

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 614.842

Yuriy Tsapko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783> **e-mail:** juriyts@ukr.net

Aleksii Tsapko, PhD, Senior Research Fellow, Department of Building Materials

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x> **e-mail:** alekseystapko@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

REDUCING THE TOXICITY LEVEL OF WOOD BURNING PRODUCTS DURING EVACUATION OF PEOPLE

Abstract. *The problem of using wood for interior decoration is to ensure resistance to high-temperature flames, so the purpose of the research was to establish the effect of fire protection of wood on reducing flammability, smoke generation and toxicity of combustion products. The establishment of fire hazard factors of wood combustion was carried out by establishing its interaction with high-temperature flames. Based on the results of field tests to determine the process of wood flammability, it was established that wood is a combustible material, impregnated wood withstood the temperature effect and is a difficult-to-burn material. The average value of the smoke generation coefficient for wood in the smoldering mode is 756.11 m²/kg and refers such wood to materials with high smoke generation capacity. Fire-retardant treatment reduces the smoke generation of wood by almost three times. As a result of tests of toxicity of combustion products, the following was established: the level of carboxyhemoglobin in the blood of laboratory animals indicates that the lethal effect is mainly due to the action of carbon monoxide. The minimum value of the HCL50 indicator, determined at a temperature of 400 °C, is for wood treated with "FIREWALL-ATTIC" – 62.5 g/m³ and for "FIREWALL-WOOD" – 73.3 g/m³, respectively, used to establish the value of the toxicity indicator of combustion products and it was established that the studied materials belong to moderately hazardous materials. This material is classified as a material with moderate smoke-forming ability, and in terms of toxicity of combustion products it is moderately hazardous. The practical significance is that the results obtained were taken into account when developing measures for evacuating people. Thus, there are grounds to assert the value of the above study, which is aimed at regulating the combustion processes of wood products. Prospects for further research will be aimed at identifying the point in time at which the fire-retardant properties of wood begin to decline under the influence of high temperature, which will allow us to investigate structural transformations in the material that lead to an increase in the toxicity of combustion products.*

Keywords: smoke formation, toxicity, fire protection of wood, intumescent coatings, flammability group.

Ю.В. Цапко, О.Ю. Цапко

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ТОКСИЧНОСТІ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ

Анотація. Проблема застосування деревини для облаштування приміщень полягає у забезпеченні стійкості до дії високотемпературного полум'я, тому метою досліджень було встановлення впливу вогнезахисту деревини на зниження горючості, димоутворення та токсичності продуктів горіння. Визначення пожежонебезпечних факторів горіння деревини проводили шляхом встановлення взаємодії її з високотемпературним полум'ям. На основі одержаних результатів натурних випробувань з визначення процесу горючості деревини встановлено, що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів. Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає $756,11 \text{ м}^3/\text{кг}$ та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворення деревини майже втричі. У результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400°C , складає для деревини, обробленої «ФАСРВОЛ-АТТІК» – $62,5 \text{ г/м}^3$, а для деревини, обробленої «ФАСРВОЛ-ВУД» – $73,3 \text{ г/м}^3$ відповідно. Це значення використане для визначення величини показника токсичності продуктів горіння та встановлено, що досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів. Даний матеріал класифікується як матеріал з помірно димоутворювальною здатністю, а за токсичністю продуктів горіння – помірно небезпечний. Практичне значення полягає в тому, що отримані результати було враховано під час розроблення заходів при евакуації людей. Таким чином, є підстави стверджувати про цінність наведеного дослідження, яке спрямоване на регулювання процесів горіння виробів з деревини. Перспективи подальших досліджень будуть направлені на виявлення моменту часу, з якого починається падіння вогнезахисних властивостей деревини під впливом високої температури, що дозволить дослідити структурні перетворення у матеріалі, які призводять до підвищення рівня токсичності продуктів горіння.

Ключові слова: димоутворення, токсичність, вогнезахист деревини, спучуючі покриття, група горючості.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.123-138>

Вступ

Деревина набула широкого застосування у будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але у зв'язку з підвищеною горючістю є пожежонебезпечним матеріалом. Підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її вогнезахисного оброблення, суть якого полягає у наданні виробам здатності протистояти дії полум'я та поширенню його поверхнею, в запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє деструкції матеріалу і прискоренню процесу горіння. Ефективним способом зниження горючості деревини є вогнезахисне оброблення.

Відомі методи забезпечення необхідної межі вогнестійкості дерев'яних будівельних конструкцій, які полягають у нанесенні полегшених матеріалів і легких заповнювачів – спученого перліту й вермикуліту, мінерального волокна. Ці матеріали володіють високими теплоізоляційними властивостями або ґрунтовані на використанні плитних і листових теплоізоляційних матеріалів. Це призводить до підвищення матеріалоємності конструкції. Для вогнезахисту будівельних конструкцій з деревини знайшли широке застосування спеціальні покриття на органічній основі, а саме, добавки до в'язучих з поліолефіну, зокрема, хлорпарафіни, які добре поєднуються з полімером, досить ефективні, однак, можуть утворювати висоли; гексахлорціклопентадієн, його димери і аддукти з бутадієном, дівінілбензолом, циклооктадієном, дивініл-бензолом або малеїновим ангідридом; броморганічні циклоаліфатичні з'єднання – гексабромціклододекан, тетрабромціклооктан та ін., які при дії високої температури характеризуються підвищеним димоутворенням та виділенням токсичних продуктів горіння.

