

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.06>

О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4509-2896> – О. І. Лавренюк

<https://orcid.org/0000-0002-5583-9992> – Б. М. Михалічко

✉ Olaw@ukr.net

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ГОРЮЧОСТІ ЕПОКСІАМІННИХ КОМПОЗИЦІЙ

Вступ. Найпоширенішим і найефективнішим методом зниження горючості полімерних матеріалів є використання антипіренів. Сьогодні особливо популярними є хімічно активні антипірени, тоді як застосування інертних антипіренів поступово скорочується. Реакційноздатні антипірени містять функціональні групи, тому можуть взаємодіяти з мономерами під час синтезу полімерів або з макромолекулами вже сформованих полімерів. Завдяки цьому їх можна використовувати не лише як мономери під час створення полімерів, але й як модифікатори або зшиваючі агенти. Пошук нових антипіренів і розроблення нових рецептур полімерних матеріалів зі зниженою горючістю зазвичай здійснюються емпірично, базуючись лише на залежності властивостей матеріалу від його складу. Особливості впливу антипірену на будову отриманих матеріалів майже не враховуються.

Мета. Термохімічне моделювання горючості епоксіамінних композицій на підставі їх будови та перевірка адекватності запропонованої моделі шляхом експериментальних досліджень.

Методи. Купрум(II)-амінний комплекс та епоксіамінні композиції отримували прямою взаємодією відповідних компонентів. Математичне моделювання антипіренового впливу купрум(II)-амінного комплексу на горючість модифікованої епоксіамінної композиції проводили на основі значень енергій хімічних зв'язків, які виникають у комплексі. Горючість композицій оцінювали за теплою згоряння (Q_{32} , кДж/кг), яку обчислювали за законом Гесса. Горючість епоксіамінних композицій визначали експериментально за ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3).

Результати. Згенеровано кластерні фрагменти немодифікованої епоксіамінної композиції (ЕД/*пера*) та композиції з вмістом запропонованого антипірена-затвердника (ЕД/{ $[\text{Cu}(\text{deta})\text{H}_2\text{O}]\text{SO}_4$ })₂, що дало змогу змоделювати термохімічну поведінку композицій під час горіння. Проведено термохімічні обчислення реакції горіння епоксіамінних композицій. Виявлено, що значення ентальпії утворення модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижче. Таку закономірність можна пояснити протіканням процесів комплексоутворення між сіллю купруму(II) та *пера* в процесі структурування модифікованої епоксіамінної композиції. Завдяки появі додаткових координаційних зв'язків Cu(II)—N виділяється енергія. Це відображається у горючості епоксіамінних композицій, що було доведено шляхом обчислення теплоти згоряння епоксіамінних композицій та експериментального визначення їх горючості.

Висновки. На підставі будови епоксіамінних композицій проведено математичне моделювання їх показників горючості. Завдяки здійсненим обчисленням було встановлено причину антипіренової дії купрум(II)-амінного комплексу, сутність якої полягає в утворенні додаткових хімічних зв'язків Cu—N, відповідальних за зниження горючості модифікованих епоксіамінних композицій. Результати математичного моделювання корелюють з результатами проведених експериментальних досліджень, а саме під час введення в епоксіамінну композицію хелатного купрум(II)-амінного комплексу покращуються всі показники, за якими оцінюють горючість.

Ключові слова: квантово-хімічне моделювання, енергія хімічних зв'язків, епоксіамінні композиції, купрум(II)-амінні комплекси, антипірени, горючість.

EXPERIMENTAL STUDY AND MATHEMATICAL MODELING OF COMBUSTIBILITY INDICATORS OF EPOXY-AMINE COMPOSITES

Introduction. The most common and effective method of reducing the combustibility of polymeric materials is the use of flame retardants. Today, chemically active flame retardants are particularly popular, while the use of inert flame retardants is gradually decreasing. Reactive flame retardants contain functional groups, so they can interact with monomers during polymer synthesis or with macromolecules of already formed polymers. Consequently, they find application not only as monomers in the synthesis of polymers but also as modifiers or crosslinking agents. The development of novel flame retardants and the creation of new formulations of polymeric materials with reduced combustibility are typically conducted empirically, based solely on the dependence of material properties on its composite. The specific characteristics of the flame retardant's influence on the structure of the resulting materials are seldom considered.

