

УДК 699.81:614.84:536:31

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040624.58.1059

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ДЕСТРУКЦІЇ ТА ГОРІННЯ ОРГАНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

БЄЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ТОДОРОВ О. П.², *асп.*,
ЧУМАК Л. О.³, *канд. техн. наук, доц.*
ХАРЧЕНКО В. В.^{4*}

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Кафедра фундаментальних та природничих дисциплін, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

^{4*} Відділ Дніпропетровського НДЕКУ МВС України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 225-93-89, e-mail: dniprondise@ukr.net

Анотація. *Постановка проблеми.* Пожежі швидко виникає і розвивається за наявності в осередку горючих матеріалів та конструкцій. Це ускладнює, а в деяких випадках робить неможливими ефективно вогнегасіння, евакуацію, порятунок людей і матеріальних цінностей. З метою оцінювання процесів розвитку горіння та розроблення засобів підвищення вогнестійкості виробів та конструкцій необхідно вивчити процеси горіння матеріалів. *Мета* – моделювання процесів горіння легкодиспергуючих речовин і розвитку газоподібних реакцій та їх суміщення на прикладі горіння деревини. *Методика* – вивчення процесів горіння, математичне моделювання процесів горіння на прикладі горіння деревини з урахуванням деструктивних процесів за дії високих температур з урахуванням правил термодинаміки. *Результати.* Аналіз показав, що виділення основних стадій під час моделювання горіння деревини значно менше розроблене, ніж у випадку горіння газових систем. Особливо складно це зробити для опису горіння деревини, на поверхні якої відбувається взаємодія мас (і тепла) при вигоранні окремих компонентів, причому розмір поверхні фронту горіння на одиницю перерізу зразка також може змінюватись у часі. Тому визначенням основної стадії горіння деревини слід користуватись в основному для якісного аналізу процесу, а кількісні моделі горіння деревини слід будувати по можливості з урахуванням усіх визначальних факторів, що характеризують явища. *Наукова новизна.* Вперше на основі моделювання процесів горіння органічних матеріалів визначено закономірності деструктивних процесів, які, залежно від температури, мають спільні закономірності якісних та кількісних характеристик. Визначено хімічну стадійність та її зв'язок із фізичною стадійністю перетворення горючих органічних матеріалів, диспергованих у поверхневому шарі, із сумарним тепловим ефектом хвилі горіння. *Практична значимість.* Виділення стадій під час хвильового горіння деревини дозволяє мати якісне відображення процесів залежно від просторової зони та її віддалення від газової зони, що дозволяє прогнозувати розроблення захисних засобів органічних матеріалів від горіння.

Ключові слова: *пожежа; горіння; стадія горіння; вогнестійкість*

SIMULATION THE PROCESSES OF ORGANIC MATERIALS DESTRUCTION AND COMBUSTION PROCESSES CONDITION OF FIRE INTENSEICATION

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
TODOROV O.P.², *Postgrad. Stud.*,
CHUMAK L.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KHARCHENKO V.V.⁴

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: 5232255@ukr.net, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

³ Department of Fundamental and Natural Sciences, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-3858-8028

^{4*} Department of the Dnipropetrovsk Research Institute of Forensic Expertise, Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 17, Sicheslavsk Naberezhna St., Dnipro, 49000, Ukraine, tel.+38 (096) 225-93-89, e-mail: dnipronoise@ukr.net

Abstract. Problem statement. The rapid occurrence and development of fires are caused by the occurrence of combustible materials and structures in their focus. This complicates, and in some cases makes impossible, effective firefighting, evacuation, and rescue of people and property. In order to correctly assess fire resistance, effectively increase fire resistance, and change the flammability of materials, it is necessary to study the materials burning process. **The purpose of the article.** To study of the combustion of easily dispersible substances and the development of gaseous reactions and their combination using the example of wood combustion. **Methods.** We use mathematical modeling of combustion and destructive processes under the high temperatures, taking into account the rules of thermodynamics. **Research results.** The conducted analysis showed that the selection of the main stages in the simulation of wood combustion is much less developed than in the case of the combustion of gas systems. It is especially difficult to do this to describe the combustion of wood, on the surface of which there is an interaction of masses (and heat) during the combustion of individual components, and the size of the front surface per unit cross-section of the sample may also change over time. Therefore, the definition of the main stage in wood burning should be used mainly in the qualitative analysis of the process, and quantitative models of wood burning should be built, if possible, taking into account all the determining factors characterizing the phenomena. **Scientific novelty.** For the first time, on the basis of the modeling of organic material combustion is proposed. We determine the patterns of destructive processes, which, depending on the temperature, have common patterns of qualitative and quantitative characteristics. The chemical phasing and its connection with the physical phasing of the transformation of combustible organic materials dispersed in the surface layer with the overall thermal effect of the combustion wave were determined. **Practical value.** The identification of stages during the wave burning of wood allows for a qualitative display of processes depending on the spatial zone and its distance from the gas zone, which allows predicting the development of protective means of organic materials against combustion.