Найпростіші вогнезахисні засоби на основі неорганічних в'язучих матеріалів містять зв'язану воду, яка під час нагрівання випаровується і блокує перенос тепла до деревини, а також використовують у своєму складі натрієве рідке скло, портландцемент, глиноземистий цемент і алюмосилікатні в'язучі. Однак, такі покриття є недовговічними та неефективними, а також не забезпечують достатньої адгезійної міцності, що призводить до втрати адгезійних властивостей і осипання під дією коливань температури та вологості. Перспективним напрямком є підвищення вогнестійкості деревини за допомогою епоксидних композицій, які модифіковано мінеральними дисперсними наповнювачами і антипіренами. Однак, такі покриття відносяться до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю і токсичністю продуктів горіння.

Таким чином, постає необхідність у проведенні робіт у напрямку розробки ефективних вогнезахисних покриттів, які характеризуються низькою димоутворювальною здатністю та токсичністю продуктів горіння.

У роботі [1] сказано, що професія пожежного передбачає вплив багатьох хімічних речовин, у тому числі багатьох відомих і ймовірних канцерогенів. Ці впливи часто відбуваються при інтенсивних рівнях впливу, незважаючи на наявність автономних дихальних апаратів (SCBA), які не можна використовувати нескінченно довго. Поглинання шкірою є важливим для багатьох хімічних небезпек. Джерелом найбільш токсичних хімічних впливів, які регулярно зустрічаються під час пожежогасіння, є, як правило, горіння, включаючи горіння лігноцелюлозних матеріалів (дерева та паперу), а головне – синтетичних полімерів, які роблять доступним хлор для галогенування багатьох продуктів горіння, утворюючи серед інших токсичних хімічних продуктів діоксини та фурані. Інші продукти горіння включають: поліциклічні ароматичні вуглеводні, деякі з яких є відомими канцерогенами; летючі органічні сполуки, включаючи бензол, потужний канцероген, і галогеновані вуглеводневі сполуки, більш звичні як розчинники, деякі з яких також є відомими або ймовірними канцерогенами; 1,3-бутадієн, канцероген; формальдегід, також канцероген; і нітроарени, деякі з яких є канцерогенами, переважно з дизельних викидів. Дрібні тверді частинки утворюються як від пожежі, так і від дизельних вихлопів. Гостра токсичність чадного газу та ціаніду добре відома. В окремих ситуаціях можна зустріти інші небезпечні

матеріали, такі як азбест і поліхлоровані біфенільні сполуки (ПХБ). Але не згадується про галогеновмісні антипірени, які є новим класом хімічної небезпеки.

Представлена в [2] стаття охоплює дослідження продуктів згоряння обраних природних і синтетичних полімерів та їх основні властивості з точки зору токсичної дії на живі організми і видимість у зоні ураження пожежею. Досліджено зразки берези звичайної (*Betula verrucosa* Ehrh.), дуба звичайного (*Quercus robur* L.), ялини звичайної (*Picea abies* (L.) Karst.), поліетилену та поліпропілену. Досліджувані матеріали порівнювали за токсичністю продуктів згоряння за виходом оксиду вуглецю та за видимістю в ураженій зоні за коефіцієнтом гасіння. Вихід оксиду вуглецю та коефіцієнт екстинкції визначали в конусному калориметрі при тепловому потоці $30 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. Отримані дані показують, що деревні матеріали (під час випробування конусним калориметром) демонструють максимальний вихід оксиду вуглецю протягом більш ніж 1000 с після ініціювання (безполум'яна форма горіння – тління). Зразки поліетилену показали максимальний вихід оксиду вуглецю у фазі виникнення полум'я. Поліпропілен продемонстрував чітко виражений локальний максимум виходу монооксиду вуглецю безпосередньо перед фазою ініціювання полум'я, а потім два чітких локальних максимуми безпосередньо перед повним спалюванням зразка. Зразки деревних матеріалів показали два локальних максимуми коефіцієнтів екстинкції. Перший локальний максимум відповідав фазі загоряння полум'я. Другий локальний максимум відповідав часу переходу до безполум'яного горіння. Коефіцієнт гасіння поліетилену, як і поліпропілену, зростав від моменту загоряння до моменту мимовільного згасання полум'я (досягав максимального значення).

Мета дослідження, наведеного в [3], полягала в тому, щоб порівняти концентрації твердих часток (РМ) і пов'язаних з РМ поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАУ) під час згоряння різних типів матеріалів (наприклад, деревини дуба, бука та сосни, поліпропілену, поліуретану, паперу, бавовни та орієнтовано-стружкових плит (OSB)), а також порівняти канцерогенний, мутагенний і токсичний потенціал викидів під час спалювання цих матеріалів. Персональні портативні пробовідбірники використовувалися для відбору проб та визначення концентрації РМ₄, загальної кількості зважених частинок (ЗЧЧ), ПАУ, пов'язаних із РМ. Зразки відбирали під час контрольованих пожеж у лабораторних умовах. Найвища концентрація ТЧ була зафіксована під час спалювання поліуретану (РМ₄-1818 мг/м^3 , ТСП-2800 мг/м^3), тоді як найвища концентрація суміші ПАУ – при спалюванні OSB (628,5 мкг/м^3 РМ₄-зв'язаний; 791,2 мкг/м^3 ТСП-зв'язаний ПАУ). Так, найвищі канцерогенні (85,5 мкг/м^3), мутагенні (68,2 мкг/м^3) та токсичні еквіваленти (26,4 нг/м^3) суміші ПАУ відзначені при спалюванні OSB. Канцерогенний потенціал (КП) групи ПАУ визначався в основному концентраціями фенантрени (КП в середньому 21,6%) і пірену (13,3%). Результати дослідження вказують на можливі несприятливі наслідки пов'язаних із твердими частинками ПАУ, що виділяються під час горіння, для пожежників та інших людей, які перебувають поблизу осередка пожежі.

