

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ (УкрНДЦЗ)

ЖАРТОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 614.84

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ
ОБ'ЄКТІВ З ПОЖЕЖНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ
ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ
ВОДНИМИ ВОГНЕБІОЗАХИСНИМИ РЕЧОВИНАМИ**

21.06.02 – пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському науково-дослідному інституті цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій (м. Київ).

Науковий консультант: доктор технічних наук, старший науковий співробітник Чумаченко Сергій Миколайович, Національний університет харчових технологій (м. Київ), в.о. завідувача кафедри інформаційних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Беліков Анатолій Серафимович,
Придніпровська державна академія
будівництва й архітектури (м. Дніпро),
завідувач кафедри безпеки життєдіяльності;

доктор технічних наук, доцент
Кіреєв Олександр Олександрович,
Національний університет цивільного захисту
України (м. Харків), професор кафедри спеціальної
хімії та хімічної технології;

доктор технічних наук, доцент
Болібрух Борис Васильович,
Національний університет «Львівська політехніка»
(м. Львів), професор кафедри цивільної безпеки.

Захист відбудеться «31» січня 2019 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

Автореферат розісланий «27» грудня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.707.01



А.О. Михайлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток будівництва супроводжується збільшенням пожежного навантаження на об'єктах цивільного і промислового будівництва. При цьому протягом останніх 20 років неухильно зростає пожежне навантаження за рахунок матеріалів пожежі класу А, особливо через застосування целюлозовмісних матеріалів (ЦВМ), що в даний час становить приблизно 80% від загальної маси пожежного навантаження. Такі ЦВМ, як деревина, папір, тканина, очерет здатні загорятися від низькокалорійних джерел займання, тому найбільша кількість пожеж виникає внаслідок необережного поводження з вогнем (не менше 60 % від загальної кількості пожеж протягом 10 останніх років). При цьому всього 1,1 % пожеж за останні 20 років в Україні погашено на початковій стадії їх розвитку.

Процеси тепломасопереносу при горінні ЦВМ досліджувалися в роботах Р.І. Van Tiggelen, J. Vandooren, І.М. Абдурагімова, А.М. Баратова, Б.В. Болібруха, Н.Ф. Коварда, В.К. Костенка, Г.І. Ксандопуло, П.С. Пашковського; питання реалізації ефектів ізолювання, інгібування, флегматизування та охолодження при використанні вогнегасних та вогнезахисних речовин вивчалися А.В. Антоновим, В.М. Апановичем, А.М. Баратовим, В.М. Жартовським, О.Г. Тропіновим; процеси формування іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів при горінні ЦВМ та їх гасінні вогнегасними речовинами вивчалися С.І. Ballhausen, R.S. Mulliken, Н.В. Gray, L. Pauling, Д.І. Каганюком. При цьому поза увагою залишилися питання комплексної реалізації вогнегасних та вогнезахисних властивостей водних вогнебіозахисних речовини (ВВБЗР) для ЦВМ.

У розробляння засобів і заходів для активного протипожежного захисту ЦВМ (тобто, у створення вогнегасних речовин та техніки їх подавання) внесли значний вклад вітчизняні та закордонні вчені: Р.М. Kennedy, І.М. Абдурагімов, Ю.О. Абрамов, В.В. Азатян, А.В. Антонов, А.М. Баратов, А.С. Беліков, О.О. Кіреєв, Д.О. Корольченко та інші. В розробляння засобів і заходів для пасивного протипожежного захисту (в розробленні профілактичних заходів та створення вогнезахисних речовин для деревини та інших ЦВМ) також внесли вагомий вклад вчені: S.V. Levchik, E.D. Weil, S. Yamashika, С.В. Баженов, Л.А. Берездевін, А.С. Беліков, В.М. Жартовський, А.М. Каратеев, М.А. Касьянов, А.І. Козлюк, Н.І. Константинова, Ф.А. Левітес, Н.А. Максименко, С.В. Поздєєв, І.Г. Романенков, Я.О. Тарануха, Н.А. Тичино, Ю.В. Цапко, Р.А. Яковлева та інші. При цьому тривалий час використовувались ВВБЗР для ЦВМ, які у своєму складі мали високотоксичні речовини (наприклад, фторид натрію, пентафенолят натрію, солі хрому та інші), що додатково підвищували екологічну небезпеку об'єкта. До того ж вони були малоефективними та забезпечували короткий термін вогнезахисту деревини (до 1 року), а продукти згорання були високонебезпечними. Отже, протипожежний захист об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ не спрацьовував належним чином, оскільки заходи та засоби активного та пасивного захисту суттєво не впливали на покращення загального рівня пожежної безпеки.

Отже, стан порушеного питання характеризується *протиріччями*:

- на практиці:

а) з одного боку, наявна значна небезпека на об'єктах від пожежного навантаження, сформованого ЦВМ;

б) з другого боку, відсутні ефективні та екологічно безпечні ВВБЗР, використання яких дає змогу попереджати та ліквідувати пожежі на об'єктах на початковій стадії їх розвитку;

- *в теорії*:

а) з одного боку, наявне підґрунтя щодо розкриття впливу різних речовин і матеріалів на процеси виникнення, розповсюдження та припинення горіння ЦВМ;

б) з другого боку, відсутні науково обґрунтовані підходи щодо комплексного використання ефектів охолодження, флегматизації, ізолювання та інгібування при створенні складів ВВБЗР для подальшого використання в методах пасивного і активного протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ.

Наведені протиріччя вказують на актуальність вирішення науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у подоланні недосконалості методів пасивного і активного протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ для попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів наукової діяльності УкрНДЦЗ в рамках виконання Загальнодержавної цільової програми розвитку цивільного захисту на 2009-2013 роки, Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011 – 2015 роки (розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2010 №2348-р), постанов Кабінету Міністрів України від 15.08.2007 № 1051 та від 02.03.2010 № 227, замовлення Департаменту сил МНС України та Державної інспекції з техногенної безпеки на науково-дослідні роботи, які виконано в УкрНДЦЗ за участю здобувача у якості відповідального виконавця, результати яких використано в дисертації: «Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання» (ДР № 0111U006565), «Провести дослідження та науково обґрунтувати методикку визначення тривалості зберігання показників якості вогнезахисту будівельних конструкцій з урахуванням умов їх експлуатації» (ДР № 0111U007404), «Провести дослідження з виявлення факторів впливу на ефективність вогнезахисту деревини та виробів з неї» (ДР № 0111U006271).

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розвиток наукових основ протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом створення і реалізації методів пасивного і активного протипожежного захисту з використанням вискоефективних екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі *задачі*:

- проаналізувати сучасні методи протипожежного захисту на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ;

- дослідити особливості закономірностей процесів, які реалізуються в методах активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ;

- розробити метод пасивного протипожежного захисту ЦВМ з використанням водних вогнебіозахисних речовин;
- розробити метод активного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин в якості вогнегасного заряду для первинних засобів пожежогасіння;
- створити систему протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин;
- дослідити дієздатність створеної системи протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ.

Об'єкт досліджень – процес протипожежного захисту на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ.

Предмет досліджень – методологічні засади протипожежного захисту на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ за рахунок застосування екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

Методи досліджень. Під час виконання дисертаційної роботи використано: комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ від пожежі; системний підхід до встановлення причинно-наслідкових зв'язків умов мобілізації засобів активного протипожежного захисту з рівнем ефективності пасивного протипожежного захисту для створення системи захисту об'єкта від пожежі, як складової загальної системи забезпечення пожежної безпеки об'єкта; математичне моделювання процесів попередження займання і припинення горіння різних речовин шляхом використання методів наближеної чисельної ітерації та методів квантово-хімічного розрахунку іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів активних центрів горіння і продуктів розкладу вогнегасних та вогнезахисних речовин; якісний і кількісний хімічний аналіз; фізико-хімічні методи дослідження (феноменологічні моделі, ІЧ-спектроскопія, диференціальний термічний аналіз, газова хроматографія); методи дослідження реологічних і гідродинамічних характеристик водних вогнегасних речовин; метод оптичної мікроскопії, методи визначення показників пожежовибухонебезпечності речовин і матеріалів за ГОСТ 12.1.044-89; методи полігонних вогневих випробувань (за запропонованими методиками) для дослідження ефективності активного і пасивного протипожежного захисту об'єкта; метод експертних оцінок для оцінки ефективності розробленої технології захисту об'єкта від пожежі; методи математичного моделювання та математичної статистики для моделювання процесів вогнезахисту та вогнегасіння і оброблення результатів експериментальних досліджень.

Основні наукові положення, що виносяться на захист, та їх новизна:

Уперше:

1. Запропоновано математичну модель розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини. Модель дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині для максимального насичення поверхневих шарів деревини. Використання моделі придатне для вогнебіозахисних засобів, що

використовуються при поверхневому вогнезахисті дерев'яних елементів горищних покриттів будівель та споруд на об'єктах різного призначення на вимогу державних будівельних норм в Україні.

2. Запропоновано математичну модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, які відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння, що дозволяє визначити час від початку дії теплового потоку на необроблену деревину (різної породи, товщини тощо) до моменту займання (спалахування), що дає можливість оцінити ресурс часу для ліквідації осередку займання пожежного навантаження.