Purpose. To carry out thermochemical modeling of the combustibility of epoxy-amine composites based on their structure and to verify the adequacy of the proposed model by means of experimental studies.

Methods. The copper(II)-amine complex and epoxy-amine composites were obtained by direct interaction of the corresponding components. The mathematical modeling of the flame retardant effect of the copper(II)-amine complex on the combustibility of the modified epoxy-amine composite was performed on the basis of the energy values of chemical bonds that occur in the complex. The combustibility of the compositions was evaluated by the heat of combustion (Q_{comb} , kJ/kg), which was calculated according to Hess's law. The combustibility of the epoxy-amine composites was determined experimentally according to DSTU 8829:2019 (Section 7.3).

Results. In this study, cluster fragments of an unmodified epoxy-amine composite (ED/*pepa*) and a composite containing the proposed flame retardant (ED/{[Cu(*deta*)H₂O]SO₄}₂) were generated. This allowed for the modeling of the thermochemical behavior of the composites during combustion. The thermochemical calculations of the combustion reaction of epoxy-amine composites were carried out. The enthalpy of formation of the modified epoxy-amine composite was found to be significantly lower than that of the unmodified one. This regularity can be explained by the processes of complexation between copper(II) salt and *pepa* in the process of structuring the modified epoxy amine composite. The appearance of additional Cu(II)—N coordination bonds results in the release of energy. This phenomenon is evident in the combustibility of epoxy-amine composites, as substantiated by the calculation of their heat of combustion and subsequent experimental validation of their combustibility.

Conclusions. A mathematical model was developed to predict the indicators combustibility of epoxy-amine composites. The model, which was based on the structure of the epoxy-amine composites, revealed the mechanism by which the copper(II)-amine complex enhances flame retardancy. Specifically, the model indicated that the formation of additional Cu—N chemical bonds is responsible for the reduction in combustibility of the modified epoxy-amine composites. The developed mathematical model was found to be in agreement with the results of experimental studies. Specifically, the incorporation of a copper(II)-amine complex into the epoxy-amine composition has been demonstrated to enhance all the parameters that are typically utilized to assess combustibility.

Key words: mathematical modeling, chemical bonds energy, epoxy-amine composites, copper(II)-amine complexes, flame retardants, combustibility.

Постановка проблеми. Горючість полімерних матеріалів є однією з основних кваліфікаційних характеристик, за якою оцінюють їх пожежовибухонебезпечність. Це не випадково, адже горючість вказує на схильність полімерів до займання, підтримання та поширення горіння. Як правило, горіння полімерних матеріалів виникає внаслідок займання легких продуктів термічної деструкції. Проте якщо кількість виділених газоподібних продуктів менша за нижню концентраційну межу поширення полум'я, то горіння може розпочатися внаслідок гетерогенної реакції на поверхні розділу фаз.

На схильність до займання та горіння полімерів впливає низка факторів, найважливішими з яких є їхній склад та будова макромолекул. Так, полімери аліфатичної будови, полімери з ароматичними замісниками є легкозаймистими матеріалами, тоді як полімерні матеріали, які містять у своїй структурі атоми галогенів, навпаки, є важкозаймистими. Полімери з ароматичними групами в основному ланцюзі є менш горючими, ніж полімери з ароматичними групами в бічних ланцюгах [1]. Горючість полімерів залежить також від інтенсивності теплового потоку, який діє на

поверхні полімерного матеріалу, швидкості дифузії кисню в зону горіння, тиску, рівня вологості та хімічного складу середовища.