У роботі [4] сказано, що амонію поліфосфат (APP) вважається ефективним вогнезахисним засобом для дерев'яних матеріалів, але під час згоряння дерев'яних композитів, оброблених APP, виділяються дим і токсичні гази, що створює серйозну загрозу для життя людини на практиці. У цьому дослідженні

ієрархічно пористий модифікований цеоліт 4A APP (H4A-APP) був синтезований шляхом попередньої обробки цеоліту H4A фосфорною кислотою (PA) з подальшою конденсацією на місці з сечовиною. Було виготовлено деревний композит, оброблений H4A-APP, для якого досліджено займистість і вогнетоксичність. Термогравіметричний аналіз (TGA) показав, що швидкість розкладання H4A-APP прискорюється при низькій температурі, а термічна стабільність залишку значно підвищується при високій температурі. Порівняно з деревним композитом, обробленим APP, деревні композити, оброблені H4A-APP, показали на 17,2% нижчий індекс зростання пожежі на ранній стадії (FGI1). Пікова швидкість утворення диму (SPRP) і швидкість утворення CO за 250 с (COPR250s) зразків, оброблених H4A-APP, зменшилися на 35,2% і 38,4% відповідно. Були проведені подальші дослідження мікроструктури та хімічного складу залишків вугілля, які показали, що окрім каталітичного ефекту цеоліту H4A, когерентна поверхня та пориста структура залишків вугілля зі зшиваючими структурами, такими як Si-O-P/C-Si, відіграють важливу роль у зниженні пожежної токсичності.

Робота, яка наведена у [5], мала на меті закрити прогалину в знаннях щодо викидів під час піролізу, тління та згоряння комерційних ізоляційних матеріалів з деревини, целюлози, лугової трави, конопель, джуту, пробки та морських водоростей, а також полістиролу для порівняння. Були проведені лабораторні експерименти та вимірювання продуктів термічного розкладання за допомогою газової хроматографії в поєднанні з мас-спектрометрією (ГХ/МС). Було зрозуміло, що майже всі продукти можна віднести до наступних восьми класів речовин: вуглеводи, альдегіди/кетони, вугільні кислоти/складні ефіри, заміщені феноли, фурани, аліфатичні вуглеводні, заміщені бензоли та поліциклічні ароматичні вуглеводні. Було створено спектри речовин, які показали певні відповідності, особливо між ізоляційними матеріалами, виготовленими з деревини, целюлози та лугових трав, а також конопелі та джуту. Порівняння суми площ піків на ГХ/МС-хроматограмах дало вказівки відносного ступеня викидів продуктів термічного розкладання. Розрахунки відповідно до $(\sum \text{пікові площі відновлюваного матеріалу})/(\sum \text{пікові площі полістиролу})$ показали коефіцієнти від 0,18 (дерево, пробка) до 0,028 (лугові трави). У теплових викидах часто вимірювали визначені небезпечні речовини або групи речовин. Вони були включені до оцінювання токсичності, за допомогою якої, серед іншого, можна було продемонструвати переваги натуральних продуктів порівняно з полістиролом.

У роботі [6] було розроблено різноманітні протоколи та методи випробувань для перевірки токсичності продуктів згоряння будівельних та меблевих матеріалів. Щоб сприяти порівнянню результатів таких тестів, був розроблений стандартний метод кількісного визначення інтенсивності опромінення як оцінки дози. Концентрацію диму (C) розраховували на основі даних про втрату ваги зразка та інтегрували за часом впливу на тварину (t) таким чином, що продукти St отримували в одиницях «мг/л хвилин». Застосування методу було продемонстровано шляхом розрахунку продуктів St на основі даних, наведених у літературі, для сорока п'яти матеріалів, досліджених методом тесту Університету Пітсбурга (UPT). Концентрація диму в окремих матеріалах, випробуваних методом UPT, не була постійною, і деякі матеріали виробляли дим лише протягом третини 30-хвилинного періоду впливу. Деякі показники впливу диму, розраховані за допомогою

запропонованого методу, становили лише від однієї чверті до однієї шостої від того, що випливає з повідомлених значень LC50 (g). Вираження токсичної активності в одиницях St [L(Ct)50's] змінило відносне ранжування деяких матеріалів. Загалом подібні матеріали показали подібні L(Ct)50. Діапазон значень L(Ct)50, особливо для виробів з деревини, виявився вузьким порівняно з діапазоном для чистих газів і парів.