Keywords: fire; combustion; combustion stage; fire resistance

Постановка проблеми. Швидке виникнення і розвиток пожежі відбуваються за наявності в осередку виникнення горючих матеріалів та конструкцій. Це ускладнює, а в деяких випадках робить неможливим ефективне вогнегасіння, евакуацію, порятунок людей і матеріальних цінностей. З метою правильної оцінки вогнестійкості, ефективного підвищення вогнестійкості, зміни горючості матеріалів необхідно вивчити процеси горіння матеріалів.

Теоретичні розробки, що існують зараз, у більшості випадків базуються на уявленнях про вузькі зони хімічних перетворень. Неможливість докладного опису всіх хімічних реакцій, що відбуваються у хвилі горіння матеріалу, викликає необхідність моделювання процесів горіння та виділення декількох умовних стадій, що дозволяє докладно оцінити зміни вогнестійкості, які відбуваються у матеріалі, та можливості її підвищення.

Аналіз процесу горіння на прикладі горіння деревини

За температури, яка дещо перевищує 1 000 °С, у деревині відбувається гідроліз полісахаридів. Крім того, розкладання відбувається з поглинанням тепла, а від температури вище 1 500 °С процес розкладання прискорюється. За температур від 175–285 до 3 500 °С виділяється велика кількість CO₂, CO і рідкий дистилят, що містить оцтову кислоту, її гомологи і метанол. За температури понад 2 800 °С утворюються водень та вуглеводні, за 350–5 000 °С розкладання лігніну та екстрактивних речовин супроводжується утворенням невеликої кількості рідких продуктів, таких як важка смола, CO₂, CO і вуглеводні. Максимальна концентрація вуглеводнів досягається за 380–5 000 °С.

Схема процесу горіння матеріалів на прикладі деревини за дії сумарного променево-конвективного теплового потоку – $q_{\text{л}} + q_{\text{к}}$ показана на рисунку 1, де:

T_w , – температура на поверхні, що

перебуває під дією вогню;

T_0 – початкова температура;

T^* – температура у зоні розкладання;

G_w и G_g – розхід через поверхню, що перебуває під дією вогню, твердих часток та газів, що виділяються.

Стадіям, які виділені вище, приписується сумарний тепловий ефект, а швидкість генерації тепла, пов'язана із швидкістю хімічної реакції, описується дещо формальною кінетикою. Під час горіння деревини можуть реалізовуватись

процеси, для яких теоретичний аналіз стадійності у достатньому обсязі досі не проводився. У той же час, з практичного погляду оцінювання вогнестійкості конструкцій, необхідно виділяти основні стадії горіння, оскільки це дає ключ до розуміння усього процесу горіння і керування ним.

Мета дослідження – вивчення горіння легкодиспергуючих речовин і процесу розвитку газоподібних реакцій та їх суміщення на прикладі горіння деревини.

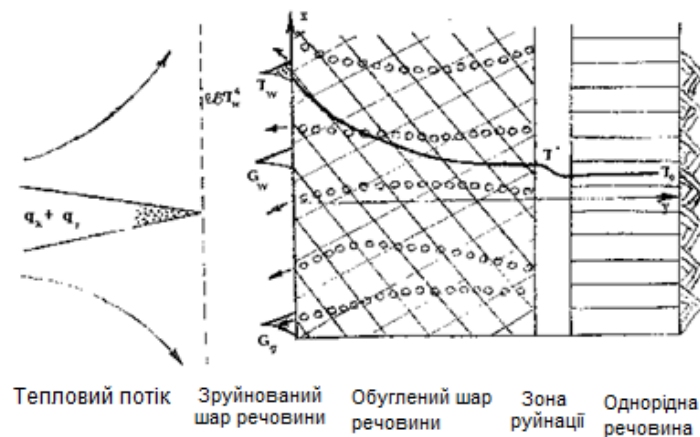


Рис. 1. Схема процесу горіння матеріалів, вироблених із деревини

Обґрунтування методики дослідження

Характерна особливість рівнянь, за допомогою яких описують процеси горіння, полягає в наявності членів, що експоненціально залежать від температури, що властиво закону Арреніуса [3].

Розглянемо деякі якісні оцінки здійснення реакції горіння [1; 2]. Енергія активації реакції горіння має бути набагато більшою за енергію теплового руху молекул за характерної температури процесу, а значення екзотермічного теплового ефекту має значно перевищувати деяку масштабну кількість теплоти:

$$\beta = R \cdot T^* / E \ll 1, \quad \gamma = \beta_c \cdot T^* / Q \ll 1, \quad (1)$$

де T^* – характерна температура процесу; R – універсальна газова постійна; E , Q – енергія активації і тепловий ефект реакції; c – питна теплоємність.