Знизити горючість полімерних матеріалів здебільшого можна завдяки керованому впливу на процеси тепло- і масообміну, які протікають у конденсованій і газовій фазах [2]. Зокрема, внаслідок ендотермічного розкладання полімеру чи виділення летких продуктів розкладання відбувається охолодження полімерного матеріалу, що призводить до зменшення інтенсивності його деструкції. Виділення негорючих газів внаслідок цих перетворень призводить до охолодження полум'я та до зменшення концентрації кисню в зоні горіння. За зниження інтенсивності теплового потоку від полум'я до поверхні полімерного матеріалу завдяки створенню захисних шарів зменшується швидкість газифікації полімеру, змінюється співвідношення горючих і негорючих продуктів розкладання матеріалу на користь останніх.

Отже, під час розроблення полімерних матеріалів зі зниженою горючістю можна виділити такі основні підходи: керований синтез важкогорючих полімерів, хімічна модифікація, нанесення вогнезахисних покриттів, додавання наповнювачів і використання антипіренів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найефективніших і перспективних методів зниження горючості полімерних матеріалів є синтез важкогорючих полімерів з мінімальним вмістом органічної складової частини, яка слугує джерелом горючих газів. Важкогорючі епоксиполімери можна отримати шляхом синтезу високомолекулярних сполук з ароматичною та гетероциклічною структурою, розкладання яких супроводжується утворенням значної кількості карбонізованого залишку. Іншим напрямом є створення полімерів, які повністю розкладаються з виділенням лише негорючих газів. Однак такі матеріали мають значно вищу вартість порівняно з традиційними, що стримує їх широке виробництво [3].

Модифікація полімерів для зниження їхньої горючості передбачає контрольовану зміну структури макромолекул під дією хімічних або фізичних агентів. Вона може здійснюватися як на етапі синтезу та переробки полімеру у виробі, так і після отримання готового матеріалу. Для ефективного зменшення горючості епоксиполімерів модифікація має призводити до зміцнення міжатомних зв'язків, зокрема завдяки утворенню ароматичних фрагментів зі спряженими подвійними чи потрійними зв'язками або різних гетероциклів [4].

Горючість полімерних матеріалів можна знизити також завдяки використанню вогнезахисних

покриттів. Відомо про застосування покриттів, горючість яких є значно нижчою за горючість матеріалу, на який наноситься покриття, а також з тепловідбиваючими та теплоізолюючими властивостями. Проте найефективнішими є інтумесцентні вогнезахисні покриття, які під час нагрівання утворюють карбонізований піноподібний шар, що забезпечує захист полімерного матеріалу від теплового впливу [5].

Під час застосування наповнювачів для зниження горючості полімерів кількість і склад продуктів деструкції в газовій фазі та вихід карбонізованого залишку в умовах горіння практично не змінюються [6]. Введення наповнювачів в полімер призводить до зниження вмісту горючої складової частини, що позначається на зміні його теплофізичних характеристик та умов тепло- і масообміну під час горіння. Такий спосіб зниження горючості полімерів є економічно вигідним, адже наповнювачі покращують ще й фізико-механічні властивості полімерних матеріалів, знижують витрату цінної, а іноді й дефіцитної сировини.

Найпоширенішим і найефективнішим методом зниження горючості полімерних матеріалів є використання антипіренів [7]. Вони можуть діяти у газовій фазі, інгібуючи екзотермічну реакцію окиснення шляхом дезактивації вільних радикалів, що зменшує зворотний потік енергії на поверхню полімеру. Крім того, антипірени сприяють утворенню теплового бар'єру на поверхні конденсованої фази, що запобігає виділенню горючих газоподібних продуктів. Їх застосування також підвищує вихід карбонізованого залишку, що зменшує утворення горючих газів.

Сьогодні особливо популярними є хімічно активні антипірени, тоді як застосування інертних антипіренів поступово скорочується. Це зумовлено низкою недоліків, характерних для антипіренів адитивного типу. Вони лише механічно змішуються з полімером, що погіршує його фізико-механічні та фізико-хімічні властивості, мають схильність до міграції на поверхню матеріалу та можуть вимиватися водою, мийними засобами чи жирами. На відміну від них, реакційноздатні антипірени містять функціональні групи, тому можуть взаємодіяти з мономерами під час синтезу полімерів або з макромолекулами вже сформованих полімерів. Завдяки цьому їх можна використовувати не лише як мономери під час створення полімерів, але й як модифікатори або зшиваючі агенти.