3. Запропоновано математичну модель, що пов'язує охолоджувальний ефект від використання водних вогнебіозахисних речовин для вогнезахисту деревини з вкладом у прогнозне подовження часу від початку термічного впливу до займання деревини (тобто, з подовженням початкової стадії розвитку пожежі), яку доцільно використовувати при розробленні компонентного складу вогнезахисних просочень.

4. Теоретично досліджено і експериментально підтверджено закономірності підвищення ефективності припинення горіння при використанні в складах ВВБЗР сумішей фосфоро- та азотовмісних речовин (ефект синергізму), які під час термічного розкладу утворюють сполуки, що інгібують активні радикали полум'я ЦВМ.

5. Розроблено метод пасивного протипожежного захисту целюлозовмісних матеріалів на основі використання водних вогнебіозахисних речовин комплексної дії, що складаються з водного розчину синергетичної суміші фосфатів, сульфатів амонію та водного розчину полігексаметиленгуанідингідрофосфату, або водного розчину полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду, та визначено рівень ефективності вогнебіозахисту навантаження за показниками пожежної небезпеки та стійкості до біоруйнування: матеріали навантаження класифікуються як матеріали низької горючості, важкозаймисті, матеріали, що не поширюють полум'я поверхнею, з помірною димоутворювальною здатністю, помірної небезпечності за токсичністю та стійкі до біоруйнування.

6. Розроблено метод активного протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ з використанням в якості вогнегасного заряду в первинних засобах пожежогасіння екологічно безпечних ВВБЗР на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфата карбаміду. При цьому реалізується комплекс вогнегасних чинників впливу: охолодження і флегматизування при випаровуванні води з подальшим інгібуванням активних центрів ланцюгових реакцій горіння в полум'ї продуктами термічного розкладу зазначеної речовини, а також утворення захисної плівки цієї сполуки на поверхні матеріалів, що забезпечує ефективність вогнегасіння тонкорозпиленими струменями зазначеної речовини в 4,9 рази вище у порівнянні з тонкорозпиленими струменями води. Отримані результати поширено і для вогнищ пожеж класу В: запропонований метод за аналогічних умов забезпечує ефективність вогнегасіння тонкорозпиленими струменями в 3,2 рази вище порівняно із подаванням тонкорозпилених струменів води.

7. Створено систему протипожежного захисту на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ, в якій реалізовано метод пасивного захисту з використанням ВВБЗР, що підвищує температуру займання деревини до 400 °C і зменшує

токсичність продуктів горіння, та метод активного захисту з використанням ВВБЗР в якості заряду для первинних засобів пожежогасіння, застосування яких унеможливило повторне займання ЦВМ.

Удосконалено:

1. Феноменологічну модель процесу висолювання вогнезахисної речовини з вогнебіо захищеної деревини, що додатково враховує дифузію води та водних розчинів антипіренів у шарі цілеспрямовано сформованого бар'єра у вигляді полімерної плівки антисептика на поверхні вогнебіо захищеної деревини, що дозволяє зменшити ефективний коефіцієнт дифузії антипіренів в деревині на 5-6 порядків.

Дістав подальший розвиток:

1. Метод оцінювання рівня вогнезахисту дерев'яних конструкцій, в основу якого покладене співвідношення значень температур займання вогнезахисної та вогнене захищеної деревини в якості критерія визначення рівня вогнезахисту, що дозволяє визначати якість проведених робіт з вогнезахисту та достатність рівня вогнезахисту дерев'яних конструкцій протягом їх експлуатації під час проведення аудиту пасивного захисту об'єкта від пожеж.

Практичне значення отриманих результатів полягає у реалізації методології запобігання пожежам на об'єктах з пожежною навантагою із ЦВМ шляхом створення системи протипожежного захисту з використанням розроблених ВВБЗР. Результати дисертаційної роботи втілено в розробку трьох патентів України на корисну модель щодо складів ВВБЗР для вогнебіо захисту деревини, тканин, паперу і очерету, які в подальшому використано при розробці технічних умов виготовлення та регламентів використання ВВБЗР, що серійно виробляються на потужностях ТОВ «Вогнебіо захист» (м. Київ) та ТОВ «Захист-Центр» (м. Київ). Ці підприємства забезпечують сертифікованими ВВБЗР близько 5-6 тисяч об'єктів в Україні на рік (акти впровадження від 27.12.2013 р., 23.04.2014 р., 29.08.2018 р., 04.09.2018 р., 06.09.2018 р., 07.09.2018 р., 14.09.2018 р., 22.11.2018 р., 23.11.2018 р.).

Результати дисертаційної роботи використано при розробці та впровадженні: національного стандарту України «Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-1. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість» (EN 1995-1-2: 2004, MOD) ДСТУ-Н-П Б В.2.6-157: 2010; систем пасивного і активного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ від пожеж на початковій стадії їх розвитку із застосуванням розроблених ВВБЗР. Результати дисертації впроваджено у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України (за напрямками підготовки «Цивільний захист» та «Пожежна безпека», акт впровадження від 25.12.2015 р.) та увійшли до навчальних посібників: «Вогнезахист деревини та виробів з неї» (рекомендованого Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, лист №1/11-10496 від 23.12.2009), «Вогнегасні порошки та умови їх застосування» (рекомендованого Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, лист №1/11-7512 від 20.05.2014).

Особистий внесок здобувача полягає в участі у формулюванні науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, самостійному визначенні мети і завдань досліджень, об'єкту та предмету досліджень, аналізі вітчизняних та

закордонних джерел інформації, удосконаленні та розробленні методів і методик досліджень, проведенні експериментальних досліджень, а також в обробленні їх результатів, формуванні висновків. Дана дисертація є самостійною роботою автора. Всі положення, винесені на захист, та результати їх застосування приведені в роботах [1-37].

В наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у наступному. В роботі [4] здобувачем сформульовано мету дослідження, визначені етапи методики математичного моделювання енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння, на підставі аналізу її застосування для деревини сосни зроблено висновки. В роботі [5] визначено задачі дослідження, на підставі аналізу експериментальних даних представлені прогностичні показники щодо збереження ефективного вогнезахисту виробів із деревини, що оброблені різними просочувальними засобами. В роботі [6] проведено порівняльний аналіз умов випробування вогнезахисної деревини відповідно до стандартизованих методів і методик визначення рівня її вогнезахисту з реальними умовами експлуатації, надані пропозиції щодо усунення визначених невідповідностей. У роботі [7] сформульовано ідею і задачі дослідження, запропоновано удосконалену рецептуру композиційної просочувальної вогнезахисної речовини для вогнезахисту тканин і деревини. В роботі [10] запропоновано об'єднання активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ на основі використання комплексної сполуки полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду. В роботі [11] сформульовано мету дослідження, розроблено методику дослідження поглинання водних розчинів антипіренів при просоченні торцевих та бокових граней стандартизованих зразків деревини, на підставі аналізу експериментів зроблено висновки. В роботах [12, 28] на основі аналізу експериментальних даних та практики використання водних вогнебіозахисних речовин, в складі яких присутні полімери гуанідинового ряду, запропоновані шляхи забезпечення безпеки життєдіяльності об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ. У роботах [13, 15, 30] запропоновано ідею використання водної вогнегасної речовини на основі полімеру гуанідинового ряду для практики пожежогасіння, запропоновані методи дослідження, на підставі аналізу експериментів зроблено висновки. В роботі [19] здобувачем проведено аналіз державних будівельних норм з урахуванням сучасних підходів щодо нормування пожежної безпеки об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ. В роботі [20] здобувачем сформульовано мету дослідження, визначені етапи створення методики математичного моделювання розподілу антипіренів в середині вогнезахисної деревини, розроблено математичну модель для визначення оптимальної концентрації антипіренів в складі водної вогнебіозахисної речовини для досягнення максимального насичення антипіренами поверхневих шарів деревини. В роботі [21] сформульовано мету дослідження, розроблено математичну модель охолоджувального ефекту від використання водної вогнебіозахисної речовини на основі фосфатів та сульфатів амонію. В роботах [33, 34, 36] виконано економічний розрахунок ефективності від впровадження системи протипожежного захисту на основі використання водних вогнебіозахисних речовин та зроблено висновок щодо

доцільності впровадження зазначеної системи на об'єктах критичної інфраструктури. В роботі [37] зроблені висновки щодо ефективності використання водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду для гасіння пожеж класу В.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати досліджень доповідались, обговорювались та отримали позитивне схвалення на міжнародних та національних науково-практичних конференціях: IX Міжнародна науково-практична конференція «Пожежна безпека – 2009» (м. Львів, 2009); XXIX Международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания института ВНИИПО» (г. Москва, 2012); 14-та Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників (м. Київ, 2012); 15-та Всеукраїнська науково-практична конференція рятувальників (м. Київ, 2013), VI Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2014); Всеукраїнська науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2015); XI Міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2016» (м. Жукин, 2016), II Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури» (м. Київ, 2016), X Міжнародна науково-практична конференція: теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій (м. Черкаси, 2018).