Відомо [4], що за згорання 1 кг

абсолютно сухої деревини і матеріалів на її основі виділяються порівняно близькі кількості теплоти, кДж:

деревина (сосна) – 18 465–20 887;

ДВП напівтверда – 18 560;

тирса (соснова) – 19 420;

фанера (березова) – 20 283.

Практично однакові температури займання цих матеріалів: займання 238–255 °С; самозаймання тлінням 258–305 °С і самозаймання полум'ямим горінням (самозаймання) 360–427 °С.

Для визначення умов існування стаціонарної хвилі горіння сформуємо наступну задачу.

Рівняння теплопровідності у безкінечному просторі однорідного середовища для одновимірного розповсюдження стаціонарної хвилі горіння має вигляд:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda(x, T) \frac{dT}{dx} \right) - m(x, T) c \frac{dT}{dx} + q_v(T) = 0, \\ -\infty < x < +\infty, \quad (2)$$

де $\lambda(x, T)$ – теплопровідність деревини, яка змінюється при проходженні фронту горіння за рахунок утворення обвугленого шару, що має більш низькі значення теплопровідності порівняно із звичайною деревиною; x – координата; $m(x, T)$ – масова швидкість горіння, що змінюється під час горіння за рахунок утворення обвугленого шару і зменшення доступу кисню до поверхні розділу; $q_v(T)$ – функція екзотермічного джерела теплоти, яка визначається нижче за формулою (7). Рівняння (2) записане у відносній системі координат, пов'язаній із фронтом полум'я. Природні граничні умови полягають у тому, що:

$$\text{при } x \rightarrow -\infty, T \rightarrow T_0, \quad (3)$$

$$\text{при } x \rightarrow +\infty, T \rightarrow T_m = T_0 + Q/c, \quad (4)$$

тобто при $x \rightarrow -\infty$ реакція ще не почалась, а при $x \rightarrow +\infty$ – завершилась. Із рівняння (2) при цьому впливає, що функція джерела повинна відповідати умовам:

$$\begin{cases} q_v(T_0) = 0 \\ q_v(T_m) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Аналіз показує [3], що для забезпечення єдиного вирішення задачі на функцію джерела треба накласти ще одне обмеження:

$$\frac{dq_v(T_0)}{dx} \leq 0. \quad (6)$$

На практиці це здійснюють, прирівнюючи до нуля функцію $q_v(T)$ у деяких інтервалах температур, близьких до T_0 [4]:

$$\begin{cases} q_v(T) = 0 \text{ за } T_0 \leq T \leq T_1 \\ q_v(T) = \rho Q f(\eta) k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \text{ за } T_1 < T < T_m \end{cases} \quad (7)$$

де $f(\eta)$ – функція, що враховує залежність швидкості реакції від концентрації у деревині компонентів, які вигорають; η – глибина реакції; k_0 – передекспонента в законі Арреніуса для швидкості реакції.

Результати чисельних розрахунків залежності величини масової швидкості

горіння m від T_1 ($T_1 \in (T_0, T_m)$) показали [5], що якщо виконується нерівність між параметрами γ і β (1):

$$\gamma - \beta = x = \frac{cRT_0T_m}{QE} < 0,1, \quad (8)$$

то швидкість хвилі горіння не залежать від значення T_1 і при $\chi > 0,1$ стаціонарна хвиля горіння існувати не може.

Параметр χ характеризує відношення швидкостей реакції за температур T_m і T_0 :

$$\frac{q_v(T_m)}{q_v(T_0)} = \exp\left(\frac{1}{x}\right).$$

Із нерівності (8) випливає, що для здійснення стаціонарної хвилі горіння енергія активації джерела повинна бути значно більша за енергію теплового руху молекул за початкової температури ($E \gg RT_0$) і тепловий ефект реакції повинен бути не менший за теплову частину ентальпії вихідної системи за початкової температури ($Q > cT_0$).

Як уже вказано, швидкість розповсюдження хвилі горіння тісно пов'язана з хімічною кінетикою. Таким чином, індивідуальні хімічні властивості конкретного палива враховуються завдяки постановці відповідної залежності швидкостей тепловиділення у хімічних брутто-реакціях від концентрації і температури.

Виділення та математичний опис стадій хімічних перетворень зручно пов'язати із фізичною послідовністю перетворень у хвилі горіння. Так, одним із природних шляхів виділення стадій є їх розділення за ознакою фазового стану речовини.

