

УДК 614.842

Цапко Ю.В., канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
Науково-дослідний інститут судово-медичної
експертизи, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМИВАННЯ ЗАХИСНИХ ЗАСОБІВ З ДЕРЕВИНИ

Дані про технологічні й експлуатаційні властивості, безпеку для людини, експлуатаційні показники вогнезахисних композицій є важливими у практичному застосуванні. З огляду на це, протягом останніх років до використання запропоновані нові композиції [1]. Дані про їхні технологічні й експлуатаційні властивості, безпеку для людини, економічні показники є важливими у практичному застосуванні.

Необхідно зазначити, що деревину захищають від вогню та біоруйнування не водним розчином вогнезахисної речовини, а самою речовиною. Вода використовується лише як розчинник антипірену для його введення в деревину, після оброблення деревини вона випаровується. Під час експлуатації вогнезахисної деревини захисні засоби через певний проміжок часу мігрують разом з вологою до поверхні, утворюючи аерогель та аерозоль під впливом навколишньої атмосфери. Це і є головною причиною вимивання антипіренів і послаблення вогнезахисних властивостей.

Одним з показників ефективності вогнебіозахисту деревини є її експлуатаційна надійність. На теперішній час все більш широко застосовуються такі технології поверхневої обробки, за яких просочення деревини проводиться пошаровим нанесенням розчину на поверхню, що забезпечує необхідну групу вогнезахисної ефективності згідно з [2]. Вибір способу вогнезахисту деревини і захисного засобу проводять з урахуванням конструктивних, технологічних та техніко-економічних вимог, що пред'являються до вогнезахисної деревини відповідно до умов її експлуатації.

Після надавання деревині вогнебіозахисних властивостей суттєвим чинником є здатність просочувальних засобів утримуватися в її структурі протягом тривалого проміжку часу за умов коливання як температури, так і вологості в широких межах, у зв'язку з чим актуальним є питання визначення терміну зберігання ефективності вогнебіозахисту деревини.

За розробленим розрахунково-аналітичним методом, коли в процесі експерименту вимірюється відносна концентрація антипірену в оточуючому середовищі, визначено інтенсивність масопереносу захисних засобів з вогнебіостійкої деревини [3]. За отриманими даними розраховано коефіцієнт дифузії D та масоперенесення β (табл. 1).

Таблиця 1 - Результати визначення масоперенесення антипірену з вогнестійкої деревини

Захищені зразки деревини	Коефіцієнт дифузії (D), м ² /с	Коефіцієнт масоперенесення (β), м/с
антипіреном	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$44,6 \cdot 10^{-3}$
сумішшю ДСА-1	$2,36 \cdot 10^{-7}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$
сумішшю ДСА-2	$1,75 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-4}$
сумішшю ДСА-1 та "Сілол"	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$0,05 \cdot 10^{-5}$

Отримані результати показали, що застосування полімерного антисептика в 3,3 рази, а гідрофобізатора “Сілол” в 14 разів зменшує процес масоперенесення антипірену, що в значній мірі підвищує термін експлуатації вогнебістійкої деревини та дозволяє її застосування на об’єктах з підвищеною вологістю.

Практичний інтерес при розробленні нових і більш ефективних речовин, представляють аналітичні залежності, які дозволяють шляхом безпосередніх обчислень прогнозувати глибину просування фронту фазових перетворень у захищеному матеріалі, а також визначити товщину розчиненого шару антипірену та антисептика, що вимивається зі зразка, від їх фізико-хімічних властивостей.

Для одержання залежностей розрахунку швидкості просування фронту фазових перетворень та виділення антипірену з вогнебістійкої деревини створено фізичну модель, у якій розглядаються три області (рис. 1).