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертації увійшли до 37 опублікованих робіт, серед яких: 1 монографія; 3 статті у закордонних фахових наукових виданнях, з яких 2 одноосібні; 20 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 8 одноосібні, 5 опубліковані у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах; 10 доповідей і тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій; 3 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації містить 425 сторінок (з них 348 сторінок основного тексту), 51 таблиця, 66 ілюстрацій, список використаних джерел із 297 найменувань та 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено актуальність дисертаційної роботи, мету, об'єкт, предмет та основні завдання досліджень, наукову новизну, наукові положення і практичну цінність отриманих результатів. Наведено дані про впровадження та апробації результатів досліджень.

У першому розділі «Аналіз сучасних методів запобігання пожежам на об'єктах з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів» проведено аналіз сучасних досягнень в науковій та практичній площині щодо створення ВВБЗР та відповідної нормативно-технічної бази, надана оцінка їх ефективності при використанні для пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ. Визначено, що тривалий час інтенсивно розвивався напрям розроблення засобів і заходів для

активного захисту: розроблялись нові ефективні вогнегасні речовини, створювалась відповідна техніка для їх використання. Повільнішими темпами розвивався напрямок пасивного протипожежного захисту. Визначено, що розроблення рецептур ВВБЗР відбувалось на застарілих наукових основах, які передбачали використання сольових антипіренів та антисептиків, що здатні до швидкого висолювання. В якості антисептиків застосовувались шкідливі речовини I та II класів небезпеки, що погіршувало екологію навколишнього середовища. Ефективність вогнезахисту деревини зберігалась протягом короткого терміну (не більше року). Отже, такі ВВБЗР не могли забезпечити ефективне вирішення задач з профілактики або ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку. А науково-дослідні роботи щодо використання ВВБЗР в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння практично не проводились.

Відтак зроблено висновок, що подальший розвиток наукових основ протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом створення і реалізації методів пасивного і активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин є перспективним напрямом підвищення ефективності систем протипожежного захисту об'єктів.

На підставі використаних результатів аналізу щодо стану проблеми сформульовано мету, визначено задачі та методи досліджень.

У другому розділі «Особливості закономірностей процесів, які реалізуються в методах активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів» представлено методологічні основи створення активного і пасивного протипожежного захисту з використанням високоефективних екологічно безпечних ВВБЗР. Проведено систематизацію захисту об'єкта від пожеж відповідно до нормативних вимог в загальній системі захисту: виділено пасивний захист, який визначається застосуванням заходів вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час гасіння пожежі, та активний захист, який визначається застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в будь-який час бути мобілізованими для гасіння пожеж. Обґрунтовано доцільність створення єдиної системи пасивного і активного захисту. В якості теоретичної основи досліджень застосовано системний підхід, що являє собою сукупність методологічних принципів отримання знань щодо впливу фізичних, хімічних, фізико-хімічних властивостей ВВБЗР на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння ЦВМ в системних об'єктах.

В основі захисту систематизованого об'єкта від загорань і пожеж є феномен класичного трикутника горіння (пожежі): горюча речовина, окисник, джерело займання. В цьому контексті феноменологічне моделювання захисту є алгоритмом відтворення впливу факторів *охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання (екранування)* ВВБЗР на унеможливлення реалізації або руйнування трикутника горіння.

Важливим елементом методології, що запропонована, є встановлення критеріїв (параметрів) і методів їх визначення, за якими можливо оцінити якість отриманих результатів вогнезахисту. Одним з таких параметрів може бути температура займання вогнезахищеної та вогнєнезахищеної деревини. Цей параметр визначає декілька характеристик. По-перше, про якість вогнезахисту свідчить підвищення температури займання з 230-240 °С (у вогнєнезахищеної деревини) до 400-410 °С (у вогнезахищеної деревини). По-друге, підвищення температури займання пожежного навантаження подовжує час початкової стадії розвитку пожежі (ПСРП), що визначається моментом переходу від локального до об'ємного горіння на об'єкті. Це значно покращує можливості щодо локалізації, а у випадку відсутності джерела займання, і ліквідації пожежі на ПСРП.

Максимальну реалізацію вогнезахисних ефектів слід очікувати при максимальному насиченні поверхневих шарів деревини антипіренами зі складу ВВБЗР. Запропоновано математичну модель розподілу антипіренів всередині деревини, вогнезахищеної ВВБЗР. Модель дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині.

Проведені експериментальні дослідження еталонних зразків вогнезахищеної деревини дозволили запропонувати модель, що описує розподіл концентрації антипіренів вглибину деревини, є нелінійна залежність, яка близька до експоненційного закону.

$$P(C, h) = a(C) \cdot \exp(-b(C) \cdot h), \quad (1)$$

де $P(C, h)$ - функція розподілу концентрації антипіренів вглибині дерева; C - початкова концентрація антипіренів в просочувальному розчині; h - глибина просочування (відстань вглибину перпендикулярно поверхні деревини).

Один із прикладів отриманих результатів у випадку, що відповідає 30 %-му розчину антипірену зі складу ВВБЗР ДСА-2М у графічному вигляді приведений на рис. 1. Графічне зображення функціональних залежностей, отриманих в результаті математичної апроксимації експериментальних даних про розподіл відносної концентрації антипіренів при використанні розчинів антипіренів в діапазоні зміни їх концентрацій від 5% до 45% наведено на рис. 2. В подальшому здійснюються розрахунки значень апроксимуючих функцій $a(C)$ и $b(C)$ у вигляді функцій :

$$a(C) = a_0 + a_1 \cdot C, \quad (2)$$

$$b(C) = b_0 + b_1 \cdot C + b_2 \cdot C^2. \quad (3)$$

Вибір лінійної та квадратичної залежності для функцій $a(C)$ и $b(C)$, відповідно, обумовлено статистичною перевіркою збіжності експериментальних та теоретичних даних.

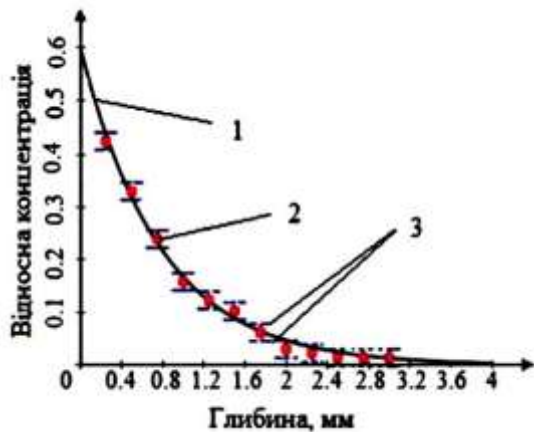


Рис. 1 - Залежність відносної концентрації антипіренів від глибини проникнення у зразок деревини. Криві: 1 – апроксимаційна функція, 2 – вихідні експериментальні дані, 3 – межі відхилень при вимірюванні відносної концентрації

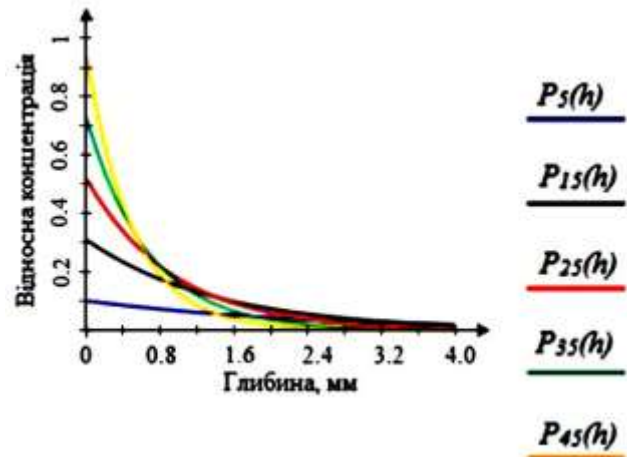


Рис. 2 – Апроксимовані залежності відносної концентрації антипіренів в глибину просоченої деревини для різних значень початкової концентрації антипіренів в просочувальному розчині. Індекс при позначенні функції відповідає концентрації просочувального розчину (%)

В кінцевому вигляді залежність відносної концентрації антипіренів $P(C, h)$ від глибини h (відстані від поверхні деревини) та концентрації C просочувального розчину буде мати тривимірний вигляд, як показано на рис. 3. Отриманий вираз (1) дає можливість знайти формулу оптимальної концентрації робочого розчину, шляхом вирішення рівняння відносно C :

$$\frac{d}{dC} \left\{ \int_0^{\infty} a(C) \cdot \exp[-b(C) \cdot h] dh \right\} = 0, \quad (4)$$

при якій досягається максимальна площа перетину (рис.3), що відповідає максимальній кількості антипіренів в поверхневих шарах деревини:

$$C_{opt} = - \frac{\sqrt{b_2 \cdot (b_2 \cdot a_0^2 - b_1 \cdot a_0 \cdot a_1 + b_0 \cdot a_1^2)} - b_2 \cdot a_0}{b_2 \cdot a_1} \quad (5)$$

Для оцінки *охолоджувального ефекту* від використання ВБЗР запропонована математична модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині (заболонь сосни) при її нагріванні до настання фази полум'яного горіння, що описує залежність основних енергетичних характеристик від часу нагрівання на основі розрахунку змін фізичних характеристик складових речовин деревини та летких продуктів розкладу в умовах адіабатичного нагрівання.