При цьому вважаємо, що всі реакції в конденсованій фазі (κ -фазі) відбувається в одну хімічну стадію, а наступні реакції в газовій фазі – у дві стадії. За одновимірного опису хвилі горіння ці стадії можуть бути рознесені у просторі або повністю, або частково перекриватися. Наприклад, очікується, що за горіння легкодиспергуючих речовин до-фазні (в аерозольних частинках) і газозфазні реакції будуть просторово поєднані.

Часто вдається виділити основну стадію горіння, тобто стадію, яка визначає швидкість горіння таким чином, що математичний опис цієї стадії забезпечує знаходження цієї величини як величини швидкості горіння, так і залежності швидкості горіння, так і від зовнішніх умов без урахування усього різноманіття процесів, що відбуваються поза цією основною стадією. Математичні моделі такого типу прийнято називати елементарними моделями горіння (ЕМГ). Короткий аналіз і класифікація ЕМГ наведені в [5].

Взаємодія стадій горіння. Зміна зовнішніх умов горіння (тиску, температури, масових сил) може спричинити перерозподіл функцій окремих стадій. Провідна стадія може стати другорядною, і навпаки. При цьому може змінитися залежність швидкості горіння від зовнішніх факторів, і поширення хвилі горіння описуватиметься вже іншою ЕМГ, в якій враховано особливості процесів у зоні, що стала головною. При цьому може змінитися залежність швидкості горіння від зовнішніх факторів, і розподіл хвилі горіння буде описуватися вже іншою ЕМГ, у якій враховані особливості процесів у зоні, що стала провідною. Причина зміни провідної стадії – різна чутливість швидкостей реакції у різних стадіях до зміни зовнішніх умов.

Проаналізуємо найпростіші випадки і відмітимо основні закономірності та явища.

Нехай в однорідному (газовому або конденсованому) середовищі розповсюджується хвиля горіння з двома послідовними реакціями $A \rightarrow B \rightarrow C$. Теплові ефекти послідовних реакцій позначимо як $Q_1(A \rightarrow B)$ і $Q_2(B \rightarrow C)$. Для визначеності припустимо, що $Q_2 > 0$. На знак обмеження немає, потрібно лише, щоб сума Q_1 і Q_2 була більша нуля і перевищувала певне граничне значення. Тоді температура горіння $T_m = T_0 + (Q_1 + Q_2)/c$, а температура, що відповідає протіканню тільки першої реакції $T_{10} = T_0 + Q_1/c$. Також вводяться $u_1(T_{10})$ – швидкість (лінійна) розповсюдження хвилі однієї першої реакції із власним тепловим

ефектом; $u_2(T_m)$ – швидкість, що відповідає випадку, коли друга реакція відбувається дуже швидко, так, що наприкінці першої стадії встановлюється температура горіння (перша реакція дуже швидко).

У результаті аналітичного розгляду та чисельного розв'язання задачі автори цитованих праць установили існування трьох режимів стадійного горіння: управління, відриву та злиття. У всіх випадках відповідні масові швидкості першої та другої стадій повинні бути однакові і рівні масовій швидкості горіння. Природно розглядати поширення хвилі горіння по нерухомій речовині.

Розглянемо випадок $Q_1 > 0$. Якщо при цьому $u_1(T_{10}) > u_2(T_m)$, хвиля першої стадії іде вперед, друга стадія практично не впливає на першу, яку в цьому випадку можна назвати головною. Цей режим названо режимом відриву.

Якщо $u_2(T_m) > u_1(T_{10})$, то хвиля другої високотемпературної стадії наздоганятиме хвилю першої стадії. При цьому в хвилі першої стадії зростатиме температура, а з нею і швидкість горіння і, поки при певній кінцевій відстані між зонами першої та другої реакцій не виконається умова $u_1(T_{10}) = u_2(T_m)$. У разі випадкового збільшення міжзонної відстані перша зона охолоджується (отримуючи менше тепла від другої) і гальмується, наближаючись таким чином до другої зони, і навпаки, отож процес стійкий. Температура наприкінці першої зони T_1 вже не рівна T_{10} і не може бути знайдена термодинамічним шляхом. Цей режим горіння названий режимом керування – друга стадія керує швидкістю першої, при цьому $u = u_2(T_m)$.

Якщо рівність $u_1(T_1) = u_2(T_m)$ не виконується до досягнення, у першій зоні температури T_m , швидкість горіння лімітується першою стадією і $u = u_1(T_m) < u_2(T_m)$. Цей режим названо режимом злиття.