Проте варто зауважити, що пошук нових антипіренів і розроблення нових рецептур полімерних матеріалів зі зниженою горючістю зазвичай здійснюються емпірично, базуючись лише

на залежності властивостей матеріалу від його складу. А особливості впливу антипірену на будову отриманих матеріалів майже не враховуються.

Мета роботи – термoxiмiчне моделювання горючості епоксіамінних композицій на підставі їх будови та перевірка адекватності запропонованої моделі шляхом експериментальних досліджень.

Експериментальна частина. Досліджували епоксіамінну композицію, яка містила як антипірен-затвердник хелатний купрум(II)-амінний комплекс – аква-(діетилентриаміну)-купрум(II) сульфат $[Cu(deta)H_2O]SO_4$. Методика отримання епоксіамінної композиції детально описана в роботах [8; 9]. Задля виявлення перспективності застосування запропонованого антипірена-затвердника для зниження горючості епоксиполімерів досліджували також немодифіковану епоксіамінну композицію, яку отримували на основі епоксидіанового олігомера ЕД-20 та амінного затвердника поліетиленполіаміну (*пера*) [10].

Математичне моделювання електронної структури молекулярних, кристалічних та нанокластерних систем проводили за допомогою квантово-хімічних обчислень [11]. Спочатку будували структурні кластери [12] та переводили їх у зручний для використання в програмі “HyperChem” формат. Для побудованих кластерів здійснювали квантово-хімічні обчислення енергетичних, геометричних і електронних параметрів. Електронну структуру кластерних фрагментів обчислювали напівемпіричними методами розв’язку хвильового рівняння Шредінгера:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m_e} \sum_{i=1}^m \nabla_i^2 + U \right) \psi_i = \hat{A} \psi_i, \quad (1)$$

де \hbar – стала Планка; m_e – маса електрона; ∇_i^2 – оператор Лапласа, який дорівнює $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$; E – повна енергія системи; ψ_i – хвильова функція i -го електрона; e – елементарний електричний заряд (заряд електрона), який дорівнює $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; U – потенційна енергія системи, до складу якої входить n -на кількість атомних остовів (A_{ij}) і m -на кількість валентних електронів (e_{ij}), що перебувають один від одного на певній відстані r :

$$U = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{e^2}{r_{A_i A_j}} + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \frac{e^2}{r_{e_i e_j}} - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{e^2}{r_{A_i e_j}}. \quad (2)$$

Для розв’язку рівняння (1) застосовували напівемпіричний метод ZINDO/1, який дає змогу з високим ступенем вірогідності розв’язувати хвильове рівняння для багатоатомних систем,

якими є кластери з розташованими певним чином атомами. Напівемпіричний метод ZINDO/1 дав змогу обчислити низку енергетичних параметрів (розподіл за енергіями молекулярних орбіталей та енергію хімічних зв’язків) у досліджуваних нанокластерах, які в подальшому були використані під час виконання термoxiмiчних обчислень.

Стандартну ентальпію утворення речовини обчислювали виходячи зі значень енергій хімічних зв’язків, отриманих квантово-хімічно:

$$\Delta H_{yms}^o = \sum_{i=1}^{i_0} \nu_i E_{A_i} - \sum_{j=1}^{j_0} \nu'_j E_{A'_j}, \quad (3)$$

де $E_{A_i}, E_{A'_j}$ – енергії хімічних зв’язків в молекулах i -ї вихідної речовини та j -го продукту реакції.

Математичне моделювання антипіренового впливу хелатного купрум(II)-амінного комплексу на горючість модифікованої епоксіамінної композиції проводили на основі значень енергій хімічних зв’язків, які виникають у комплексі. Горючість композицій оцінювали за теплою згоряння (Q_{32} , кДж/кг), яку обчислювали за законом Гесса, на підставі визначених квантово-хімічно значень енергій хімічних зв’язків.