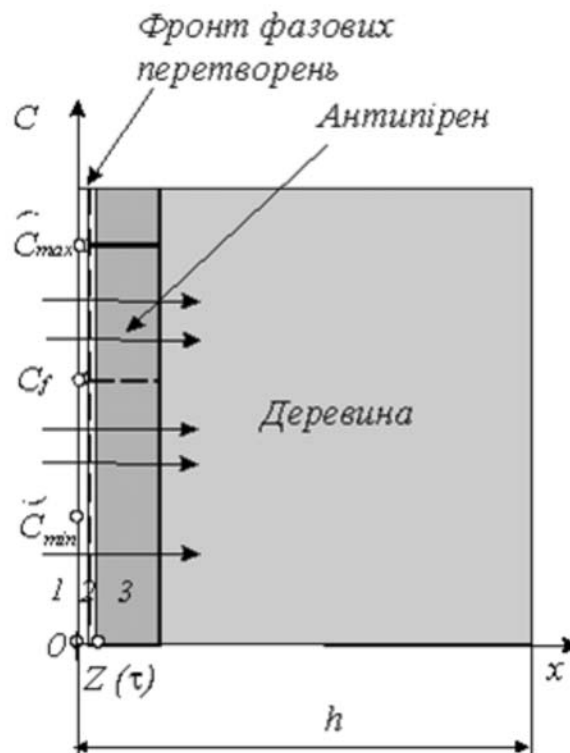


Рисунок 1 - Схема процесу вимивання антипірену з деревини:

1 – зовнішнє середовище, $x < 0$; 2 – зона зразка з розчищеною речовиною, $0 < x \leq Z(\tau)$ (Z – координата фронту фазового перетворення, м); 3 – матеріал зразка з твердою речовиною, $Z \leq x \leq h$ (h – половина товщини зразка, м) [4].

Диференціальне рівняння дифузії, що описує процес вимивання захисних засобів з вогнебіззахищеної деревини, має такий вигляд [5]:

$$\frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{1}{\varphi_i^2} \frac{\partial C_i}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де C_i – концентрація речовини в i -й області, кг/м³;

$\varphi_i = \sqrt{D_i}$; D_i – коефіцієнт дифузії речовини в i -й області, м²/с;

τ – час перебування зразка в середовищі після просочення, с.

У початковий момент часу вміст просочувальної речовини в зовнішньому середовищі мінімальний, а в матеріалі зразка – максимальний. За рахунок фазового перетворення (твердої речовини в рідину) виділяється маса речовини з інтенсивністю q , кг/(м³·с), що пропорційна швидкості просування фронту фазових перетворень – $q = \xi \cdot dZ/d\tau$ (де ξ , кг/м⁴ – коефіцієнт пропорційності, що показує потужність джерела виділення речовини на одиницю глибини просування фронту).

Вводимо безрозмірні перемінні ($\xi = x/h$, $\bar{\tau} = \varphi_3^2 \cdot \tau / h^2$, $\bar{C}_i = (C_i - \bar{C}) / (\bar{C} - \bar{C})$) і тоді задача формулюється, як вирішити диференціальне рівняння:

$$\frac{\partial^2 \bar{C}_i}{\partial \xi^2} = \frac{1}{\bar{\varphi}_i^2} \frac{\partial \bar{C}_i}{\partial \bar{\tau}} \quad (2)$$

з умовами: $\bar{C}_1(\xi, 0) = 0$; $\bar{C}_3(\xi, 0) = 1$;

$$\bar{\beta}_1 \left. \frac{\partial \bar{C}_1}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = \bar{\beta}_2 \left. \frac{\partial \bar{C}_2}{\partial \xi} \right|_{\xi=0};$$

$$\bar{C}_1(0, \bar{\tau}) = \bar{C}_2(0, \bar{\tau}); \quad \bar{C}_2(\bar{Z}, \bar{\tau}) = \bar{C}_3(\bar{Z}, \bar{\tau}) = \bar{C}_f;$$

$$\bar{\beta}_2 \left. \frac{\partial \bar{C}_2}{\partial \xi} \right|_{\xi=\bar{Z}} - \bar{\beta}_3 \left. \frac{\partial \bar{C}_3}{\partial \xi} \right|_{\xi=\bar{Z}} = \bar{g} \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{\tau}},$$

$$\text{де } \bar{\varphi}_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_3}, (\bar{\varphi}_3 = 1) \quad \bar{\beta}_i = \frac{\beta_i}{\beta_3}, (\bar{\beta}_3 = 1) \quad \bar{Z} = \frac{Z}{h}; \quad \bar{C}_f = \frac{C_f - \bar{C}}{\bar{C} - \bar{C}}; \quad \bar{g} = \frac{\varphi_3^2}{\beta_3} \frac{g}{\bar{C} - \bar{C}}.$$

