

УДК 624.012

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.26.874

## ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

БЄЛІКОВ А. С.<sup>1</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ШАЛОМОВ В. А.<sup>2\*</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ШИБА О. В.<sup>3</sup>, *суд. експерт*,  
МАХІНЬКО А. О.<sup>4</sup>, *студ.*

<sup>1</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>3</sup> Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, вул. Січеславська Набережна, 17, оф. 801, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 726-54-00, e-mail: [lesiya\\_shiba@ukr.net](mailto:lesiya_shiba@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4269-8887

<sup>4</sup> Навчально-науковий інститут інноваційних освітніх технологій, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 644-02-11, e-mail: [anyamakhinko88@gmail.com](mailto:anyamakhinko88@gmail.com)

**Анотація. Постановка проблеми.** Аналіз пожежної небезпеки показує, що відчутного матеріального збитку економіці в усьому світі завдають пожежі, значно ускладнюючи екологічну обстановку, наражаючи на небезпеку життя людей. Так, в Україні щороку виникає понад 50 тис. пожеж, у яких гинуть люди, а матеріальні збитки перевищують сотні мільйонів гривень, побічні збитки у 20 разів більші. Значною мірою така тривожна статистика зумовлена збільшеною пожежною небезпекою будівель та споруд, що зводяться та експлуатуються, за рахунок зміни технології виробництва, підвищення поверховості та щільності забудови, зміни традиційних та матеріаломістких технологій зведення будівель за новими прогресивними технологіями з ефективними будівельними матеріалами з дерева, пластмас, полімерів, металу тощо. Багато із цих матеріалів високочутливі до впливу високих температур та вогню. Так, дерев'яні та пластмасові будівельні матеріали та конструкції за дії високих температур здатні горіти, виділяючи значну кількість тепла та токсичних речовин. Металеві конструкції за вогневого впливу швидко прогриваються до критичних температур, що спричинює втрату їх несної здатності. **Мета статті** – дослідження закономірностей за високотемпературного прогріву дерева та металу, під час горіння та розкладання деревини. **Висновок.** Вогнезахист будівельних конструкцій – необхідна частина профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення пожежної безпеки та вогнестійкості будівель та споруд. Основне завдання вогнезахисту конструкцій – зниження горючості матеріалів та теплопередачі до них.

**Ключові слова:** горіння; високотемпературний вплив; полум'я; будівельні конструкції; горючість; пожежна небезпека

## THEORETICAL ANALYSIS OF THE COMBUSTION PROCESS

BELIKOV A.S.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
SHALOMOV V.A.<sup>2\*</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
SHYBA O.V.<sup>3</sup>, *Forensic Expert*,  
MAKHINKO A.O.<sup>4</sup>, *Stud.*

<sup>1</sup> Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: [bgd@mail.pgasa.dp.ua](mailto:bgd@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

<sup>2\*</sup> Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: [shalomov1709@gmail.com](mailto:shalomov1709@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6890-932X

<sup>3</sup> Dnipropetrovsk Scientific Research Institute of Forensic Sciences, 17, Sicheslavskaya Embankment Str., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 726-54-00, e-mail: [lesiya\\_shiba@ukr.net](mailto:lesiya_shiba@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-4269-8887

<sup>4</sup> Educational and Scientific Institute of Innovative Educational Technologies, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (066) 644-02-11, e-mail: [anyamakhinko88@gmail.com](mailto:anyamakhinko88@gmail.com)

**Abstract. Problem statement.** The analysis of fire hazard shows that fires cause significant material damage to the economy around the world, significantly complicating the environmental situation, endangering human life. Thus, in Ukraine there are more than 50 thousand fires every year, in which people die, and material damage exceeds hundreds of millions of hryvnias, incidental losses are 20 times greater. This alarming statistics is largely due to the increased fire

hazard of buildings and structures erected and operated by changing production technology, increasing the number of storeys and building density, changing traditional and material-intensive technologies of building new advanced technologies with effective building materials from wood, plastics and polymers, metal, etc. Many of these materials are highly sensitive to high temperatures and fire. Thus, wooden and plastic building materials and structures under the action of high temperatures can burn, releasing significant amounts of heat and toxic substances. Metal structures under fire are rapidly heated to critical temperatures, which leads to a loss of their load-bearing capacity. *The purpose of the article.* Research of regularities at high-temperature heating of wood and metal, at burning and decomposition of wood. *Conclusions.* Fire protection of building structures is a necessary part of preventive measures aimed at ensuring fire safety and fire resistance of buildings and structures. The main task of structures' fire protection is to reduce the flammability of materials and reduce heat transfer to them.