Для підтвердження чи спростування запропонованої моделі експериментально визначали горючість епоксіамінних композицій за максимальним приростом температури (Δt_{max}), часом досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння (τ) та втратою маси зразка внаслідок горіння (Δm) згідно з ДСТУ 8829:2019 (п. 7.3).

Виклад основного матеріалу. На першому етапі роботи було згенеровано кластерні фрагменти немодифікованої епоксіамінної композиції (ЕД/*пера*) та композиції з вмістом запропонованого антипірена-затвердника (ЕД/{ $[Cu(deta)H_2O]SO_4$ })₂), що дало змогу змоделювати термoxiмiчну поведінку композицій під час горіння. Отже, на рис. 1 та 2 наведено хімічний склад та графічні формули отриманих кластерних фрагментів епоксіамінних композицій.

Аналіз графічної формули кластера $C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)$ (рис. 1) свідчить про те, що в немодифікованій епоксіамінній композиції ЕД/*пера* відсутні додаткові хімічні зв’язки, які могли б виникнути внаслідок взаємодії антипірену із затвердником епоксидних смол. Тому під час оцінювання енергетичного впливу антипірену на горючість модифікованої епоксіамінної композиції було враховано значення сумарної енергії всіх хімічних зв’язків в немодифікованій епоксіамінній композиції.

Епоксіамінна композиція, отримана з використанням антипірена-затвердника, окрім двох зв’язків Cu(II)–O, містить шість координаційних

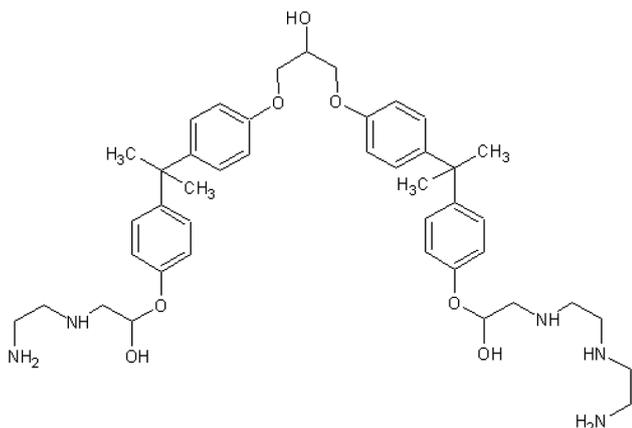


Рис. 1. Графічна формула кластера $C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)$

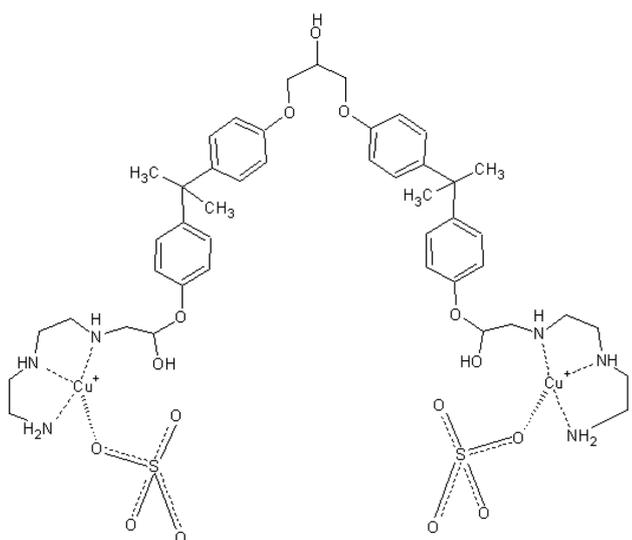
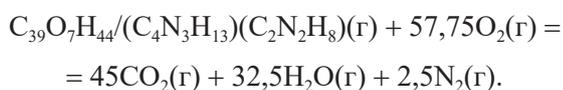


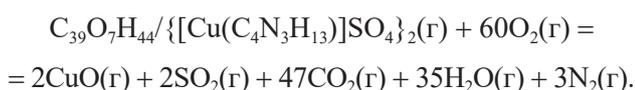
Рис. 2. Графічна формула кластера $C_{39}O_7H_{44}/\{[Cu(C_4N_3H_{13})]SO_4\}_2$

зв'язків Cu(II)–N. Поява додаткових хімічних зв'язків однозначно буде впливати на горючість модифікованої епоксіамінної композиції.