Для визначення межі фазових перетворень та швидкості просування їх фронту рішення рівняння (2) приймає наступний вигляд:

$$\bar{C}_i = a_i + b_i \Phi \left(\frac{\xi}{2\bar{\varphi}_i \sqrt{\bar{\tau}}} \right), \text{ де: } \Phi(\sigma) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\sigma e^{-\sigma^2} d\sigma \text{ – інтеграл помилок } (\Phi^*(\sigma) = 1 - \Phi(\sigma)) \quad (3)$$

За умови пропорційності координати фронту розчинення кореню квадратному з часу і коефіцієнту пропорційності, прийнятий рівним подвоєної константі λ , щодо невідомих a_i , b_i , λ , знаходимо рішення на межі фазового перетворення:

$$\frac{\bar{\beta}_2}{\bar{\varphi}_2} \frac{\bar{C}_f}{\eta + \Phi \left(\frac{\lambda}{\bar{\varphi}_2} \right)} e^{-\frac{\lambda^2}{\bar{\varphi}_2^2}} - \frac{1 - \bar{C}_f}{\Phi^*(\lambda)} e^{-\lambda^2} = \sqrt{\pi} \bar{g} \lambda, \quad (4)$$

$$a_1 = a_2 = b_1 = \frac{b_2}{\eta} = \frac{\eta \bar{C}_f}{\eta + \Phi \left(\frac{\lambda}{\bar{\varphi}_2} \right)},$$

$$a_3 = \frac{\bar{C}_f - \Phi(\lambda)}{\Phi^*(\lambda)}, \quad b_3 = \frac{1 - \bar{C}_f}{\Phi^*(\lambda)}, \quad \eta = \frac{\bar{\varphi}_1 \cdot \bar{\beta}_2}{\bar{\varphi}_2 \cdot \bar{\beta}_1},$$

вирішено рівняння (4), за умови розчинення 50% антипірену на границі фронту фазових перетворень та початку виділення його в навколишнє середовище, знайдено коефіцієнт швидкості просування фронту фазових перетворень ($\lambda = 0,062$) та визначено час початку виділення додаткової маси вогнезахисних речовин з деревини, який становить 56 с.

Для побудови математичної моделі процесу вимивання антипірену з вогнебістійкої деревини із полімерною оболонкою антисептика введемо умовність, що матеріали полімерної плівки і зразка однорідні, а капілярно-пористий матеріал зразка просочений сольовим розчином антипірену рівномірно (рис. 2) [5].

У початковий момент часу вміст просочувальної речовини в зовнішньому середовищі й на поверхні покриття зразка мінімальний, а в матеріалі зразка – максимальний, фронт розчинення відсутній, а тому початкові та граничні умови можна записати таким чином:

$$Z(0) = 0; \quad C_i(x,0) = \check{C}_{min}, \quad i = 1...3; \quad C(x,0) = \begin{cases} \check{C}_{min}, & x \leq \delta; \\ \check{C}_{max}, & x > \delta. \end{cases} \quad (5)$$

На границі полімерної плівки і зовнішнього середовища задається гранична умова третього роду:

$$D_2 \left. \frac{\partial C_2}{\partial x} \right|_{x=0} = \beta(C_2 - C_1)|_{x=0}, \quad (6)$$

де β – коефіцієнт масообміну між поверхнею полімерної плівки і зовнішнім середовищем, м/с.