Існують докази, які наведено в [7] і підтверджено статистичними даними про загибель людей на пожежах, що багато смертельних випадків на пожежах відбуваються у результаті втрати працездатності жертв під дією токсичних продуктів, що виділяються на ранніх стадіях пожежі, таким чином перешкоджаючи виходу з пожежі, а не внаслідок прямого впливу тепла чи інших факторів. Важливою частиною розуміння цих проблем було дослідження механізмів втрати працездатності внаслідок впливу продуктів термічного розкладання полімерних матеріалів на атмосферу. Було проведено вимірювання двох видів фізіологічних параметрів: життєво важливі ознаки (дихання, електрокардіографія та респіраторні гази крові) та параметри, що вказують на вплив на нервову систему (електроенцефалографія, слухові викликані потенціали, швидкість нервової провідності). Створені атмосфери були розроблені для вивчення впливу гіпоксії, гіперкапнії, окису вуглецю, ціаніду водню та продуктів термічного розкладання деревини, поліакрилонітрилу, пінополіуретану, поліпропілену, полістиролу та нейлону, вироблених в умовах піролізу або окислення в діапазоні температур. Основні висновки полягали в тому, що склад і, отже, токсичність продуктів з окремих матеріалів можуть значно відрізнятися залежно від різних умов температури та ступеня окиснення, за яких вони розкладалися. Однак, незважаючи на велику складність хімічного складу досліджуваних атмосфер, основний токсичний вплив на тварин був відносно простим, і для кожної окремої атмосфери токсичність завжди визначалася одним із цих факторів: окис вуглецю, ціаністий водень або подразники. Проте невідомо, чи обговорюється роль кожного з цих факторів у виникненні втрати працездатності при реальних пожежах.

Дрібномасштабні випробування на токсичність диму, як зазначено у [8], проводили на електричних неметалевих трубках (ПВХ/ЛОР) на основі полівінілхлориду з використанням протоколу Національного бюро стандартів (NBS) для негарячого горіння. Було визначено LC50 28,5 мг/л ($\pm 9,25$), що віднесло дим ПВХ/ЛОР до категорії токсичності, порівнянну з димом від деревини. Було проведено чотири великомасштабні випробування в кімнаті об'ємом 21 734 л ($8 \times 12 \times 8$ футів). Під час випробувань із застосуванням від 18 до 30 лінійних ін'єкцій ПВХ/ЛОР з джерелами тепла та без них було з'ясовано, що: а) 30 дюймів ПВХ/ЛОР створювали концентрацію диму 3,3 мг/л і недостатню концентрацію HCl, щоб спричинити смерть або значні симптоми у піддослідних тварин (щурів), і б) за наявності відносно невеликого вогню тепло та чадний газ стали обмежувачами для життя раніше, ніж HCl. У додаткових випробуваннях із залученням приблизно 60 дюймів ПВХ/ЛОР, деградованого під тепловим потоком 2,5 Вт/см², було досягнуто концентрації диму 7,6 мг/л. Загибель тварин у цих випробуваннях показала, що смертельні випадки тварин викликані тепловим стресом, а не вдиханням диму. Вимірювані відсотки теоретичного виходу HCl у невеликих тестах коливалися від 64 до 96 відсотків, а у великомасштабних тестах – від 23 до 50 відсотків. Обговорюються причини цих відмінностей.

У роботі [9] сказано, що вогнезахисні матеріали запобігають і сповільнюють поширення вогню, перешкоджаючи горінню даного матеріалу, а в деяких випадках антипірени створюють захисне покриття на поверхні палаючого матеріалу. Вогнезахисний засіб можна використовувати з основним матеріалом як додатковий захисний засіб або хімічно прищепити до матеріалу як реактивний вогнезахисний засіб. Більшість антипіренів виділяють високотоксичні компоненти, які шкідливі для навколишнього середовища. В даний час інтригуюча область дослідницької роботи зосереджена на синтезі та характеристиках екологічно чистих антипіренів, які є новими, ефективними, мають меншу токсичність і є матеріалами на біологічній основі. Натуральні рослинні волокна використовувалися у кількох композиційних сферах, зокрема, в автомобілебудуванні, будівництві та сільському господарстві. У поточній роботі представлені композити, армовані деревним волокном, для використання в якості вогнезахисних виробів. Буде проілюстровано механізм реакції дії антипіренів, а також обговорено хімічні, термічні, механічні та морфологічні властивості вогнезахисних композитів.

Метою роботи є експериментальне дослідження стійкості до впливу термічної дії, димоутворювальної здатності та токсичності продуктів горіння вогнезахисної деревини в умовах натурних випробувань.

Методика дослідження. Для дослідження ефективності вогнезахисту деревини використовували зразки деревини сосни, які обробляли вогнезахисними засобами:

- просочувальним розчином (вогнебіозахисний засіб «ФАЄРВОЛ-АТТІК»);
- вогнезахисним спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД».

Поверхню зразків деревини обробляли вогнебіозахисним просочувальним розчином «ФАЄРВОЛ-АТТІК» з витратою у кількості 270 г/м^2 та покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД» у кількості 241 г/м^2 (рис. 1). Після сушки зразків до постійної маси проводили необхідні дослідження.

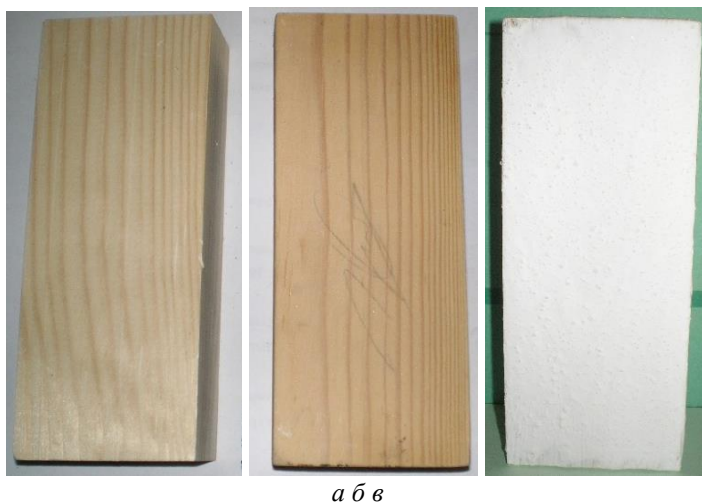


Рис. 1. Модельні зразки вогнезахисної деревини: *а* – необроблений; *б* – оброблений вогнебіозахисним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; *в* – оброблений вогнезахисним спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

Для піролізу вогнезахищеного матеріалу використовували зразки деревини з середніми розмірами 40×40 мм і висотою 10 мм, які оброблені вогнезахисними покриттями, наведеними вище.