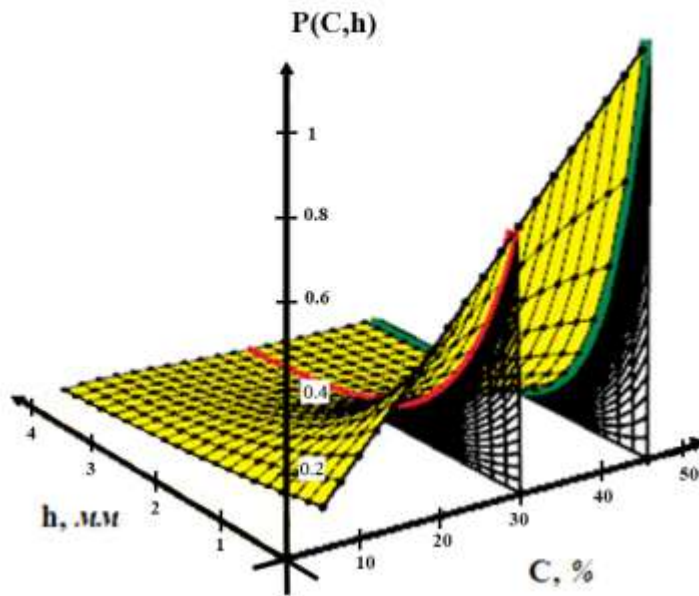


Рис. 3 - Залежність відносної концентрації антипіренів $P(C, h)$ від глибини h (відстані від поверхні деревини) та процентної концентрації C просочувального розчину

Використано експериментальні дані дериватограми нагрівання зразка деревини та дані газохроматографічного аналізу. Зміна сумарної накопиченої поглинутої питомої енергії зразка деревини при підвищенні температури на ΔT описується рівнянням:

$$\Delta E_w(T) = - \sum_{i=1}^{i=k(T)} \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T) + \sum_{j=1}^{j=n(T)} \frac{1}{v} \cdot c_j \cdot m_j(T) \cdot \Delta T, \quad (\text{Дж/м}^3), \quad (6)$$

де v елементарний об'єм зразка деревини, м^3 ; $m_i(T)$ – маса i -ої речовини, що утворилась в результаті нагрівання на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$ в елементарному об'ємі зразка деревини, кг ; ΔH_i – ентальпія утворення i – го компонента, (Дж/моль) ; mol_i – молярна маса i – го компонента, (кг/моль) ; $k(T)$ – кількість речовин, що утворилась в результаті нагрівання на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$; $m_j(T)$ – маса j – ої речовини, що існувала, або вже була утворена до температури T в елементарному об'ємі зразка деревини, кг ; c_j – питома теплоємність речовини, що існувала, або вже була утворена до температури T , $(\text{Дж/кг}\cdot\text{К})$; $n(T)$ – кількість речовин, що існувала, або вже була утворена до температури T ;

На основі отриманих даних була обчислена апроксимація функціональної залежності сумарної накопиченої поглинутої питомої енергії зразка від температури $E_w(T)$. Похідну від цієї функції по змінній T , тобто $c_{p_wood}(x, T) = dE_w/dT$, можна розглядати як ефективну теплоємність зразка деревини. Апроксимаційна функція, що відображає цю залежність використовується для вирішення задачі про нагрівання зразка деревини до моменту спалаху та ставиться у вигляді одновимірної задачі поширення тепла в зразку деревини, що має змінну температуру T та змінну ефективну

теплоємність $c_{p_wood}(x, T)$ по глибині зразка та у часі. Рівняння теплопровідності для цього випадку має вигляд:

$$c_{p_wood}(x, T(x, t)) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \chi(T) \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}, \quad (7)$$

де $c_{p_wood}(x, T(x, t))$ - ефективна теплоємність зразка деревини, (Дж/К·м³); $T(x, t)$ - поточна температура процесу, (К); $\chi(T)$ - коефіцієнт теплопровідності деревини, (Вт/м·К). Для випадку, коли волокна деревини орієнтовані поперек тепловому потоку (та вздовж поверхні деревини), коефіцієнт теплопровідності визначається:

$$\chi_{ac}(T) = \left(\chi_{n_ac} + \frac{\chi_{b_ac}}{T_b - T_n} \cdot (T - T_n) \right) \cdot H(T_b - T) + \chi_{d_ac} \cdot H(T - T_b), \quad \text{Вт/м·К}, \quad (8)$$

де T - поточна температура в елементі об'єму зразка деревини, T_b - температура кипіння, T_n - початкова температура, К;

χ_{n_ac} - коефіцієнт теплопровідності даного сорту деревини поперек волокон при заданій вологості та нормальній температурі (20°C);

χ_{b_ac} - коефіцієнт теплопровідності даного сорту деревини поперек волокон при заданій вологості та температурі кипіння води (100°C);

χ_{d_ac} - коефіцієнт теплопровідності даного сорту деревини поперек волокон в абсолютно сухому стані;

$H(\Delta T)$ - функція Хевісайда.

Початкові та граничні умови для цього випадку:

$$T(x \in [0, b], t = 0) = 20^\circ \text{C}; \quad \chi(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h, \text{ Вт/м}^2; \quad \chi(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=b} = 0, \text{ Вт/м}^2, \quad (9)$$

де h - зовнішній потік тепла (Вт/м²), b - товщина зразка (м).

Задача вирішується методом наближеної чисельної ітерації по схемі різниць першого порядку. Розрахунок ведеться у двовимірному просторі дискретних координат часу з індексом i та лінійної просторової координати з індексом j . Діаграма ітераційних формул представлена на рисунку 4.

У вузлах діаграми, кожен з яких являє собою певний елементарний об'єм j зразка деревини, взятий в певний момент часу i , вказані наступні параметри елементарного об'єму: i, j - номер вузла; $T_{i,j}$ - температура та $c_{i,j}$ - ефективна теплоємність елементарного об'єму j в момент часу i .

Отримані наступні формули для елементарного об'єму, що розташований безпосередньо на поверхні зразка деревини:

$$T_{i,1} = T_{i-1,1} + \omega \cdot \Delta t - \frac{\chi \cdot (T_{i-1,1} - T_{i-1,2})}{c_{p_wood}(T_{i-1,1}) \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta t, \quad (10)$$

де ω - енергетична характеристика теплового опромінення елементарного об'єму, що обчислюється за формулою:

$$\omega = \frac{h}{c_{p_wood}(T_{i-1,1}) \cdot \Delta x}, \text{ K/c.} \quad (11)$$

Для проміжних значень температури елементарних об'ємів, що розташовані всередині масиву матеріалу:

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + \frac{\chi \cdot (T_{i-1,j-1} - 2 \cdot T_{i-1,j} + T_{i-1,j+1})}{c_{p_wood}(T_{i-1,j}) \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta t \quad (12)$$

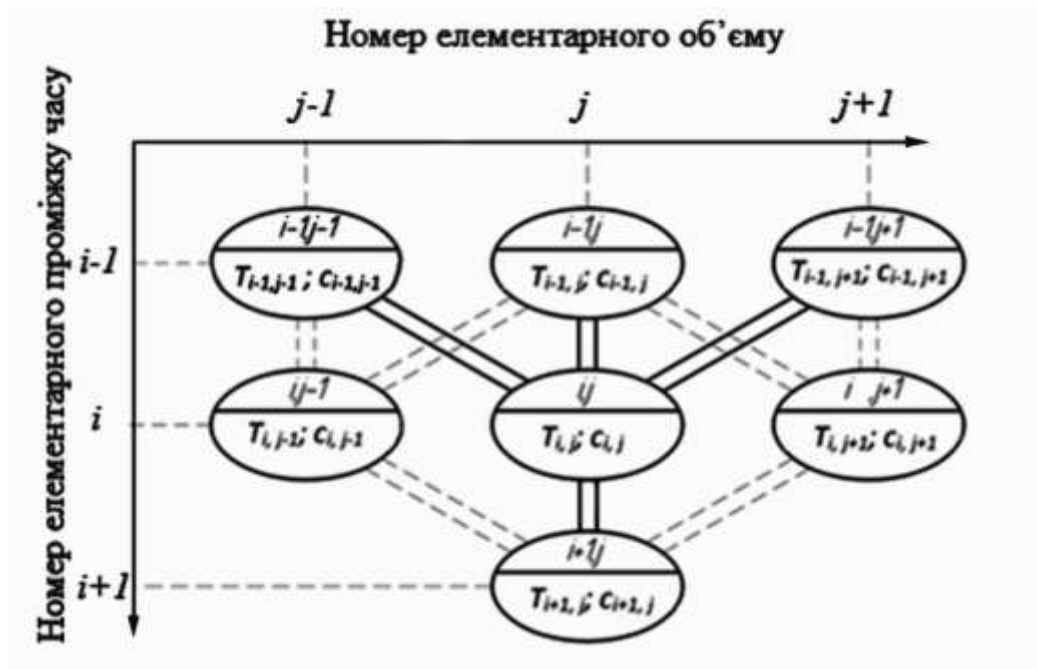


Рис. 4 - Діаграма розрахунку по ітераційним формулам.

Запропонована модель дозволяє визначити час від початку дії теплового потоку на необроблену деревину (різної породи, товщини тощо) до моменту займання (спалахування), що дає можливість оцінити ресурс часу для ліквідації осередку займання пожежного навантаження.