Області, де відбуваються різні режими стадійного горіння (для випадку $Q_1 > 0$), можна об'єднати з урахуванням того, що – завжди $u_2(T_m) > u_2(T_{10})$ і подати у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u_1(T_m) > u_2(T_m) > u_1(T_{10}) & - \text{керування;} \\ u_1(T_m) > u_1(T_{10}) > u_2(T_m) & - \text{відрив;} \quad (9) \\ u_2(T_m) > u_1(T_m) > u_1(T_{10}) & - \text{злиття.} \end{aligned}$$

У випадку, коли параметри окремих стадій є такими, що виконується одна з наведених нерівностей, швидкість двостадійного горіння близька до тієї, що займає у цій нерівності середнє положення.

Якщо перша реакція ендотермічна ($Q_1 < 0$), то виконується:

$$u_1(T_m) > u_2(T_m) \text{ або } u_2(T_m) > u_1(T_m). \quad (10)$$

У такому випадку реальна швидкість реакції близька до одностадійної швидкості, що має меншу величину, тобто реалізуються режими або керування, або злиття.

Газифікація конденсованої фази деревини відбувається завдяки незворотній ендотермічній (або слабоекзотеричній) хімічній реакції. Багаті на енергію газоподібні продукти розкладення κ -фази реагують далі у газовій фазі з виділенням основної кількості тепла. Частина тепла, що виділилося у газовій фазі, витрачається на газифікацію κ -фази і на розігрів речовини від початкової температури T_0 до температури поверхні T_s . При цьому відстань між зоною тепловиділення в газовій фазі і поверхнею в κ -фазі така, що тепловий потік на поверхні горючого забезпечує масову швидкість газифікації, яка у точності дорівнює швидкості реакції в газовій фазі.

Масова швидкість газифікації у режимі керування спричинює інтенсивне обуглювання (конденсована фаза), що різко змінює параметри вогнестійкості дерев'яних конструкцій. Результатом обуглювання дерев'яної конструкції стає значне зменшення її носійної здатності. А оцінка огорджувальної здатності на носійних дерев'яних конструкціях по параметру прогріву з боку, що не обігривається, практично неможлива. Єдиною оцінкою огорджувальної здатності вогнестійкості конструкції може бути швидкість горіння деревини.

Формула для масової швидкості горіння аналогічна формулі для розповсюдження

хвилі горіння в газоподібному середовищі:

$$m^2 = 2n!(cRT_m/QE)^{n+1}(\lambda\rho/c)\kappa_0 \exp(-E/RT_m), \quad (11)$$

де n – порядок реакції; γ , c , ρ – теплопровідність, теплоємність та щільність газу; E – передекспонента і енергія активації; Q – тепловий ефект газозфазної реакції; $T_m = T_0 + Q/c$ – максимальна температура горіння; $T_0 = T_0 + Q_1/c_1$ – еквівалентна початкова температура; T_0 – початкова температура; Q_1 – тепловий ефект газифікації κ -фази.

Залежність швидкості горіння від тиску p і початкової температури T_0 характеризується коефіцієнтами:

$$\begin{aligned} \nu &= d \cdot \ln \frac{m}{d} \ln p = \frac{n}{2}, \\ \beta &= d \cdot \ln \frac{m}{dT_0} = \frac{E}{RT_m^2}. \end{aligned}$$

Тристадійна модель горіння (одна хімічна стадія відбувається в κ -фазі і дві – в газовій) легко може бути розповсюджена на довільну кількість послідовних стадій, тому без втрати спільності розглянемо більш простий випадок ходу реакцій у дві стадії: перша стадія в κ -фазі ($x < 0$), друга – в газовій ($x > 0$).

Стаціонарний процес розповсюдження хвилі горіння описується системою рівнянь збереження маси і енергії:

$$-\infty < x < 0 \text{ (перша стадія, індекс 1):}$$

$$\frac{\lambda_1 d^2 T}{dx^2} - \frac{c_1 m d T}{dx} = \frac{Q_1 m d a_1}{dx} = -\Phi_1(a_1, T) Q_1; \quad (12)$$

$$x = -\infty, T = T_0, a_1 = 1, T = T_s, a_1 = 0; \quad (13)$$

$$0 < x < \infty \text{ (друга стадія, індекс 2):}$$

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_2 d^2 T}{dx^2} - \frac{c_2 m d T}{dx} &= \\ = Q_2 \left(\frac{m d a_2}{dx} - \frac{\rho D d^2 a_2}{dx^2} \right) &= -\Phi_2(a_2, T) Q_2, \quad (14) \end{aligned}$$

де T_0 – початкова температура; $T_{s1} = T_0 + Q_1/c_1$ – температура поверхні κ -фази, що відповідає перебігу тільки першої реакції; Q – тепловий ефект реакції у відповідній фазі; c , λ – теплоємність і

теплопровідність; a – концентрація; ρ – щільність; D – коефіцієнт дифузії газової фази.