Дослідження з визначення групи горючості деревини, обробленої просочувальними розчинами і покриттям, димоутворювальної здатності та токсичності горіння проводили згідно з [10].

Суть методу випробувань експериментального визначення групи важкогорючої деревини полягає у впливі на зразок, що розташований в установці, полум'я пальника або радіаційної панелі із заданими параметрами.

Під час проведення експериментальних досліджень з визначення групи горючості фіксується максимальний приріст температури газоподібних продуктів горіння (Δt) та втрата маси зразка (Δm).

За результатами випробувань матеріали класифікуються як:

- важкогорючі – $\Delta t < 60$ °C та $\Delta m < 60\%$;
- горючі – $\Delta t \geq 60$ °C чи $\Delta m \geq 60\%$.

При визначенні коефіцієнта димоутворення визначають оптичну провідність утворених димових газів.

У залежності від одержаного коефіцієнта димоутворення розрізняють:

- з малою димоутворювальною здатністю – більше 50 м²/кг;
- з помірною димоутворювальною здатністю – більше 50 м²/кг до 500 м²/кг включно;
- з високою димоутворювальною здатністю – коефіцієнт димоутворення більше 500 м²/кг.

Коефіцієнт димоутворення (D_m) в м²/кг визначається за формулою:

$$D_m = \frac{V}{L \cdot m} \ln \frac{T_0}{T_{\min}}, \quad (1)$$

де V – об'єм камери вимірювання, $V = (0,664 \pm 0,004)$ м³;

L – шлях проходження променя світла у диму, $L = (0,800 \pm 0,002)$ м;

m – маса зразка, кг;

$T_0, T_{\min}$ – відповідно значення початкового та кінцевого світлопропускання, %.

За способом визначення методи випробувань на токсичність продуктів горіння поділяються на статичні та динамічні методи. В статичних методах випробувань визначення проводяться в основному за двостадійною схемою: створення продуктів горіння матеріалів, а далі проведення отруювання піддослідних тварин продуктами горіння в експозиційних камерах та оцінка токсичної дії. В динамічних методах випробувань ці процеси проводять одночасно, тобто умови випробувань є більш наближені до реальних, а також більш гнучкі щодо зміни режимів горіння.

В Україні найбільше розповсюдження отримав метод визначення токсичності продуктів горіння матеріалів, регламентований згідно з ДСТУ 2899 [10].

Метод базується на принципі статичної дії продуктів горіння на піддослідних тварин в експозиційній камері. Камера горіння об'ємом 0,003 м³ забезпечується електронагрівальною панеллю, яка випромінює тепловий потік на зразок матеріалу. Продукти горіння з камери горіння надходять до експозиційної камери через 15 хвилин від початку теплової дії

на зразок, або з моменту досягнення максимальної концентрації в камері горіння CO та CO₂, де протягом 30 хвилин здійснюється отруювання піддослідних білих мишей. В конструкції установки об'єм експозиційної камери може змінюватися, що дозволяє проводити токсикологічні дослідження за сталою масою зразків і змінним об'ємом експозиційної камери, та навпаки – за однаковим об'ємом експозиційної камери і різною масою зразків. Випробування проводяться в одному з двох режимів – термоокиснювального розкладу та полуменевого горіння. Після експозиції установку вентилують протягом 10 хвилин і реєструють кількість загиблих тварин і тварин, які вижили. Надалі продовжують спостереження за останніми протягом 14 діб.

Критерієм вибору режиму основних випробувань має служити найбільша кількість загиблих у порівнювальних групах піддослідних тварин. Залежно від складу матеріалу під час проведення випробувань визначають вихід CO, CO₂, HCN, NO_x, альдегідів та інших речовин. Для оцінки вкладу CO в токсичний ефект вимірюють вміст СОНЬ – карбоксигемоглобіну в крові піддослідних тварин. Отриманий ряд значень залежності летальності від відносної маси матеріалу застосовують для розрахунку показника токсичності H_{CL50} , г/м³. Розрахунок середніх летальних доз і концентрацій проводять за допомогою пробіт-аналізу [10].

У першій частині випробувань застосування піддослідних тварин не проводиться. Замість цього, радіаційному нагріванню і спалюванню піддається лише зразок матеріалу зручного розміру, масою до 5 грамів. В роботі [11] описується блок відбору проб для апарату реакції горіння.

Хімічний склад продуктів горіння в експозиційній камері спостерігається за допомогою постійного аналітичного моніторингу: CO₂, CO, O₂ та інших токсичних газів, присутність яких прогнозується залежно від хімічного складу матеріалу зразка (тобто, органічних сполук, галогенідів водню, ціаніду водню тощо). Для визначення сумарної концентрації CO в експозиційній камері застосовуються методи інфрачервоної спектроскопії, для галогенів водню, HCN та O₂ – парамагнітні аналізатори.

Загальний період спостережень у випробуваннях становить 30 хвилин, що відповідає терміну експозиції отруювання піддослідних тварин. Після закінчення перших 15 хвилин лампи нагріву вимикають, а димохід, що з'єднує піч і експозиційну камеру, закривають кришкою.

