування будівельних матеріалів з відроджувальних джерел, їх захист від руйнування та забезпечення екологічності отриманих виробів.

Дана робота є продовженням досліджень, наведених у [1–4], де в повній мірі приведено механізм вогнезахисту органічних природних матеріалів, утворення пінококсу, переміщення та здійснення теплоізолювання високої температури.

8. Висновки

1. Проведено моделювання закономірностей теплообмінного процесу при займанні зразків очерету та виявлено вплив на цей параметр вогнезахисного покриття. Визначено характеристики індукційного періоду займання та отримані розрахункові залежності, що дозволяють одержувати зміну динаміки теплообмінного процесу при розкладі вогнезахисного покриття. За отриманими залежностями розраховано теплообмінний параметр, що характеризує тривалість проміжку часу, протягом якого температура одиничного об'єму матеріалу підвищується на один градус і для очерету становить близько 10 с та при наявності вогнезахисту збільшується до 210 с. Що відповідно, проявляється у збільшенні індукційного періоду займання більш ніж у 8 разів.

2. Особливості формування шару пінококсу у результаті термічної дії на вогнезахисне покриття, що містить антипірен та полімерної складової, полягають у виділенні негорючих газів фазі та утворенням на поверхні деревини теплозахисного шару коксу. Завдяки такому механізму, що встановлено на основі експериментальних досліджень, вогнезахист очерету переводить з легкозаймистих матеріалів до важко займистих. В порівнянні з необробленим очеретом,

для якого притаманний індукційний період займання в 58 с, це дозволяє стверджувати про ефективність використання вогнезахисту, що підвищує тривалість індукційного періоду займання за рахунок розкладанням антипіренів та перепону температури нагрівання до 587,45 с. Це свідчить про можливість спрямованого регулювання процесом формування шару пінококсу шляхом оброблення очерету антипіреном з застосуванням полімерної складової.

Література

1. Tsapko Y., Tsapko A. Modeling a thermal conductivity process under the action of flame on the wall of fire-retardant reed // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, Issue 10 (92). P. 50–56. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128316>
2. Tsapko Y., Tsapko A. Establishment of fire protective effectiveness of reed treated with an impregnating solution and coatings // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4, Issue 10 (94). P. 62–68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141030>
3. Tsapko J., Tsapko A. Simulation of the phase transformation front advancement during the swelling of fire retardant coatings // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, Issue 11 (86). P. 50–55. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.73542>
4. Tsapko Y., Tsapko A. Influence of dry mixtures in a coating on the effectiveness of wood protection from the action of a magnesium flame // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, Issue 10 (89). P. 55–60. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111106>
5. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen / Krüger S., Gluth G. J. G., Watolla M.-B., Morys M., Häbler D., Schartel B. // *Bautechnik*. 2016. Vol. 93, Issue 8. P. 531–542. doi: <https://doi.org/10.1002/bate.201600032>
6. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber / Xiao N., Zheng X., Song S., Pu J. // *BioResources*. 2014. Vol. 9, Issue 3. doi: <https://doi.org/10.15376/biores.9.3.4924-4933>
7. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action / Nine M. J., Tran D. N. H., Tung T. T., Kabiri S., Losic D. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. Vol. 9, Issue 11. P. 10160–10168. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00572>
8. Cirpici B. K., Wang Y. C., Rogers B. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire // *Fire Safety Journal*. 2016. Vol. 81. P. 74–84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>
9. Oriented Clay Nanopaper from Biobased Components – Mechanisms for Superior Fire Protection Properties / Carosio F., Kochumalayil J., Cuttica F., Camino G., Berglund L. // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, Issue 10. P. 5847–5856. doi: <https://doi.org/10.1021/am509058h>
10. Effect of Dolomite Clay on Thermal Performance and Char Morphology of Expandable Graphite Based Intumescent Fire Retardant Coatings / Gillani Q. F., Ahmad F., Mutalib M. I. A., Melor P. S., Ullah S., Arogundade A. // *Procedia Engi-*

neering. 2016. Vol. 148. P. 146–150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.505>

11. An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application / Md Nasir K., Ramli Sulong N. H., Johan M. R., Afifi A. M. // *Pigment & Resin Technology*. 2018. Vol. 47, Issue 2. P. 142–153. doi: <https://doi.org/10.1108/prt-09-2016-0089>

12. Carosio F., Alongi J. Ultra-Fast Layer-by-Layer Approach for Depositing Flame Retardant Coatings on Flexible PU Foams within Seconds // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. Vol. 8, Issue 10. P. 6315–6319. doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00598>

13. Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings / Fan F., Xia Z., Li Q., Li Z. // *Progress in Organic Coatings*. 2013. Vol. 76, Issue 5. P. 844–851. doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.02.002>

14. Лойцянский Л. Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Недра, 1970. 904 с.

15. Фельдман Л. П., Святный В. А., Касимов О. И. Исследование утечек воздуха через выработанное пространство участка методами математического моделирования // *Разработка месторождений полезных ископаемых*. 1971. Вып. 22. С. 105–110.

16. Перельман В. И. *Краткий справочник химика*. М.: Госхимиздат, 1963. 624 с.