В подальшому проведено математичне моделювання охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого ВВБЗР. Запропонована математична модель, що описує залежність основних енергетичних характеристик від часу нагрівання на основі розрахунку змін фізичних характеристик складових речовин деревини, ВВБЗР та летких продуктів розкладу в умовах адіабатичного нагрівання та дає можливість оцінки охолоджувального ефекту від використання ВВБЗР у вигляді розрахованої різниці між часом спалахування необробленої та обробленої деревини.

На основі отриманих шляхом апроксимації функціональних залежностей енергетичних характеристик від температури вирішується одновимірна задача поширення тепла в зразку обробленої деревини зі

змінною температурою та змінною ефективною питомою теплоємністю по глибині зразка та у часі, з використанням методу наближеної чисельної ітерації по схемі різниць першого порядку.

Зміна сумарної накопиченої поглинутої питомої енергії антипірену при підвищенні температури на ΔT описується рівнянням:

$$\Delta E_{fr}(T) = - \sum_{i=1}^{i=k(T)} \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T) + \sum_{j=1}^{j=n(T)} \frac{1}{v} \cdot c_j \cdot m_j(T) \cdot \Delta T, \text{ (Дж/м}^3\text{)}, \quad (13)$$

де v елементарний об'єм зразка деревини, м³; $m_i(T)$ – маса i -ої речовини, що утворилась в елементарному об'ємі зразка деревини в результаті нагрівання на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$, кг; ΔH_i – ентальпія утворення i – го компонента, (Дж/моль); mol_i – молярна маса i – го компонента, (кг/моль); $k(T)$ – кількість речовин, що утворилась в результаті нагрівання на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$; $m_j(T)$ – маса j – ої речовини, що існувала, або вже була утворена до температури T в елементарному об'ємі зразка деревини, кг; c_j – питома теплоємність речовини, що існувала, або вже була утворена до температури T , (Дж/кг·К); $n(T)$ – кількість речовин, що існувала, або вже була утворена до температури T .

Ефективна питома теплоємність вогнезахисного просочення визначається за формулою:

$$c_{p-fr}(x, T) = \rho_{fr}(x) \cdot \frac{d}{dT} E_{fr}(T), \text{ (Дж/м}^3\text{·К)}, \quad (14)$$

де $\rho_{fr}(x)$ – відносна щільність розподілу вогнезахисного просочення в глибину зразка.

Рівняння теплопровідності для цього випадку має вигляд:

$$\{c_{p-wood}[x, T(x, t)] + c_{p-fr}[x, T(x, t)]\} \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \chi(T) \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}. \quad (15)$$

Початкові та граничні умови для даної моделі співпадають з умовами попередньої моделі.

Результати математичного моделювання вказують на істотний очікуваний охолоджувальний ефект від використання запропонованих антипіренів для вогнезахисту деревини, оскільки інтервал часу від початку теплового впливу до моменту початку полум'яного горіння вогнезахисленої деревини (обробленої ВВБЗР на основі фосфатів та сульфатів амонію) більше ніж в два рази більший порівняно з таким інтервалом для невогнезахисленої деревини (рис. 5).

Ефект інгібування реалізується при рекомбінації активних радикалів поблизу та на поверхні ВВБЗР. Інгібувальні властивості ВВБЗР досліджувались шляхом моделювання розрахунку енергетичних параметрів (електронегативності, потенціалу іонізації) іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів (ІМК, ІРК) активних центрів горіння (H_2 , H , O , H_2O , H_2O_2 , OH , CH_3 , CO тощо) з продуктами термічного розкладу ВВБЗР ($H_2PO_4^-$,

HPO_4^- , PO_3^- , PO^+ , P_2O^+ , P_2O_2^+ , P_2O_3^+ , та NH_4^+ , NH_2^- , NH^- , NO^+ , NO_2^+ тощо). Використано метод розрахунку ефективних зарядів атомів в ІМК та ІРК, що базується на концепції Лайнуса Полінга і на розширеному методі Хюккеля про вирівнювання електронегативності. Розраховано енергетичну міцність ($E_{\text{кул}}$) комплексів. Визначена вибірковість тяжіння кисневмісних та водневмісних активних центрів горіння (АЦГ) до фосфоровмісних або до азотовмісних сполук.

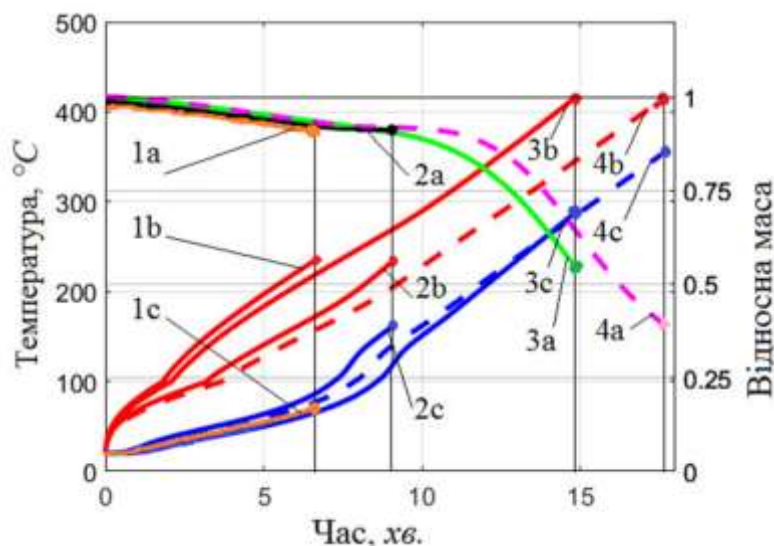


Рис. 5 - Порівняння результатів математичного моделювання хіміко-фізичних процесів в невогнезахищеній деревини (поперек волокон сімейство кривих 1a, 1b, 1c, та вздовж сімейство кривих 2a, 2b, 3c) та вогнезахищеній (поперек волокон - сімейство кривих 3a, 3b, 3c; та вздовж волокон - 4a, 4b, 4c) за інтенсивності опромінення в 40 кВт/м^2 . Криві, позначені літерою «а», описують залежність твёрдої відносної маси зразка від часу, літерою «b» - залежність температури зовнішньої поверхні зразка, яка опромінюється, літерою «с» - залежність температури задньої поверхні зразка, яка не перебуває під дією теплового опромінення

В результаті аналізу розрахунків $E_{\text{кул}}$ для ІМК, ІРК, що наведені в таблиці 1, можна стверджувати, що значення $E_{\text{кул}}$ дещо більші для комплексів фосфоровмісних речовин з водневмісними АЦГ, ніж для комплексів з кисневмісними АЦГ. Така ж залежність значень $E_{\text{кул}}$ для комплексів азотовмісних речовин, що наведено в таблиці 2. Це дозволяє прогнозувати, що при використанні сумішей фосфоровмісних речовин та азотовмісних речовин з'явиться вибірковість тяжіння кисневмісних АЦГ (O' , $\text{O}'\text{H}$, HO_2' тощо) та водневмісних АЦГ (H' , OH' , $\text{C}'\text{H}_3$, $\text{C}'\text{H}_2$ тощо) до різних продуктів термічного розкладу запропонованих речовин, що в результаті може призвести до підвищення ефективності як гомогенного, так і гетерогенного інгібування ланцюгових реакцій горіння різних органічних речовин, тобто до ефекту синергізму.

Таблиця 1

Значення $E_{\text{кул}}$ для фосфоровмісних ІМК, ІРК

ІМК, ІРК з кисневмісними АЦГ		ІМК, ІРК з водневмісними АЦГ	
Комплекс	$E_{\text{кул}}$, ккал/моль	Комплекс	$E_{\text{кул}}$, ккал/моль
$P_2O_2^+ \cdot O_2$	17,1	$P_2O_2^+ \cdot CH_4$	39,7
$HPO_4^- \cdot O_2$	21,3	$HPO_3^- \cdot CH_4$	48,1
$PH_4^+ \cdot H_2O$	14,0	$HPO_3^- \cdot H_2$	73,1
$PO_3^- \cdot H_2O_2$	13,8	$PO_3^- \cdot H_2$	78,4
$PH_4^+ \cdot O_2$	27,3	$PO_2^+ \cdot H_2$	76,3
$H_2PO_4^- \cdot O$	23,7	$P_2O_2^+ \cdot H$	79,1
$HPO_4^- \cdot O$	22,1	$HPO_4^- \cdot H$	43,1
$P_2O_2^+ \cdot O$	14,3	$PO^+ \cdot H$	37,7
$PO_3^- \cdot O$	14,1	$PO_3^- \cdot H$	34,1
$PO_3^- \cdot OH$	21,2	$HPO_4^- \cdot CH_3$	69,8
$PH_4^+ \cdot OH$	31,3	$HPO_4^- \cdot CH_3$	58,1
$PO^+ \cdot OH$	35,3	$PO_3^- \cdot CH_2$	38,2
$PO_2^+ \cdot OH$	28,7	$HPO_4^- \cdot CH_2$	48,3
$H_2PO_4^- \cdot CO$	37,9	$H_2PO_4^- \cdot CH$	57,4
$PO_3^- \cdot CO$	33,1	$PO_2^+ \cdot CH$	43,7