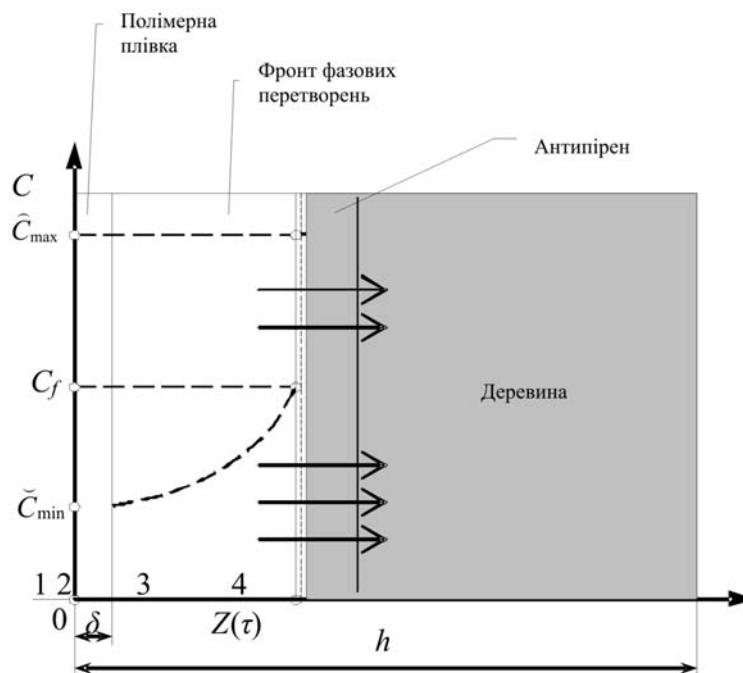


Рисунок 2 - Схема процесу вимивання антипірену з деревини, покритої оболонкою антисептика: 1 – зовнішнє середовище, $x < 0$;
 2 – полімерна плівка, $0 \leq x \leq \delta$ (δ – товщина полімерної плівки, м);
 3 – зона зразка з розчиною речовиною, $\delta < x \leq Z(\tau)$ (Z – координата фронту фазового перетворення, м); 4 – матеріал зразка з твердою речовиною, $\delta \leq x \leq \delta + h$ (h – половина товщини зразка, м)

Враховуючи неперервність полів концентрації і дифузійних потоків речовини на границі полімерної плівки та матеріалу зразка і на фронті розчинення концентрації речовини і масові потоки речовини збігаються (умови четвертого роду):

$$C_2(\delta, \tau) = C_3(\delta, \tau), C_3[Z(\tau) \tau] = C_4[Z(\tau) \tau] = C_f. \quad (7)$$

Для розв'язання задачі (1, 5-7) застосовано числові методи аналізу за явною схемою. Вводимо безрозмірні змінні:

$$\bar{x} = \frac{x}{2h}; \quad Fo_i = \frac{D_i \tau}{x^2}; \quad \bar{Z} = \frac{Z}{2h}; \quad \bar{C} = \frac{C}{C_{\max}},$$

де Fo – дифузійне число Фур'є.

Розрахункова сітка представлена вузлами по простору $i = 0 \dots 100$, які отримано шляхом умовного поділу зразка перерізами із кроком $\Delta \bar{x}$ і на тимчасові шари n із кроком ΔFo за умови $\beta = \Delta Fo / \Delta \bar{x}^2 = 1/6$, що забезпечує стійкість явної схеми при розрахунку по шаблону:

$$\bar{C}_i^{n+1} = \frac{1}{6} (\bar{C}_{i+1}^n + 4\bar{C}_i^n + \bar{C}_{i-1}^n). \quad (8)$$

У результаті вихідне рівняння (1) перетворюється на систему алгебраїчних рівнянь і сіткові значення безрозмірних залежних змінних стали функціями сіткових значень чисел Фур'є ($F = \frac{\Delta Fo}{\Delta \bar{x}^2}$), а на границі полімерної плівки і зовнішнього середовища – Нусельта ($N = \frac{D_2}{\beta \cdot \Delta \bar{x}}$).

У таблиці 2 наведено результат розрахунку рівняння (1) при $F = 0,01$ та $N = 0,01$.

Таблиця 2 - Розподіл концентрації антипірену в окремих шарах зразка деревини

Перетин зразка	Ітерації						
	10	20	30	40	50	60	70
На поверхні оболонки	0,280	0,328	0,387	0,403	0,407	0,407	0,405
В середині оболонки	0,318	0,335	0,402	0,403	0,435	0,464	0,489
На межі розділення	0,448	0,495	0,539	0,581	0,621	0,659	0,695
На глибині чверті товщини зразка	0,810	0,741	0,714	0,707	0,704	0,703	0,701
На глибині половини товщини зразка	1,000	0,942	0,897	0,850	0,804	0,760	0,720

Початковий вміст антипірену на поверхні оболонки антисептика було прийнято рівним 20% від його початкового вмісту в деревині. Як видно з табл. 2, на початку експлуатації вогнезахисної деревини, за постійної інтенсивності дифузійного виносу вогнезахисної речовини – швидкість просування фронту фазових перетворень знижується, що відповідає повному розчиненню засобу у зразку, після чого починається процес поступового його вимивання в навколишнє середовище.