Для κ -фази прийнято $\rho = \text{const}$, $D_1 = 0$. Для газофазової реакції $Q_2 > 0$. Обмеження на знак теплового ефекту в κ -фазі немає. Також припускається, що швидкість реакції в κ -фазі Φ_1 від тиску не залежить. Температура поверхні T_s в граничній умові при $x = 0$ має бути визначена. Гранична умова для теплового потоку при $x = 0$ записана на основі попередніх викладок.

Інтегруючи рівняння для a_1 і a_2 від $x = -\infty$ до $x = \infty$, отримуємо співвідношення:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_1(a_1, T) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx = m.$$

Інтегруючи далі перше з рівнянь (12), отримуємо:

$$\lambda_2 \left(\frac{dT}{dx} \right) x = 0 = q_1 = \\ = Q_2 \int_0^{\infty} \Phi_2(a_2, T) dx - c_2 m (T_2 - T_s). \quad (15)$$

З урахуванням попереднього співвідношення і виразу для T_{s1}

$$q = m(c_2 T_s - c_1 T_{s1}) \cong mc(T_s - T_{s1}) \text{ при } c_1 \cong c_2 = c.$$

Гранична умова для da_2/dx записана в наближеній подібності полів температури і концентрацій.

Наближені вирази для швидкостей хімічних реакцій в κ - і газовій фазах мають такий вигляд:

$$m_1^2 = \frac{2\rho_1 \chi_1}{2T_s - T_{s1} - T_0} \cdot \frac{RT_0^2}{E_1} k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right); \quad (16)$$

$$m_2^2 = \frac{2n! z \lambda_2}{c} \cdot \frac{(RT_2^2 / E_2)^{n+1}}{(T_2 - T_{s1}) \cdot (T_2 - T_s)^n} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right), \quad (17)$$

де $z = k_{02} \mu (\rho / RT_2)^n$, μ – молярна маса; p – тиск; R – універсальна газова постійна; n – порядок реакції; E , k_0 – енергія активації і передекспонента в законі Арреніуса для швидкості реакції.

У виразах для m_1 і m_2 невідомою величиною є T_s , але, оскільки за стаціонарного горіння $m_1 = m_2 = m$,

співвідношення (16) і (17) можна розглядати як систему для двох невідомих – t і T_s . Так, наприклад, за горіння в режимі відриву швидкість горіння визначається реакціями в κ -фазі (головуючій зоні або стадії) і розраховується за (16) при $T_s = T_{s1}$ ($Q_1 > 0$).

Обговорення результатів. Аналіз чисельного розв'язання задачі про стадійне розповсюдження полум'я по однорідному середовищу показав, що зміна режимів горіння відбувається у достатньо вузькому проміжку зміни параметрів. На цьому ґрунтується висновок, що для таких умов завжди вдається встановити провідну стадію. Процедура виділення провідної стадії описана вище: істинна швидкість горіння близька до значень швидкості, що обчислюється за співвідношеннями для окремої стадії і що займає проміжну позицію між мінімальним та максимальним значеннями.

За переходу до моделювання процесів горіння конденсованих систем питання виділення стадії стає складнішим та менш однозначним, ніж у випадку горіння газів. Тут виникають специфічні труднощі, пов'язані з коректним описом процесів хімічних перетворень, що одночасно відбуваються у хвилі горіння, і зміни фізичного стану речовини: тверде тіло — газонасичений поверхневий шар — газова фаза.

Згідно з уявленнями, під час горіння деревини хімічні реакції починаються в κ -фазі і продовжуються в диспергованих частинках деревини. Крім того, хімічні реакції відбуваються у бульбашках газу всередині поверхневого шару в κ -фазі і після виникнення полум'я. При варіюванні зовнішніх умов горіння відносна роль реакцій у тих чи інших просторових зонах може змінюватися. Наприклад, можливо уявити ситуацію, коли з підвищенням тиску збільшується повнота перетворень у межах κ -фази для окремих реакцій газоподібних продуктів розкладання деревини, і тоді тепловиділення від цих реакцій необхідно буде приписувати не прилеглій газовій зоні, а газонасиченого поверхневого шару деревини.

Враховуючи невисокий коефіцієнт теплопровідності деревини і невелику глибину прогрітого термічного шару відносно товщини конструкції, що прогривається, процеси горіння деревини слід розглядати як горіння термічно товстих тіл.

В існуючих аналітичних моделях горіння хімічна стадійність зазвичай однозначно пов'язується з фізичною стадійністю перетворення речовини у хвилі горіння. Уявляється, що найбільш обґрунтовано можна говорити про брутто-реакції в поверхневих шарах або безпосередньо на поверхні деревини, а також про реакції в газовій зоні. Надійних експериментальних доказів існування за підвищених тисків розвиненої пінної зони на поверхні деревини або інтенсивного диспергування поверхневих шарів до-фази в літературі немає.