Таблиця 2

Значення $E_{\text{кул}}$ для азотовмісних ІМК, ІРК

ІМК, ІРК з кисневмісними АЦГ		ІМК, ІРК з водневмісними АЦГ	
Комплекс	$E_{\text{кул}}$, ккал/моль	Комплекс	$E_{\text{кул}}$, ккал/моль
$NH_4^+ \cdot H_2O_2$	19,7	$NH_4^+ \cdot CH_4$	9,4
$NO^+ \cdot O_2$	14,6	$NO^+ \cdot CH_4$	21,3
$NH_4^+ \cdot H_2O$	20,8	$NO^+ \cdot H_2$	9,2
$NO_2^+ \cdot H_2O_2$	19,7	$NH_2^- \cdot H_2$	30,7
$NH_3 \cdot H_2O_2$	21,4	$NH^- \cdot H_2$	32,3
$NO^+ \cdot O$	13,9	$NH^- \cdot H$	47,8
$NH^- \cdot O$	18,3	$NO^+ \cdot H$	54,7
$NH_2^- \cdot O$	21,3	$NH_3 \cdot H$	63,1
$NH_3 \cdot O$	33,4	$NH_2^- \cdot H$	79,7
$NH_4^+ \cdot OH$	31,7	$NH_4^+ \cdot CH_3$	54,3
$NH_3 \cdot OH$	43,2	$NH^- \cdot CH_3$	9,8
$NH^- \cdot OH$	31,3	$NH_4^+ \cdot CH_2$	92,3
$NO^+ \cdot OH$	18,3	$NO^+ \cdot CH_2$	43,8
$NH_4^+ \cdot CO$	31,7	$NH^- \cdot CH$	33,7
$NH_2^- \cdot CO$	27,3	$NH_2^- \cdot CH$	63,1

Ефект флегматизування (розбавлення горючої газової суміші негорючими газами) реалізується при термічному розкладі азотовмісних речовин із компонентного складу ВВБЗР.

Ефект ізолювання доступу молекул кисню і води в капілярно-пористу структуру вогнебіо захищеної деревини досягається нанесенням плівки

полігексаметиленгуанідінгідрофосфату (ПГМГФ) на її поверхню. При цьому плівка ПГМГФ стає й дифузійним бар'єром для висолювання антипіренів з деревини. Фото на рис. 6 наочно свідчить про суттєву різницю в інтенсивності протікання процесів висолювання при порівнянні зразків деревини, вогнебіо захищених з використанням ВВБЗР БС-13 ((а), без додаткового бар'єра на поверхні деревини) та ВВБЗР ДСА-1М ((б), з полімерною плівкою антисептика).



Рис. 6 - Зовнішній вигляд зразків деревини, оброблених ВВБЗР:

а) БС-13 (ВВБЗР, що традиційно використовувалась);

б) ДСА-1М (запропонована ВВБЗР).

Полімерна плівка ПГМГФ під час розчинення у воді проходить стадію гелеутворення. Отже, полімер, що знаходиться на поверхні деревини, при надходженні молекул води перетворюється на гідрогель. Гідрогель постачатиме воду до твердих антипіренів у поверхневому шарі деревини.

Уявлення про процес висолювання антипіренів можна отримати за представленою схемою на рис. 7: $Z(\tau)$ - координата фронту фазового перетворення в момент часу τ ; 1 – зовнішнє середовище; 2 – зона з речовиною, що утворює гідрогель та розчинюється; 3 – зона з твердою речовиною (антипіреном); h – товщина зразка вогнезахищеної деревини.

Якщо $\eta(x, \tau)$ - концентрація води в точці x в момент часу τ , то коефіцієнт дифузії в області 2: $D_2 = a \cdot \eta(x, \tau)$, де a - коефіцієнт пропорційності. Тоді рівняння дифузії вогнезахисної речовини в області 2 приймає вигляд:

$$a \cdot \eta(x, \tau) \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} = \frac{\partial C_2}{\partial \tau}. \quad (16)$$

У початковий момент часу розподіл концентрацій речовини по областях буде таким:

$$C_1(x, 0) = C_{min}; C_3(x, 0) = C_{max}; Z(0) = 0. \quad (17)$$

Дані умови означають, що в момент $\tau=0$ вся речовина рівномірно розподілена у просоченому шарі деревини, зона з розчиненою гелеподібною речовиною ще не утворилась.

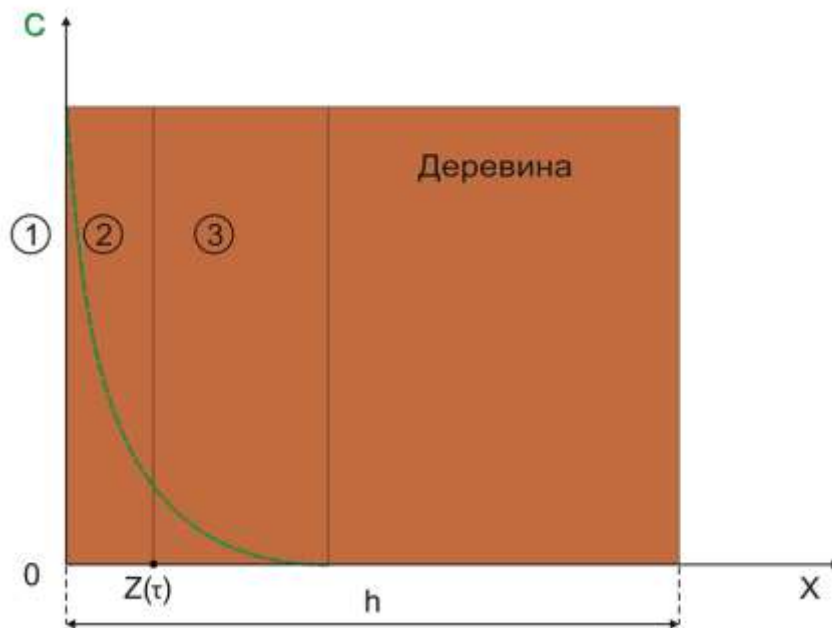


Рис. 7 – Графічне представлення феноменологічної моделі процесу висолювання антипірену з вогнебіо захищеної деревини

Область 2 можна розбити на N відліків по координаті та аналізувати концентрацію C . Використання дискретизованих виразів для похідних концентрації дозволяє чисельно розв'язувати задачу про розподіл концентрацій вогнезахисної речовини (антипірену) в деревині.

Закон розподілу концентрації води вглиб зразка у більшості випадків носить нелінійний характер. Показано, що найбільш відповідним розподілом концентрації є експоненційний:

$$\eta(x, \tau) = \eta_0 e^{-b \cdot x}. \quad (18)$$

Параметр η_0 визначає значення концентрації вологи безпосередньо біля поверхні зразка, параметр $b(\tau)$ відповідає за величину спадання концентрації вглиб зразка.

Рівняння переносу вогнезахисної речовини в області 2 для такої моделі перенесення вологи набуває вигляду:

$$a \eta_0 e^{-b \cdot x} \frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} = \frac{\partial C_2}{\partial \tau}. \quad (19)$$

Обробляючи результати експериментальних вимірювань, значення η_0 та $b(\tau)$ приводять у відповідність до властивостей матеріалу та навколишніх умов.

Проведені дослідження за наведеною схемою довели, що використання гелеутворюючих антисептиків значно уповільнює дифузійні процеси у

вогнебіо захищеній деревині. Коефіцієнт дифузії зменшується на п'ять порядків: з $D_{\text{еф}} = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – для деревини, захищеної традиційними сольовими антипіренами, до $D_{\text{еф}} = 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ – для деревини, захищеної сольовими антипіренами в композиції з нанесенням плівки полімерного антисептика.

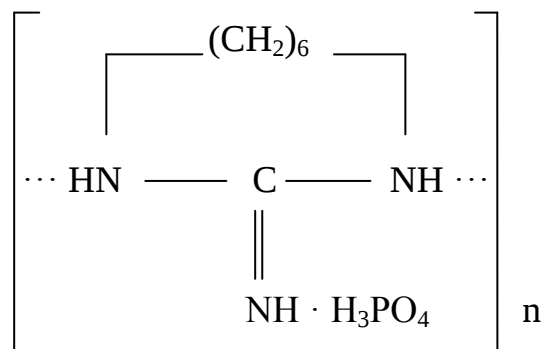
Отже, теоретичними дослідженнями обґрунтована перспективність застосування ВВБЗР для пасивного і активного протипожежного захисту як таких, що здатні реалізовувати повний комплекс вогнезахисних та вогнегасних ефектів на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ. Зокрема, запропонована математична модель розподілу антипіренів при просоченні деревини, за допомогою якої визначається оптимальна концентрації просочувального розчину для максимального насичення антипіренами поверхневих шарів деревини при поверхневому просоченні. Використання наведеної моделі придатне для вогнебіо захисних засобів, що використовуються при вогнезахисті дерев'яних елементів горищних покриттів будівель та споруд відповідно до вимог державних будівельних норм в Україні. Математичним моделюванням хіміко-фізичних процесів, що відбуваються у звичайній та вогнезахисній деревини при її нагріві до моменту займання, визначено доцільність використання в складах ВВБЗР сумішей сульфатів та фосфатів амонію, а розрахунками енергетичної міцності ІМК та ІРК показана можливість синергетично підбору цих компонентів в складах захисних речовин для ЦВМ. Моделюванням процесу висолювання антипіренів з просоченої деревини визначено, що полімерні антисептики можуть служити ефективним бар'єром для цього процесу, що сприятиме як посиленню вогнезахисних ефектів від дії антипіренів, так і збереженню необхідного рівня вогнезахисту протягом терміну експлуатації дерев'яних конструкцій.