Реакція горіння немодифікованої епоксіамінної композиції ЕД/*пера*, вочевидь, протікає за таким рівнянням реакції:



Перебіг реакції горіння модифікованої епоксіамінної композиції ЕД/ $\{[Cu(deta)H_2O]SO_4\}_2$ найвірогідніше, описується рівнянням реакції:



Важливим є те, що внаслідок згоряння модифікованої епоксіамінної композиції, на відміну від немодифікованої, окрім вуглекислого газу, водяної пари та азоту, виділяються додаткові продукти згоряння, а саме газоподібний сульфур(IV) оксид, флегматизатор горіння та порошкоподібний купрум(II) оксид, який проявляє інгібувальну дію на полум'я.

В табл. 1 зведені обчислені значення енергій хімічних зв'язків кластерних фрагментів досліджуваних композицій.

Таблиця 1

Обчислені значення енергій хімічних зв'язків кластерних фрагментів досліджуваних епоксіамінних композицій

Структурний фрагмент композиції	$\sum E_{зв}$, кДж/моль
$C_{39}O_7H_{44}/(C_4N_3H_{13})(C_2N_2H_8)(г)$	50 407
$C_{39}O_7H_{44}/\{[Cu(C_4N_3H_{13})]SO_4\}_2(г)$	56 612

В табл. 2 представлені результати термохімічних обчислень реакції горіння епоксіамінних композицій. Внаслідок проведеного квантово-хімічного моделювання процесів горіння епоксіамінних композицій виявлено низку особливостей їх термохімічної поведінки. Зокрема, значення ентальпії утворення модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижче. Таку закономірність можна пояснити протіканням процесів комплексоутворення між сіллю купруму(II) та *пера* в процесі структурування модифікованої епоксіамінної композиції. Завдяки появі додаткових координаційних зв'язків Cu(II)–N виділяється енергія. Безперечно, це позначатиметься на горючості епоксіамінних композицій.

Обчислене значення теплоти згоряння немодифікованої епоксіамінної композиції значно перевищує 2 100 кДж/кг, що дає підстави віднести її до горючих матеріалів. Значення теплоти згоряння модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою суттєво нижчі. Це свідчить про високу ефективність антипіренової дії хелатного купрум(II)-амінного комплексу на зниження горючості епоксіамінних композицій.

Запропонована квантово-хімічна модель, у якій враховано вплив процесів комплексоутворення між аміним затвердником епоксидних

Таблиця 2

Результати термохімічних обчислень горіння епоксіамінних композицій

Епоксіамінна композиція	$H_{утв}^o$, кДж/моль	$H_{зг}^o$, кДж/моль	$Q_{зг}$, кДж/кг
ЕД/ <i>пера</i> (г)	–10,8	–25 441	32 327
ЕД/ $\{[Cu(deta)H_2O]SO_4\}_2(г)$	–134	–26 761	23 270

Результати визначення горючості епоксіамінних композицій

Показник властивостей композицій	Композиція	
	ЕД/репа	ЕД/{[Cu(deta)H ₂ O]SO ₄ } ₂
Початкова температура випробування, t_o , °C	200	200
Максимальна температура продуктів горіння, t_{max} , °C	867	638
Максимальний приріст температури, Δt_{max} , °C	667	438
Час досягнення максимальної температури, τ , с	150	215
Втрата маси, Δm , %	89,0	78,0

смола і антипіреном під час формування епоксіамінних композицій на зниження їх горючості, корелює з результатами проведених експериментальних досліджень. Як свідчать результати експериментального визначення показників групи горючості епоксіамінних композицій, наведені в табл. 3, для зразків немодифікованої композиції максимальний приріст температури перевищує 60 °C, а втрата маси внаслідок горіння становить понад 60 %. Час досягнення максимальної температури продуктів горіння зразків цієї композиції лежить у межах від 30 с до 240 с. Тому, відповідно до ДСТУ 8829:2019, немодифікована епоксіамінна композиція є горючим матеріалом середньої займистості.