Необхідно також звернути увагу на те, що концентрація частинок у потоці продуктів згорання навіть за високих ступенів диспергування порівняно мала. Це зумовлено значним збільшенням обсягу продуктів горіння при переході речовини з конденсованого стану в газ: щільність середовища змінюється в десятки та сотні разів. Отже, для одновимірного опису горіння в димогазовій зоні потрібно ретельно виконувати процедури опосередкування параметрів двофазного середовища та функції тепловиділення.

У спрощеному варіанті, якщо не враховувати реакцій в димогазовій зоні за участі диспергованих частинок k -фази, для моделювання горіння деревини можна розглянути такі два випадки. Нехай у k -фазі відбуваються реакції із сумарним нульовим тепловим ефектом чи ендотермічні. Вочевидь, при цьому не може існувати режим із провідною стадією в k -фазі, можливі лише режими управління з боку газової фази, коли процес ведуть газофазні реакції за температури полум'я T_2 , і злиття, коли реакції в k -фазі відбуваються за температури, близької до T_2 . Тут для простоти передбачається, що реакції в газі тривають в одну стадію, хоча, як видно з

вищевикладеного, цей підхід легко узагальнюється на довільну кількість компонентів.

У другому випадку у k -фазі відбуваються хімічні перетворення. Тоді до вказаних вище режимів додається режим відриву, коли реакції у газі мають лімітований у часі індукційний період. Однак маємо вказати, що в обох випадках режим злиття малоімовірний.

Слід також зазначити, що існуючі теоретичні побудови у більшості випадків базуються на уявленні про вузькі зони хімічних перетворень, в той час як під час горіння деревини можуть реалізовуватись і широкі зони, для яких теоретичний аналіз стадійності в повному обсязі не проводився. У той же час із практичної точки зору важливо навчитись і, в даному випадку, виділяти основні стадії горіння, оскільки це дає ключ до керування усім процесом.

Висновки.

1. Проведений аналіз показав, що питанням виділення основних стадій під час горіння деревини не приділялось достатньо уваги. При цьому не завжди послідовно проводився кількісний аналіз закономірностей горіння, досліджувались лише якісні характеристики процесу: залежність швидкості горіння від p , T_0 . Як результат, виникають ситуації, коли для деревини різні автори трактують механізм горіння з діаметрально протилежних позицій.

2. Резюмуючи, можна вказати, що в теоретичному плані виділення основних стадій в моделюванні горіння деревини значно менше розроблене, аніж у випадку горіння газових систем. Особливо складно це зробити для опису горіння деревини, на поверхні якої відбувається взаємодія мас (і тепла) під час вигорання окремих компонентів, причому розмір поверхні фронту на одиницю перерізу зразка також може змінюватись у часі. Тому визначенням основної стадії в процесі горіння деревини слід користуватись в основному для якісного аналізу процесу, а кількісні моделі горіння деревини слід будувати по можливості з урахуванням усіх

визначальних факторів, що характеризують явища.

3. На основі аналітичних досліджень можна зробити висновок, що критерії, які характеризують вогнестійкість дерев'яних конструкцій, повинні бути переглянуті і доповнені. Основний критерій для усіх носійних конструкцій – це втрата носійної здатності. Для дерев'яних конструкцій втрату носійної здатності визначають по швидкості горіння.

4. Враховуючи, що в процесі горіння постійно існує конденсована фаза, з певною товщиною обугленого шару, для визначення вогнестійкості необхідно визначити швидкість фронту горіння вглиб деревини з урахуванням повного згорання та обуглення деревини. В обугленій деревині відбувається багато процесів – від прогріву-газифікації до її деструкції, в результаті чого цей обуглений шар втрачає здатність нести будь-які навантаження.

5. Для таких носійних конструкцій як колони, балки, стропила, арки та ін. прогорання, в окремо взятій точці, углуб конструкції спричинює зменшення перерізу до критичного значення. Критично малий

переріз не в змозі витримувати нормативні навантаження і за досягнення межі міцності конструкція руйнується.

Оскільки обчислення швидкості горіння викликає певні труднощі, коли потрібно враховувати велику кількість факторів та умов, з практичної точки зору доцільно прийняти як показник ступеня вогнестійкості зміну перерізу «свіжої» деревини, тобто такої деревини, що міститься за k -фазою.

Другий показник оцінки вогнестійкості огорожувальних конструкцій – це їх прогрівання до температури 140°C і більше на стороні, що не обігривається. Для дерев'яних огорожувальних конструкцій з урахуванням конденсованої фази (обугленого шару), у якій змінені теплопровідні властивості, оцінка по прогріву на необігритій стороні і за втратою маси зразків після випробувань може спричинити значні помилки.