**Keywords:** *combustion; high temperature exposure; flame; building structures; flammability; fire hazard*

**Постановка проблеми.** Пожежі належать до основних лих людства, завдаючи значної матеріальної шкоди народному господарству [2; 5]. Виникаючи найчастіше через неправильні дії людини, вони перетворюються на безперервний нерегульований стихійний процес, спричинюючи крім матеріальних, моральних та екологічних збитків, травматизм людей та навіть їх загибель. Щорічна матеріальна шкода від пожеж у розвинених країнах світу становить два і більше відсотків національного доходу. Особливо зростає пожежна небезпека у зв'язку з інтенсифікацією промислового виробництва, зведенням об'єктів підвищеної поверховості та підвищеної вибухо-небезпечності.

Відповідно до статистичних даних [1], за останнє десятиліття в нашій країні та за кордоном кількість пожеж зі значними матеріальними втратами та людськими жертвами зростає. Так, щороку в Україні виникає близько 50 000 пожеж, у яких гине понад 2 500 осіб та близько 2 000 зазнають травм.

**Аналіз публікацій.** Для забезпечення пожежної безпеки будівель та споруд необхідне комплексне оцінення джерел пожежної небезпеки з урахуванням технології виробництва, конструктивних рішень, при цьому особливу увагу слід приділити вогнестійкості будівельних конструкцій та горючості матеріалів, що застосовуються.

**Мета статті.** Враховуючи широке застосування у будівництві конструкцій з дерева, металу, бетону, залізобетону, пластмас, азбестоцементу та інших сучасних будівельних матеріалів, необхідне

проведення досліджень їх пожежно-технічних властивостей та заходів їх підвищення.

**Результати досліджень.** На основі проведеного аналізу визначено, що особливо зростає пожежна небезпека об'єктів у разі застосування в будівництві пожежонебезпечних будівельних матеріалів, які самі сприяють розвитку горіння.

Горіння – це складний фізико-хімічний процес взаємодії горючої речовини і окиснювача з виділенням теплової енергії. Основна умова виникнення та розвитку горіння – одночасна наявність та поєднання пальної речовини та окиснювача (звичай кисню повітря) та джерела вогню (під час займання). Надалі при режимі горіння, що встановився, джерелом теплової енергії стають реакції фізико-хімічних перетворень при горінні. При цьому частина теплової енергії витрачається на процеси термічного розкладання матеріалу, частина на підтримку активізації здатних до горіння продуктів розкладання, значна частина розсіюється за рахунок нагрівання довкілля [3].

Процес горіння багато в чому залежить від стехіометричного співвідношення компонентів, теплообміну з навколишнім середовищем, швидкості утворення та розсіювання продуктів горіння та інших факторів [4]. Залежно від агрегатного стану речовин та їх стехіометричного співвідношення розрізняють горіння гомогенне та гетерогенне, ламінарне, дифузне та турбулентне.

В основному горіння усіх речовин, у тому числі твердих, перебігає у газовій фазі [2]. Надалі у разі розвитку горіння твердих матеріалів виникає перехід до горіння

конденсованої фази, тобто гетерогенного горіння. Один із різновидів такого горіння – це тління целюлозних матеріалів (деревина, бавовна тощо). Залежно від низки факторів середовища деревина та інші матеріали можуть горіти як у режимі тління, так і в режимі дифузного горіння. За недостатнього припливу кисню горіння триває як тління, а надмірна кількість кисню повітря і тепла спричинює дифузне горіння. Практика показує, що реальні пожежі, в основному, характеризуються дифузійним турбулентним горінням із недостатнім припливом кисню повітря, що викликає утворення продуктів неповного згорання та значне димовиділення [1].

М. М. Семенов та його наукова школа створили фундаментальні засади сучасних уявлень про горіння, в основу яких покладено теорії теплового та ланцюгового самоприскорення та поширення полум'я [2]. Значного розвитку набула теорія горіння у працях відомих учених: «Критерій теплового займання» Д. А. Франк-Каменецького; «Дифузійна теорія розповсюдження полум'я» Ван-Тігельмана; «Теорія розповсюдження полум'я» Я. Б. Зельдовича та інших.

У процесі горіння твердих матеріалів ще багато не з'ясовано, насамперед, через багатостадійність та складність взаємопов'язаних явищ. За домінуючої ролі процес горіння запасу енергії (ентальпії) у речовині та її виділенні важливу роль також відіграють граничні умови виникнення горіння, а найголовніше, здатність матеріалів підтримувати поширення полум'я, тобто горючість [5].