Введення в композицію хелатного купрум(II)-амінного комплексу супроводжується покращенням усіх показників, за якими оцінюють горючість. Так, максимальний приріст температури та втрата маси під час горіння модифікованої епоксіамінної композиції порівняно з немодифікованою знижується на 229 °C та 11,0 % відповідно, а час досягнення максимальної температури газоподібних продуктів горіння, навпаки, збільшується на 65 с.

Окрім того, візуальні спостереження засвідчили різний характер поведінки епоксіамінних композицій під час займання та горіння. Немодифікована композиція під дією полум'я газового пальника легко займалася та продовжувала інтенсивно горіти після припинення дії джерела запалювання. Процес горіння супроводжувався надзвичайно інтенсивним виділенням диму та сажі і важко піддавався гасінню. Зразок композиції з антипіреном-затвердником виявився більш стійким до займання, а під час його горіння кількість диму, що виділялася, була помітно нижчою, ніж під час горіння немодифікованої композиції. Все це, безумовно, впливає на зниження горючості епоксіамінних композицій під час введення антипірена-затвердника у вигляді хелатного купрум(II)-амінного комплексу. Причиною цього є збільшення витрат теплової енергії на розрив координаційних зв'язків, що, зрештою, приводить до зниження інтенсивності газифікації полімеру

та збільшення виходу карбонізованого залишку внаслідок термоокисної деструкції полімеру.

Висновки. На підставі будови епоксіамінних композицій проведено квантово-хімічне моделювання їх горючості. Завдяки здійсненим обчисленням було встановлено причину антипіренової дії купрум(II)-амінного комплексу, сутність якої полягає в утворенні додаткових хімічних зв'язків Cu–N, відповідальних за зниження горючості модифікованих епоксіамінних композицій. Результати математичного моделювання корелюють з результатами проведених експериментальних досліджень. Так, обчислене значення теплоти згоряння композиції, модифікованої купрум(II)-амінним комплексом порівняно з немодифікованою композицією зменшується в 1,39 разів. Експериментально визначена максимальна температура газоподібних продуктів горіння композиції під час введення комплексу знижується в 1,36 разів, втрата маси зменшується в 1,14 разів, а час досягнення максимальної температури збільшується в 1,43 разів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dasari A., Yu Zh.-Zh., Cai G.-P., Mai Y.-W. Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38(9). P. 1357–1387.
2. Levchik S., Weil E. Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins – a review of the recent literature. *Polymer International*. 2004. Vol. 53. P. 1901–1929.
3. Liu Q., Wang D., Li Z., Li Z., Peng X., Liu C., Zheng P. Recent Developments in the Flame-Retardant System of Epoxy Resin. *Materials*. 2020. Vol. 13(9). P. 2145.
4. Iji M., Kiuchi Y. Self-extinguishing epoxy molding compound with no flame-retarding additives for electronic components. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2001. Vol. 12(12). P. 715–723.
5. Кіреєв О.О. Вогнезахисті властивості силікатних гелеутворюючих систем. *Науковий вісник будівництва*. 2006. Вип. 37. С. 188–192.
6. Лавренюк О.І. Застосування мінеральних наповнювачів для зниження горючості епоксиполімерів. *Пожежна безпека*. 2013. № 22. С. 163–166.

7. Rakotomalala M., Wagner S., Doring M. Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications. *Materials*. 2010. Vol. 3(8). P. 4300–4327.

8. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Рентгенофазовий та ІЧ-спекроскопічний аналіз процесу структурування модифікованих епоксидних композицій за участю антипірену [Cu(діетиленітриамін)H₂O]SO₄ · H₂O. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2016. Vol. 5–6(109). С. 73–77.

9. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М. Епоксидна композиція зі зниженою горючістю. Патент на винахід № 109187 Україна: МПК C08L63/00. № а201311816; заявл. 07.10.2013; опубл. 27.07.2015, Бюл. № 14. 2 с.

10. Лавренюк О.І., Михалічко Б.М., Пастухов П.В., Петровський В.Л. Модифіковані купрум(II) сульфатом самозгасаючі епоксидні композиції: технологія отримання та горючі властивості. *Пожежна безпека*. 2014. № 25. С. 69–73.

11. HyperChem: Molecular modeling system. Hypercube, Inc., Release 8.0.6, Florida. USA. 1995–2009.

12. Diamond-Crystal and Molecular Structure Visualization Crystal Impact. Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany.

REFERENCES

1. Dasari A., Yu Zh.-Zh., Cai G.-P., Mai Y.-W. (2013) Recent developments in the fire retardancy of polymeric materials. *Progress in Polymer Science*. Vol. 38(9). P. 1357–1387.

2. Levchik S., Weil E. (2004) Thermal decomposition, combustion and flame-retardancy of epoxy resins – a review of the recent literature. *Polymer International*. Vol. 53. P. 1901–1929.

3. Liu Q., Wang D., Li Z., Li Z., Peng X., Liu C., Zheng P. (2020) Recent Developments in the Flame-Retardant System of Epoxy Resin. *Materials*. Vol. 13(9). P. 2145.

4. Iji M., Kiuchi Y. (2001) Self-extinguishing epoxy molding compound with no flame-retarding

additives for electronic components. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 12(12). P. 715–723.

5. Kireev O.O. (2006) Vohnezakhysti vlastyvoli sylikatnykh helevtoriuiuchykh system. [Fire-retardant properties of silicate gel-forming systems]. *Scientific Bulletin of Construction*. Issue 37. P. 188–192.

6. Lavrenyuk O.I. (2013) [Application of mineral fillers to reduce the flammability of epoxy polymers]. *Fire Safety*. Vol. 22. P. 163–166.

7. Rakotomalala M., Wagner S., Doring M. (2010) Recent Developments in Halogen Free Flame Retardants for Epoxy Resins for Electrical and Electronic Applications. *Materials*. Vol. 3(8). P. 4300–4327.

8. Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M. (2016) Renthenofazovyi ta ICh-spekroskopichnyi analiz protsesu strukturuvannya modyfikovanykh epoksyaminnykh kompozytsii za uchastiu antypirenu [X-ray phase and IR spectroscopic analysis of the process of structuring modified epoxyamine compositions with the participation of the flame retardant] [Cu(diethylenetriamine)H₂O]SO₄ · H₂O. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. Vol. 5–6(109). P. 73–77.

9. Lavrenyuk H., Mykhalichko B. (2015) Epoksyidna kompozytsiia zi znyzhenoiu horiuchistiu. [Epoxy composite with lowered combustibility]. Patent No. 109187 UA.

10. Lavrenyuk O.I., Mykhalichko B.M., Pastukhov P.V., Petrovsky V.L. (2014). Petrovskyi V.L. Modyfikovani kuprum(II) sulfatom samozghasaiuchi epoksyaminni kompozytsii: tekhnolohiia otrymannia ta horiuchi vlastyvoli [Copper(II) sulfate-modified self-extinguishing epoxyamine compositions: production technology and combustible properties]. *Fire Safety*. Vol. 25. P. 69–73.

11. HyperChem: Molecular modeling system. Hypercube, Inc., Release 8.0.6, Florida. USA. 1995–2009.

12. Diamond-Crystal and Molecular Structure Visualization Crystal Impact. Dr. H. Putz & Dr. K. Brandenburg GbR, Kreuzherrenstr. 102, 53227 Bonn, Germany.

© О. І. Лавренюк, Б. М. Михалічко

Науково-методична стаття

Надійшла до редакції 06.03.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025