Відомо, що деревину за показником токсичності продуктів горіння відносять до класу високонебезпечних матеріалів, тобто значення H_{CL50} становить 31,6 г/м³ і знаходиться у межах вказаного класу 13-40 г/м³. Якщо за порівняльною оцінкою встановлений токсичний ефект відповідає такому ж, як і для деревини, за умов однакових значень мас зразків, потенційна токсичність таких матеріалів визначається як „прийнятна”. Токсичність продуктів горіння полімерів згідно з їх вимогами не має бути більш токсичною, ніж продукти горіння необробленої деревини згідно з [12]. Вочевидь, що деревині, як еталону, притаманна однорідність структури та властивостей, а також вона не є матеріалом з допустимою токсичністю продуктів горіння.

Основні вимоги до еталонних матеріалів (порошку целюлози) [10] полягають у тому, що виділення СО під час горіння зразків має відповідати таким критеріям: малонебезпечні – не більше 40 мг/г; помірнонебезпечні – від 40 до 120 мг/г; високонебезпечні – 120-360 мг/г; надзвичайно небезпечні – більше 360 мг/г.

У таблиці 1 наведено значення орієнтовних параметрів токсичності за класифікацією матеріалів згідно з [13] із застосуванням шкали небезпеки СО.

Таблиця 1. Класифікація матеріалів за шкалою небезпеки оксиду вуглецю

Клас матеріалів	Межі концен-трації СО, мг/м ³	Значення масового токсико-метричного показника H_{CL50} за терміном експозиції, г/м ³		Очікуваний токсичний ефект та вміст НЬСО у крові
		30 хв	60 хв	
Мало-небезпечні	до 400	> 120	> 90	НЬСО = 10-20%, зниження працездатності, головний біль
Помірно небезпечні	400-1200	40-120	30-90	НЬСО = 20-40%, симптоми виразного труїння, але здатність до самостійного пересування не втрачена
Високо-небезпечні	1200-3600	13-40	10-30	НЬСО = 40-90%, нерухомість, загибель
Надзвичайно небезпечні	> 3600	до 13	до 10	Загибель за більш короткий термін дії

Вищенаведені рівні виділення СО „еталонними” матеріалами застосовано для обчислення очікуваних результатів значень H_{CL50} як за 60-хвилинною, так і за 30-хвилинною експозицією, враховуючи, що зони гострої дії під час горіння еталонних матеріалів практично однакові для людини за 60- та 30-хвилинної експозиції H_{CL50} [14].

У тих випадках, коли величина H_{CL50} з урахуванням стандартної похибки відповідає крайнім значенням показника двох суміжних класів, до уваги приймають додаткові відомості щодо їх токсичності: режим випробувань, дані про хімічний склад продуктів горіння тощо [15].

Основна частина

Для встановлення вогнезахисної ефективності при дослідженні просочувального розчину і покриттів були проведені дослідження щодо визначення групи горючості деревини при обробленні зазначеними композиціями. Результати досліджень з визначення втрати маси зразків (Δm , %) та приросту максимальної температури газоподібних продуктів горіння (Δt , °C) зразків вогнезахисної деревини, проведених у лабораторних умовах, наведено на рис. 2, 3.

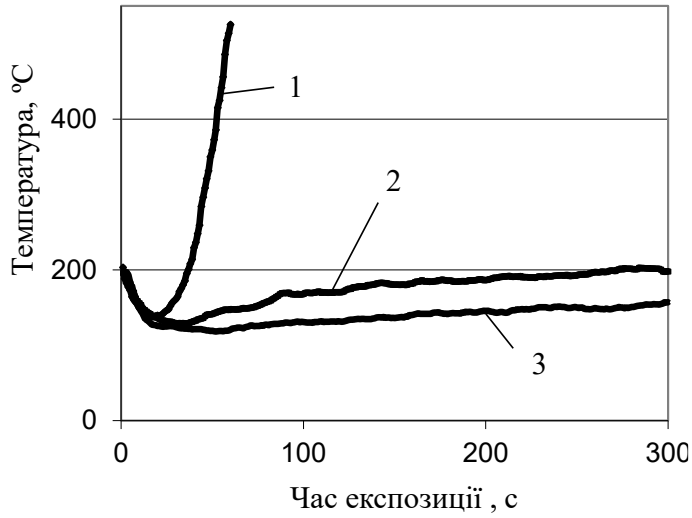


Рис. 2. Динаміка наростання температури димових газів при випробуваннях вогнезахисної деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; 3 – оброблена спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

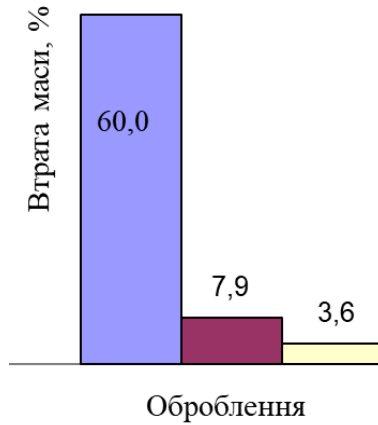


Рис. 3. Результати втрати маси зразків Δm , % вогнезахисної деревини: 1 – необроблена; 2 – оброблена засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»; 3 – оброблена спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»

Дослідження показали (рис. 2, 3), що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння у 200 °C, при дії полум'я пальника на захищений зразок неорганічним покриттям (крива 2), температура газоподібних продуктів горіння становила менше 210 °C, а втрата маси не перевищила 8% (рис. 2). Ще більшу ефективність показали зразки, які були оброблені спучуючим покриттям з втратою маси 3,6% та температурою газоподібних продуктів горіння менше 180 °C (зразок 3) (рис. 2).