У третьому розділі «Розроблення методу пасивного протипожежного захисту об'єктів шляхом використання водних вогнебіо захисних речовин» наведено сутність запропонованого методу пасивного протипожежного захисту об'єкта (ППЗО) із використанням ВВБЗР, що забезпечує вогнезахист деревини, тканин, паперу, очерету.

Розроблено загальні вимоги до ВВБЗР для деревини, а саме: вони повинні характеризуватись здатністю до реалізації зазначених ефектів, тому у своєму складі повинні мати антипірени (сполуки з атомами азоту і фосфору) та ізолювальний полімерний антисептик; за своєю ефективністю вогнезахисту деревини повинні відповідати першій групі (за ГОСТ 16363); повинні характеризуватись здатністю до зменшення поширення полум'я поверхнею; повинні характеризуватись здатністю до зменшення димоутворення; повинні характеризуватись здатністю до зменшення токсичності продуктів горіння; деревина, що оброблена ВВБЗР, повинна відповідати вимогам щодо корозійної дії на чорні метали.

Розроблено модифікації екологічно безпечні ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М, що складаються з водного розчину антипірену (синергетичної суміші

діамоній фосфату (ДАФ) і сульфату амонію (СА)) та водного розчину (окремо) полімерного антисептика полігексаметиленгуанідінгідрофосфату, який має структурну формулу:



ПГМГФ у своєму складі має атоми азоту і фосфору, що пояснює наявність ендотермічних ефектів, які досліджено методами термогравіметричного аналізу.

Дані таблиці 3 свідчать про можливість надання деревині необхідного рівня біозахисту шляхом її оброблення ПГМГФ.

Таблиця 3

Динаміка біообростання дерев'яних брусків, оброблених антипіреном та антисептиком з ПГМГФ

№ серії зразків	Ступінь біообростання за датами (2008 р.)							
	19.07	2.08	13.08	25.08	30.08	6.09	10.09	17.09
Антипірен	—	+	++	++	+++	+++	+++	+++
ДСА-1М	—	—	—	—	+	+	+	+
ДСА-2М	—	—	—	—	—	—	—	—
Примітка: „—” – біообростання відсутнє; „+” – слабе біообростання; „++” – середнє біообростання; „+++” – сильне біообростання.								

Ефект охолодження деревини при застосуванні ВВБЗР ДСА-1М (ДСА-2М) встановлено термогравіметричними дослідженнями: наявний екзоефект при температурі близько 235 °С при випробуванні незахищеної деревини, та відсутність такого ефекту в цьому діапазоні температур у вогнебіо захищеної деревини, натомість є виражений ендотермічний ефект при температурі близько 260 °С.

Ефект інгібування досліджено шляхом встановлення залежності інтенсивності випромінювання ОН-радикалів від концентрації розчинів солей (антипіренів) при їх різних мольних співвідношеннях у сумішах (рис. 8). Встановлено ефект синергізму при інгібуванні полум'я у разі використання фосфатів та сульфатів амонію у співвідношенні 2 до 1, відповідно.

Ефект флегматизування досліджено шляхом газохроматографічних досліджень складу газоподібних продуктів термічної деструкції незахищеної деревини (сосни) та двоміліметрового поверхневого шару деревини,

вогнебіо захищеної робочими розчинами ВВБЗР (табл. 4). Результати досліджень свідчать, що в газовій суміші, яка утворюється при термодеструкції деревини, вогнебіо захищеної ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М, міститься значно менше горючих газів, а кількість азоту збільшується, що підтверджує утворення зафлегматизованої газової суміші.

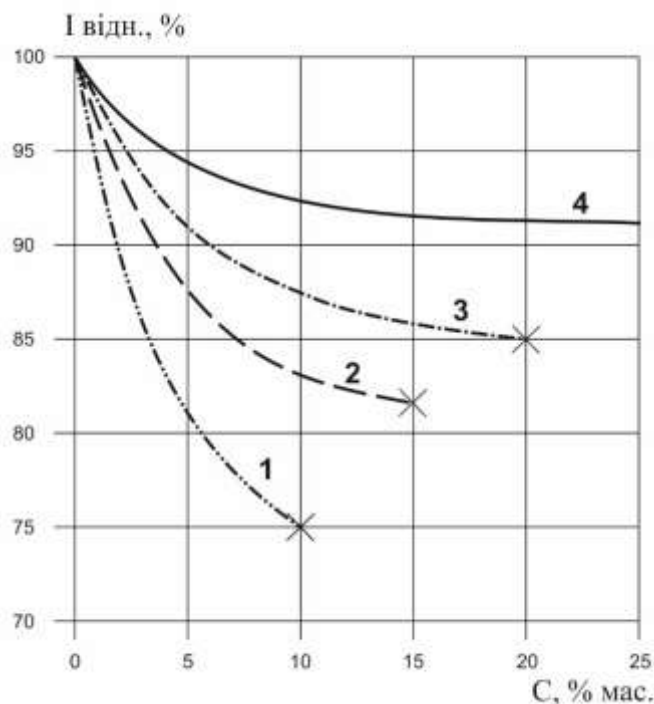


Рис. 8 - Залежність відносної інтенсивності випромінювання ОН-радикалів від концентрації розчинів солей та їх мольних співвідношень у суміші, що подається в пальник:
 1 - $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (2:1); 2 - $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$;
 3 - $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (1:1); 4 - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Таблиця 4

Якісний та кількісний склад газоподібних продуктів термічної деструкції 2 мм поверхневого шару соснової деревини, невогнезахищеної та вогнезахищеної різними ВВБЗР

Речовини	Вміст речовин у летких продуктах деструкції, %				
	Незахищена деревина (сосна)	Деревина, оброблена ВВБЗР МС (антипірен – суміш фосфатів та сульфатів амонію, антисептик – фторид натрію)	Деревина, оброблена антипіреном – сумішю фосфатів та сульфатів амонію	Деревина, оброблена ВВБЗР ДСА-1М (антипірен – суміш фосфатів та сульфатів амонію, антисептик – ПГМГФ (1%))	Деревина, оброблена ВВБЗР ДСА-2М (антипірен – суміш фосфатів та сульфатів амонію, антисептик – ПГМГФ (2%))
CO	38,96	19,1	16,3	14,38	11,01
CO ₂	54,28	2,4	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
CH ₄	5,08	1,6	0,61	Сліди	Не виявлено
C ₂ H ₆ +C ₂ H ₄	0,37	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
C ₃ H ₈	0,21	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
C ₃ H ₆	0,28	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
H ₂	0,72	0,58	0,38	0,14	0,09
O ₂	0,28	0,18	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
N ₂	0,92	76,24	82,71	85,48	88,90

Ефект ізолювання теж спостерігається за результатами газохроматографічних досліджень: відсутній кисень у газовій суміші, що є продуктом термодеструкції вогнебіо захищеної деревини. Але головним акцентом при проведенні аналізу щодо реалізації цього ефекту є встановлення бар'єра для процесу висолювання антипіренів з вогнебіо захищеної деревини під час її експлуатації. Отримані результати засвідчують, що процес висолювання практично призупинений: концентрація антипіренів в різних шарах деревини залишається постійною. Ці дані опосередковано підтверджуються експериментальними дослідженнями з визначення ефективності вогнезахисту. Протягом 12 років, щорічно, досліджувався ступінь вогнезахисту деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-1М та МС (рис. 9). З рисунка видно, що обробляння деревини ДСА-1М забезпечує достатній рівень вогнезахисту деревини протягом 12 років, а обробляння ВВБЗР МС забезпечує нормативний рівень вогнезахисту лише протягом одного року.