Сучасні теорії горіння розглядають горючість речовин, прийнявши низку спрощувальних припущень, і дозволяють зрозуміти можливість виникнення та поширення процесу горіння, диференціюючи та виділяючи основні його стадії: запалення, поширення полум'я, зон розкладання та фізико-хімічних перетворень з утворенням горючих продуктів тощо. Маловивченість і багатостадійність перетворень, що відбуваються, не дозволяють прийняти загально визнаний

механізм утворення і поширення полум'я, стійкого горіння матеріалів з урахуванням впливу температурних факторів середовища.

Так, критерій теплового займання Д. А. Франк-Каменецький представив з урахуванням порушення стаціонарного розподілу температур у реакційній посудині за рахунок значної швидкості тепловиділення:

$$\frac{EQr^2 Ke^{-E/RT_0}}{RT_0^2 \lambda} \geq j, \quad (1)$$

де  $r$  – характерний розмір судини;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газової суміші;  $j$  – безрозмірний критерій, що дорівнює 3,3; 0,88 та 2 (для сферичної, плоскопаралельної та циліндричної посудини).

Розроблена теорія Я. Б. Зельдовича заснована на передумовах подібності до полів температур і концентрацій у фронті полум'я та представлена системою рівнянь збереження речовини та енергії:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - U_n c_p \rho \frac{dT}{dx} + WQ = 0, \quad (2)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність;  $c_p$  – теплоємність;  $\rho$  – щільність;  $W$  – швидкість реакції (що підкоряється закону Арреніуса);  $Q$  – теплота згорання;  $x$  – відстань уздовж поширення полум'я.

Згідно з дифузною теорією Ван-Тігельмана швидкість поширення полум'я з урахуванням реакцій розгалуження може бути представлена рівнянням:

$$U_n = \frac{4T_0}{\pi} \sqrt{\frac{2R(\delta - \beta)}{3M_R T}}, \quad (3)$$

де  $M_R$  – середня молекулярна маса активних центрів;  $T$  – середня температура полум'я;  $T_0$  – початкова температура.

Розроблена авторами теорія горіння дозволила успішно перейти до моделювання процесів горіння на окремих стадіях. Запропоновані моделі дозволяють загалом оцінювати розвиток горіння, поширення полум'я, горючість матеріалів, проте

зробити це через складність визначення параметрів, що входять до моделі, практично неможливо.

З вищевикладеного можна дійти невтішного висновку, що теоретичні дані щодо пожежної небезпеки матеріалів через нестачу даних експериментальних досліджень не дозволяють наразі прогнозувати пожежонебезпеку матеріалів, тобто необхідне подальше накопичення експериментальних досліджень пожежонебезпеки речовин та вдосконалення розрахунково-теоретичної галузі прогнозу пожежонебезпеки речовин [4].

Тому створення кількісної моделі горіння різних матеріалів з урахуванням змішаного гомогенно-гетерогенного процесу тепломасопереносу характерного для розвиненої пожежі, постає одним з актуальних завдань [1].

На жаль, існуючі моделі горіння також не дозволяють аналітично прогнозувати перебіг деструктивних процесів у матеріалі за впливу високих температур та їх вплив на якісні зміни (утворення коксового шару, обвуглювання, вигорання, випаровування та википання вологи тощо).

До цього часу залишається недостатньо вивченим процес горіння і прогрівання конструкцій за наявності спеціальних заходів вогнезахисту: облицювання, екранування, нанесення покриттів, що спучуються, фарб тощо. Багатогранність впливу при цьому різних теплофізичних факторів на процеси, що відбуваються, не дозволяє отримати математичні моделі, які дозволяють визначити зміну температури прогріву конструкції під покриттям залежно від властивостей покриття, властивостей компонентів, які входять до його складу, товщини покриття, а також тривалості вогневого впливу.

Практично відсутні наразі і роботи, присвячені проблемі збереження матеріалу конструкції, що захищається під покриттям або екраном, зниження тепломасопереносу і його вплив на міцнісні характеристики матеріалу конструкції. Вирішення даної проблеми дозволило б більш об'єктивно

підходити до вибору засобів вогнезахисту та оцінювання їх ефективності.

Безсумнівно, велику пожежну небезпеку становлять матеріали, здатні до загорання у перші ж хвилини вогневого впливу, горіння яких відбувається із значним тепловиділенням, димовиділенням та наявністю токсичних речовин.