У табл. 2 наведено результати для кожного з режимів випробувань коефіцієнта димоутворення, зокрема, для необробленої деревини та вогнезахищеної деревини: просочувальним засобом, спучуючим покриттям.

Таблиця 2. Результати випробувань коефіцієнта димоутворення деревини

Режим випробувань та густина теплового потоку	Номер зразка для випробувань	Маса зразка (m), кг×10 ⁻³	Світлопропускання, %		Коефіцієнт димоутворення для кожного зразка (D _m), м ² /кг
			(T ₀) початкове	(T _{min}) кінцеве	
Полум'яне горіння (35 кВт/м ²)	Необроблена	0,75	100	51	674,45
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»	0,79	100	80	224,20
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»3	0,83	100	87	140,26
Тління (35 кВт/м ²)	Необроблена	0,76	100	47	756,11
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»	0,80	100	76	275,47
	Оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»3	0,82	100	85	238,65

Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає 756,11 м²/кг та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворювальну здатність деревини майже втричі. Даний матеріал класифікується як з помірною димоутворювальною здатністю.

На першому етапі визначення токсичності продуктів горіння вогнезахищеної деревини було проведено санітарно-хімічні випробування в режимі термоокислювальної деструкції (400 °С) та полум'яного горіння при температурі 750 °С. Як зразок для порівняння використовували деревину сосни з сухою питомою густиною 0,443 г/см³. Зразки кондиціювали у лабораторних умовах не менше 48 годин. Результати санітарно-хімічних випробувань деревини, вогнезахищеної просочувальним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК» та спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД», наведено у табл. 3.

Як видно з таблиці 3, при горінні матеріалу у повітрі запалювальної камери були визначені монооксид та діоксид вуглецю, у концентраціях, що можуть викликати гостре отруєння експериментальних тварин, а також інших у токсикологічно безпечних концентраціях (з позицій гострої токсичності).

На наступному етапі були проведені токсикологічні випробування, метою яких є визначення показника токсичності (HCL50), який характеризується як відношення кількості матеріалу до одиниці об'єму замкнутого простору, продукти згоряння якого викликають загибель 50% піддослідних тварин. Експозиція становила 30±0,5 хв., концентрація кисню у камері перевищувала 18%. При випробуваннях використовували білих мишей вагою 20,0±2,0 г.

Таблиця 3. Міграція компонентів при моделюванні умов горіння деревини

Компонент	Визначені кількості продуктів горіння, мг/г			
	Деревина оброблена «ФАЄРВОЛ-АТТІК»		Деревина оброблена «ФАЄРВОЛ-ВУД»	
	400 °C	750 °C	400 °C	750 °C
Монооксид вуглецю	122,6	116,9	104,3	96,7
Діоксид вуглецю	351,3	422,6	289,4	327
Оксиди азоту	0,9	1,8	н.в.	1,3
Водень ціаністий	0,06	н.в.	0,03	н.в.
Фенол	0,88	0,17	0,86	0,21
Оцтова кислота	6,4	3,6	5,8	1,8
Формальдегід	0,07	0,008	0,09	0,13
Вуглеводні C ₁ -C ₁₀	3,2	2,3	2,2	0,9
Бензол	н.в.	3,6	3,7	2,14
Бутанол	0,5	н.в.	0,2	н.в.
Метанол	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Ацетон	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Акрилонітрил	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Водень хлористий	0,72	3,1	0,64	0,97
Акролеїн	0,04	0,2	0,22	0,29
Аміак	1,48	0,3		
Втрата маси	63,4%	72,8%	62,4%	69,9%

У кожному температурному режимі знаходили ряд значень залежності загибелі тварин від відношення маси зразку до об'єму експозиційної камери, який використовували для розрахунку показника токсичності H_{CL50} за допомогою пробіт-аналізу [12]. Результати представлені в табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунків H_{CL50} для вогнезахищеної деревини

Наважка, г	Смертність, %	Місце концентрацій	Пробіти	Ваговий коефіцієнт
Деревини, обробленої просочувальним засобом «ФАЄРВОЛ-АТТІК»				
50,0	0	1,0	3,04	1,0
55,0	20	2,0	4,16	3,7
60,0	50	3,0	5,00	5,0
65,0	80	4,0	5,84	3,9
70,0	100	5,0	6,96	1,0
Деревини, обробленої спучуючим покриттям «ФАЄРВОЛ-ВУД»				
65,0	0	1,0	3,04	1,0
70,0	30	2,0	4,48	4,7
75,0	50	3,0	5,00	5,0
80,0	80	4,0	5,84	3,9
85,0	100	5,0	6,96	1,0

Масова доля карбоксигемоглобіну в крові лабораторних тварин визначалась спектрофотометричним методом. Результати токсикологічних випробувань наведено у табл. 5.

Таблиця 5. Результати токсикологічних випробувань вогнезахищеної деревини

400 °C				750 °C			
«ФАЄРВОЛ-АТТІК»		«ФАЄРВОЛ-ВУД»		«ФАЄРВОЛ-АТТІК»		«ФАЄРВОЛ-ВУД»	
H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %	H_{CL50} , г/м ³	НВСО, %
62,5	65,2	73,3	62,8	68,4	62,7	84,2	57,8

Таким чином, в результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400 °C, складає для деревини, обробленої «ФАЄРВОЛ-АТТІК» – 62,5 г/м³ і «ФАЄРВОЛ-ВУД» – 73,3 г/м³ відповідно. Це значення використане для встановлення величини показника токсичності продуктів горіння згідно з класифікацією за ДСТУ 8829 [10]. За цим показником досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів.