На рис. 3 показано залежності значення концентрації антипірену в зразку із зміною товщини полімерного антисептика, критичне значення якої можна визначити за рівнянням:

$$\delta = \frac{Nu \cdot D_2}{\beta}. \quad (9)$$

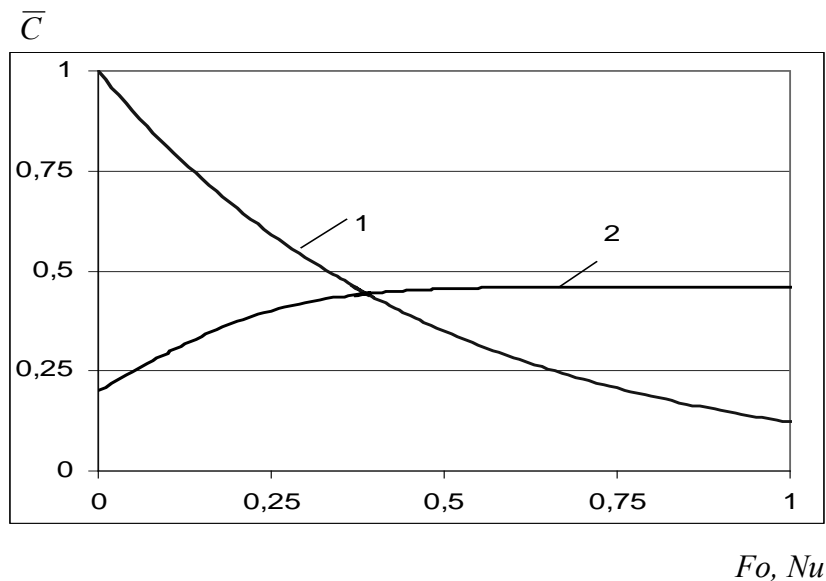


Рисунок 3 - Зміна концентрації вогнезахисної речовини \bar{C} в деревині залежно від Fo (1) та Nu (2)

Розрахована товщина полімерної оболонки антисептика для суміші ДСА-2, за якої настає руйнування, становить $10,5 \cdot 10^{-6}$ м.

Таким чином, запропонована математична модель і метод її числової реалізації дають можливість визначати параметри процесу висолювання вогнезахисних речовин у деревині та оболонці її покриття в оточуюче середовище залежно від геометричних розмірів зразків, фізико-хімічних властивостей речовин, що просочують деревину і їхнього первісного розподілу в матеріалі оболонки, деревині і навколишньому середовищі.

Результати досліджень дозволять також ціленаправлено вирішувати подальші задачі щодо створення нових засобів і способів вогнезахисту деревини та умов експлуатації вогнебіо захищеної деревини на різних об'єктах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жартовский В.М. Профилактика горения целлюлозовмісних матеріалів. Теорія та практика / В.М. Жартовский, Ю.В. Цапко - Київ: УкрНДПБ МНС України, 2006. - 256 с.
2. ГОСТ 16363-98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств
3. Цапко Ю.В., Жартовський В.М. Дослідження процесів масопереносу антипірену у вогнебіо захищеної деревині / Ю.В. Цапко, В.М. Жартовський // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2009. – №1 (19). - С. 118–126.
4. Цапко Ю.В. Розрахунок швидкості висолювання антипірену у вогне захищеному шарі деревини / Ю.В. Цапко // Науковий вісник УкрНДПБ. К.: УкрНДПБ, 2006. - №1 (13). - С. 83-89.
5. Цапко Ю.В. Аспекти моделювання процесу висолювання вогнезахисних композицій з деревини / Ю.В. Цапко, К.І. Соколенко // Науковий вісник УкрНДПБ. - 2005. - №1 (11). - С. 82-85.