Пожежну небезпеку становлять також конструкції, виконані з вогнетривких матеріалів (сталеві, алюмінієві тощо). Через високу відбивну здатність металів, які мають малий ступінь чорноти поверхні (алюміній), на початковій стадії пожежі вони більш небезпечні, ніж дерев'яні та сталеві конструкції. У той же час метали, що володіють значною чорнотою і великою тепловою інерцією (сталь), через високу теплопровідність у часі можуть бути й самі нагріті до високих температур і здатні передати тепло, що підводиться до них, до матеріалів і конструкцій, розташованих поруч, створюючи і підтримуючи тим самим пожежонебезпеку.

Пожежна небезпека об'єктів багато в чому визначається пожежною небезпекою застосовуваних матеріалів і конструкцій, що сприяють розвитку пожежі, а вогнестійкість конструкцій – це міра опірності його прояву та негативних наслідків [1]. Межа вогнестійкості будівельних конструкцій – час, після закінчення якого конструкція втрачає свою несну або захисну здатність. Необхідна межа вогнестійкості визначається нормами та умовами безпеки.

Наразі у світовій практиці знаходять значне застосування дерев'яні та сталеві конструкції. Клеєні та цільнодерев'яні конструкції та матеріали широко використовуються в житлово-цивільному та промисловому будівництві, на підприємствах з агресивним середовищем та у сільськогосподарському будівництві. Номенклатура діючих каталогів несних та огорожувальних конструкцій складає близько 800 марок виробів, у тому числі близько 216 марок плит покриттів та понад 190 балок.

Враховуючи, що за впливу високих температур дерев'яні конструкції схильні до

активного горіння та сприяють поширенню вогню, до них пред'являються вимоги не лише щодо межі вогнестійкості, але й щодо межі поширення вогню.

Значне застосування металевих конструкцій та елементів у будівництві зумовлене зменшенням трудомісткості робіт, пов'язаних як із виготовленням, так і монтажем конструкцій, можливістю застосування багатопогонових та великогабаритних конструкцій, поліпшення конструктивних рішень та дизайну об'єктів, застосуванням типізованих конструкцій, тонкостінних та раціональних профілів тощо.

Будучи негорючими, зазначені матеріали (сталеві, алюмінієві тощо) не завжди відповідають вимогам пожежного

нормування. Через високу теплопровідність металів прогрівання конструкцій відбувається за короткі терміни до критичних температур, що викликає втрати конструкційних властивостей металу [3].

Межа вогнестійкості незахищених металевих конструкцій не висока і залежно від товщини елементів, що прогріваються, становить від 0,1 до 0,42 години.

**Висновки.** Вогнезахист будівельних конструкцій – необхідна частина профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення пожежної безпеки та вогнестійкості будівель та споруд. Основне завдання вогнезахисту конструкцій полягає у зниженні горючості матеріалів та теплопередачі до них.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беликов А. С., Шаломов В. А., Корж Е. Н., Рагимов С. Ю. Повышение огнестойкости деревянных строительных конструкций за счет снижения горючести древесины. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 38–45.
2. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння : навч. посіб. Харків : НУЦЗУ, 2020. 408 с.
3. Atkins P. W., De Paula J. Physical chemistry. 9th ed. W.H. Freeman, W. H. Freeman, 2010. 1139 p.
4. Cadorin J. F., Perez Jimenez C., Franssen J. M. Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time. Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Ulster, 2011. Pp. 547–557.
5. Liberman M. Introduction to Physics and Chemistry of Combustion : Explosion, Flame, Detonation. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 365 p.

### REFERENCES

1. Belikov A.S., Shalomov V.A., Korzh Ye.N. and Ragimov S.Yu. *Povyishenie ognestoykosti derevyannykh stroitelnykh konstruksiy za schet snizheniya goryuchesti drevesiny* [Increase of fire resistance of wooden building structures due to reduction of flammability of wood]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, no. 98, pp. 38–45. (in Russian).
2. Tarakhno O.V., Trehubov D.H., Zhernoklov K.V. and Kovrehin V.V. *Osnovni polozhennia protsesu horinnia. Vynyknennia protsesu horinnia : navch. posib.* [The main provisions of the combustion process. Occurrence of the combustion process : education manual]. Kharkiv : NUTsZU, 2020, 408 p. (in Ukrainian).
3. Atkins P.W. and De Paula J. Physical chemistry. 9th ed. W.H. Freeman, W. H. Freeman, 2010, 1139 p.
4. Cadorin J.F., Perez Jimenez C., Franssen J.M. Influence of the section and of the insulation type on the equivalent time. Proceedings of the 4th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. University of Ulster, 2011, pp. 547–557.
5. Liberman M. Introduction to Physics and Chemistry of Combustion : Explosion, Flame, Detonation. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, 365 p.

Надійшла до редакції: 13.07.2022.