Висновки

1. Дослідження показали, що деревина відноситься до горючих матеріалів, просочена деревина витримала температурний вплив і відноситься до важкогорючих матеріалів за показником втрати маси. При початковій температурі газоподібних продуктів горіння у 210 °C, при дії полум'я пальника на захищений зразок неорганічним покриттям, температура газоподібних продуктів горіння становила менше 260 °C, а втрата маси не перевищила 8%. Ще більшу ефективність показали зразки, які були оброблені спучуючим покриттям, з втратою маси 3,6% та температурою газоподібних продуктів горіння менше 180 °C.

2. Середнє значення коефіцієнта димоутворення для деревини в режимі тління складає 756,11 м²/кг та відносить таку деревину до матеріалів з високою димоутворювальною здатністю. Вогнезахисне оброблення знижує димоутворення деревини майже втричі, даний матеріал класифікується як з помірно димоутворювальною здатністю.

3. У результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений, головним чином, дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 400 °C, складає для деревини, обробленої «ФАЄРВОЛ-АТТІК» – 62,5 г/м³ і для «ФАЄРВОЛ-ВУД» – 73,3 г/м³ відповідно. Це значення використане для визначення величини показника токсичності продуктів горіння та встановлено, що досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Guidotti, T.L. (2016). Toxic hazards. Health Risks and Fair Compensation in the Fire Service. 63–92. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23069-6_5
2. Martinka, J., Wachter, I., Rantuch, P., Balog, K. (2017). Key properties of combustion products and their application in fire safety engineering. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 17(43), 421–428. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2017H/43/S19.053>
3. Bralewska, K., Rakowska, J. (2020). Concentrations of particulate matter and pm-bound polycyclic aromatic hydrocarbons released during combustion of various types of materials and possible toxicological potential of the emissions: The results of preliminary studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 17(9), 3202. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17093202>
4. Zhang, S., Chen, Z., Ding, M., Yang, T., Wang, M. (2020). Reducing the fire toxicity of wood composites using hierarchically porous 4A (H4A) zeolite modified ammonium polyphosphate (APP) synthesized by a facile in-situ method. *Construction and Building Materials*. 262, 120754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120754>
5. Wichmann, H., Kolb, M., Bulutcu, D., et al. (2023). Analytical determination of compounds released during pyrolysis, smoldering, and combustion experiments with insulation materials from renewable resources. *Fire and Materials*. 47(1), 3–15. <https://doi.org/10.1002/fam.3064>
6. Alexeeff, G.V., Packham, S.C. (2023). Evaluation of smoke toxicity using concentration-time products. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 202–219. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200504>
7. Purser, D.A., Woolley, W.D. (2023). Biological studies of combustion atmospheres. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 38–64. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003418948-4>
8. Packham, S.C., Crawford, M.B. (2023). An evaluation of smoke toxicity and toxic hazard of electrical nonmetallic tubing combustion products. *Advances in Combustion Toxicology. Volume I*, 96–118. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200105>
9. Phiri, M.J., Phiri, M.M., Mzinyane, N.M., Hlangothi, S.P. (2024). Wood Flour and Other Fiber Composites: Properties and Flame Retardancy. *Engineering Materials, Part F3640*. 163–184. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-6871-4_8
10. Zhartovsky, S.V., Leonova, D.I. (2007). Combustibility and toxicity studies of fire-resistant plywood boards. *Actual problems of transport medicine*. 2(8). 78-83. [Жартовский С.В., Леонова Д.И. (2007). Исследование огнезащищенных фанерных плит на горючесть и токсичность. Актуальні проблеми транспортної медицини. № 2 (8). 78-83]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/22793>
11. Hauk, A., Sklorz, M., Bergmann, G., Hutzinger, O. (1994). Analysis and toxicity testing of combustion gases I. A new sampling unit for collection of combustion products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 28/1, 1-12. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(93\)00759-G](https://doi.org/10.1016/0165-2370(93)00759-G)
12. Williams, S. J., Clarke, F. B. (1982). Combustion Product Toxicity: Dependence on the Mode of Product Generation. E. I. Dupont de Nemours and Co., Inc., Haskell Laboratory for Toxicology, Newark, Delaware 19711 and Benjamin Clarke Associates, Inc., Kensington, Maryland 20895, 1982. USA. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/fam.810060309>
13. Huggett, C. (1984). Combustion Conditions and Exposure Conditions for Combustion Product Toxicity Testing. *Journal of Fire Sciences*. 2/5. DOI: <https://doi.org/10.1177/073490418400200502>
14. Wakefield, J.C. Combustion products: a toxicological review. Retrieved 2025, March 23 from <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a74afd1ed915d0e8e39a374/HPA-CHaPD-004>
15. Stec, A., Hull, R. (2010). Fire Toxicity. *Book*. 668-688. <https://www.sciencedirect.com/book/9781845695026/fire-toxicity#book-info>

Стаття надійшла до редакції 13.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 09.06.2025

The article was received 13.03.2025 and was accepted after revision 09.06.2025

Цапко Юрій Володимирович

д.т.н., професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0625-0783> **e-mail:** juriys@ukr.net

Цапко Олексій Юрійович

PhD, доцент кафедри будівельних матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр. Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2298-068x> **e-mail:** alekseysapko@gmail.com