Тому вогнестійкість слід оцінювати за визначенням сумарної втрати мас зразків з урахуванням маси, що згоріла або обуглилась.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. Pp. 706–714.
2. Burgoyne J. A., Neale R. F. Some new Measurements Inflammability Ratios in Air. *Fuel*. 1953. Vol. 32. Pp. 18–26.
3. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles recis. Livraison № 36 du G.S.T.B. cahier. № 292. Pp. 120–128.
4. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980. 537 p.
5. Forney G. P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards. P. 234.
6. Трошкин С. Э., Сидней С. А., Тищенко Е. А., Некора О. В. Исследование адекватности результатов математического моделирования динамики пожара в помещении с помощью программного комплекса FDS. *Пожарная безопасность : теория и практика*. 2015. № 20. С. 104–109.
7. Ковалишин В. В. Перевірка на адекватність моделювання процесів розвитку і гасіння пожеж в кабельних тунелях (в обмежених об'ємах). *Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки*. 2013. № 1 (27). С. 38–44.
8. Трошкин С. Е., Поздеев С. В., Некора О. В., Беліков А. С. Визначення адекватності математичних моделей тепломасообміну під час виникнення пожеж у вертикальних кабельних тунелях атомних електричних станцій. *Науковий вісник : Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 2 (16). С. 153–161. URL: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161>.
9. Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздеев С. В. та ін. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій : монографія. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. 120 с.
10. Капцов І. І. та ін. Статистичні методи. Аналіз та оформлення наукових досліджень : методичні вказівки до науково-дослідницької практики з дисципліни «Організація наукових досліджень». Харків : ХНАМГ, 2009. 59 с.

REFERENCES

1. Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 94, pp. 706–714.
2. Burgoyne J.A. and Neale R.F. Some new Measurements Inflammability Ratios in Air. *Fuel*. 1953, vol. 32, pp. 18–26.
3. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles réels. Livraison no. 36 du G.S.T.B. cahier. No. 292, pp. 120–128.
4. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980, 537 p.
5. Forney G.P. User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. National Institute of Standards. P. 234.
6. Troshkyn S.E., Sydnei S.A., Tyshchenko E.A. and Nekora O.V. *Yssledovanye adekvatnosti rezultatov matematycheskoho modelyrovanyia dynamyky pozhara v pomeshcheny s pomoshchiu prohrammnoho kompleksa FDS* [Adequacy of the results of mathematical modeling of indoor fire dynamics using the FDS software complex]. *Pozharnaia bezopasnost: teoriya y praktyka* [Fire safety: theory and practice]. 2015, no. 20, pp. 104–109. (in Ukrainian).
7. Kovalyshyn V.V. *Perevirka na adekvatnist modeliuвання protsesiv rozvytku i hasinnia pozhezh v kabelnykh tuneliakh (v obmezhenykh ob'iemakh)* [Checking the adequacy of modeling the development and extinguishing of fires in cable tunnels (in limited volumes)]. *Naukovyi visnyk Ukrainського naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky* [Scientific Bulletin of the Ukrainian Research Institute of Fire Safety]. 2013, no. 1 (27), pp. 38–44. (in Ukrainian).
8. Troshkyn S.E., Pozdneev S.V., Nekora O.V. and Belikov A.S. *Viznachennya adekvatnosti matematichnih modeley teplomasoobmynu pid chas viniknennya pozhezh u vertikalnih kabelnih tunelyah atomnih elektrichnih stantsiy* [Determining the adequacy of mathematical models of heat and mass transfer during fires in vertical cable tunnels of nuclear power plants]. *Naukovyi visnyk : chyvilniy zachyst I pozhezhna bazpeka* [Scientific Bulletin : Civil Defense and Fire Safety]. 2023, no. 2 (16), pp. 153–161. URL: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.153-161> (in Ukrainian).
9. Nuianzin O.M., Nekora O.V., Pozdieiev S.V. and oth. *Metody matematychnoho modeliuвання teplovykh protsesiv pry vyprobuvanniakh na vohnestiikist zalizobetonnykh budivelnykh konstruksii: monohrafiia* [Methods of mathematical modeling of thermal processes during fire resistance tests of reinforced concrete building structures: monograph]. Cherkasy : CHIPB im. Heroiv Chornobylia NUTsZ Ukrainy, 2019, 120 p. (in Ukrainian).
10. Kaptsov I.I. and oth. *Statystychni metody. Analiz ta oformlennia naukovykh doslidzhen : metodychni vkazivky do naukovo-doslidnytskoi praktyky z dystsypliny "Orhanizatsiia naukovykh doslidzhen"* [Statistical methods. Analysis and design of scientific research : methodological guidelines for scientific research practice in the discipline "Organization of scientific research"]. Kharkiv: KhNAMH Publ., 2009, 59 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.05.2024.