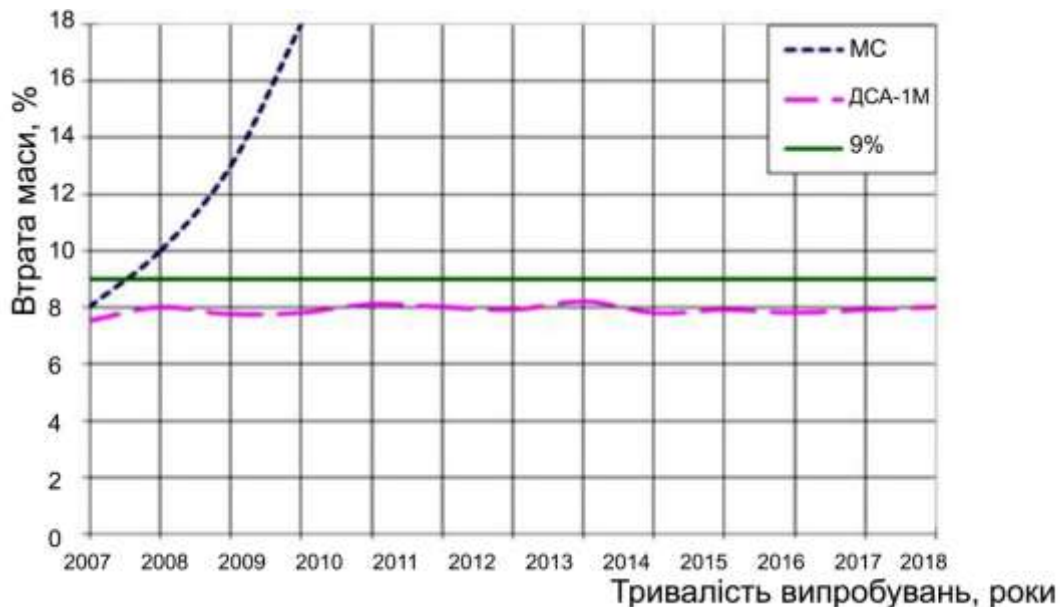


Рис. 9 - Зміна вогнезахисної ефективності ВВБЗР ДСА-1М і МС (за показником втрати маси) залежно від тривалості натурних випробувань (II категорія розміщення)

Розроблено модифікації оптимальних складів ВВБЗР для деревини (ДСА-1М, ДСА-2М), які складаються з водного розчину антипірену (синергетичної суміші діамонійфосфату (ДАФ) та сульфату амонію (СА)) і водного розчину (окремо) полімерного антисептика. Вплив складу ДСА-1М, ДСА-2М на процеси займання, поширення полум'я і припинення горіння досліджено з використанням стандартизованих методів і методик за ГОСТ 16363, ГОСТ 30219, ГОСТ 12.1.044 під час лабораторних випробувань, а також сертифікаційних випробувань продукції. Результати сертифікаційних випробувань з визначення групи вогнезахисної ефективності ДСА-1М наведені в таблиці 5. Всі десять зразків показали втрату маси менше 9%, тому

ДСА-1М відповідає І групі вогнезахисної ефективності і вимогам пункту 6.23 ДБН В.1.1-7-2016 *Пожежна безпека об'єктів будівництва*.

Визначено, що при якісному вогнебіозахисному оброблянні деревини необхідний рівень вогнезахисту зберігається протягом значного часу експлуатації (І група ефективності вогнезахисту зберігається протягом 12 років). Це стало можливим завдяки влаштування бар'єру для висолювання антипіренів у вигляді нанесення на поверхню деревини полімерної плівки антисептика. Зазначений ефект також підтверджується відсутністю динаміки в значеннях концентрації антипіренів, що вимірювалась на різній глибині поверхневого шару просочених вогнезахисних зразків під час експлуатації (протягом 12 років). Експериментальні дані засвідчують, що залежність концентрації від глибини вимірювання має експоненційний характер, що підтверджує адекватність феноменологічних моделей процесів просочення деревини антипіренами і висолювання антипіренів з деревини, представлених в другому розділі.

Таблиця 5

Результати випробувань зразків деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-1М

№ зразка для випробувань	Маса зразка, г				Поглинання вогнезахисного засобу в перерахунку на суху речовину R_1 , г/м ²	Втрата маси зразка після випробувань Δm , %
	до просочення m_0	перед випробуванням m_1	після випробування m_2	Поглинання вогнезахисного засобу, г/м ²		
1	127,7	133,0	124,5	553,6	166,1	6,39
2	127,0	131,9	126,4	571,9	171,6	2,65
3	129,1	134,4	125,7	534,0	160,2	6,47
4	127,6	132,3	122,8	517,0	155,1	7,18
5	128,4	133,4	124,7	537,6	161,3	6,52
6	130,7	135,9	126,4	537,6	161,3	6,99
7	128,1	133,0	125,9	547,7	164,3	5,34
8	129,1	134,2	126,6	553,3	166,0	5,66
9	128,5	133,3	127,1	547,4	164,2	4,65
10	128,9	134,3	125,1	586,3	175,9	6,85
Середнє арифметичне значення				548,6	164,6	5,87

В приміщеннях з масовим перебуванням людей повинні застосовуватись матеріали з помірною димоутворювальною здатністю (відповідно до діючих норм). Оскільки звичайна деревина є матеріалом з високою димоутворювальною здатністю, то без спеціального оброблення вона не може бути застосована на таких об'єктах. Проведені випробування за методом визначення коефіцієнта димоутворення, сутність якого полягає у визначенні оптичної густини диму, який утворюється при полум'яному горінні або тлінні зразка твердого матеріалу певної кількості. Коефіцієнт димоутворення (D_m) в м²/кг визначається за формулою:

$$D_m = \frac{V}{L \times m} \ln \frac{T_0}{T_{\min}}, \quad (20)$$

де V - об'єм камери вимірювання, $V = (0,664 \pm 0,004) \text{ м}^3$;
 L - шлях проходження променя світла у диму, $L = (0,800 \pm 0,002) \text{ м}$;
 m - маса зразка, кг;
 T_0 , $T_{\min}$ - відповідно значення початкового та кінцевого світлопропускання, %.

Таблиця 6

Результати випробувань з визначення коефіцієнта димоутворювальної здатності зразків деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-2М

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)	1	2,78	100	93	22,39
	2	2,74	100	92	25,56
	3	2,68	100	93	21,50
	4	2,71	100	94	19,53
	5	2,59	100	94	19,31
Середнє значення коефіцієнта димоутворення, м ² /кг			21,66		
Тління (35 кВт/м ²)	1	2,58	100	81	66,80
	2	2,62	100	81	65,57
	3	2,59	100	84	55,13
	4	2,60	100	83	58,20
	5	2,63	100	81	68,18
Середнє значення коефіцієнта димоутворення, м ² /кг			62,78		

Дані таблиці 6 свідчать, що середні значення коефіцієнта димоутворення як в режимі горіння, так і в режимі тління, значно менше 500 м²/кг. Таким чином деревина, просочена ВВБЗР ДСА-2М, класифікується як матеріал з помірною димоутворювальною здатністю.

Статистичні дослідження свідчать, що більше 70% загальної кількості загибелі людей на пожежах спричинено отруєнням продуктами горіння. Отже, важливим напрямком підвищення безпеки людей є застосування матеріалів, що мають низький рівень показників токсичності продуктів горіння. Проведені токсикологічні випробування, метою яких є визначення показника токсичності (H_{CL50}), що характеризується як відношення кількості матеріалу до одиниці об'єму замкнутого простору, продукти згоряння якого викликають загибель 50% піддослідних тварин, в двох температурних режимах. Рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин (таблиця 7) свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений головним чином дією оксиду вуглецю (II). Кількісні значення дозволяють класифікувати вогнезахищену деревину за токсичністю продуктів горіння як матеріал помірної токсичності, на відміну від необробленої деревини, що є високотоксичним матеріалом.

В нормативно-технічній літературі початкова стадія розвитку пожежі (ПСРП) $\tau_{\text{ПСРП}}$ фіксується переходом від локальної до об'ємної пожежі, тобто моментом охоплення полум'ям всієї поверхні пожежного навантаження, і визначається рівнянням:

$$\tau_{\text{ПСРП}} = \left(\frac{F_{\text{п}}}{\pi U_{\text{п}}^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

де $F_{\text{п}}$ - площа пожежного навантаження, (м^2), $U_{\text{п}}$ - швидкість поширення полум'я в ПСРП, (м/с).

Таблиця 7

Результати токсикологічних випробувань деревини,
обробленої ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М

400°C				750°C			
ДСА-1М		ДСА-2М		ДСА-1М		ДСА-2М	
H_{CL50} , г/м ³	HbCO, %	H_{CL50} , г/м ³	HbCO, %	H_{CL50} , г/м ³	HbCO, %	H_{CL50} , г/м ³	HbCO, %
61,6	64,3	72,8	61,8	67,4	61,9	81,8	56,9

Отже, враховуючи можливість зменшення швидкості поширення полум'я поверхнею за рахунок обробляння деревини ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М (індекс поширення полум'я поверхнею дорівнює нулю), створюються передумови значного подовження часу ПСРП.

Проведені дослідження формують уявлення про реалізацію комплексу ефектів охолодження, ізолювання, флегматизування та інгібування в процесі вогнебіозахисту деревини, що дозволило представити феноменологічний опис цього процесу. По досягненню значення температури 150 °С плавиться суміш ДАФ та СА з інтенсивним утворенням негорючих газів, які флегматизують газові продукти термодеструкції макромолекул целюлози. Розплав плівки антипіренів додатково ізолює вогнезахищений шар деревини від доступу кисню з повітря навколишнього середовища. За наявності джерела займання при температурі приблизно 235 °С на поверхні необробленої деревини утворюється газоповітряна суміш, яка загоряється. Натомість вогнебіозахищена деревина не загоряється, оскільки газоповітряна суміш зафлегматизована негорючими газами, а продукти терморозкладу фосфоро- та азотовмісних сполук інгібують ланцюгові реакції окиснення газоподібних продуктів термічного розкладу деревини. Тільки при досягненні температури 400÷410 °С загоряються газоподібні продукти на поверхні деревини, але при цьому не утворюється джерело займання у вигляді жару (конденсоване горіння). При відстороненні джерела займання горіння газоповітряної суміші припиняється. Без джерела займання горіння газоповітряної суміші може відбутися в умовах самозаймання, коли середньооб'ємна температура навантаження досягне приблизно 580 °С, що може відбутися вже поза ПСРП.

Таким чином, оброблення деревини розробленими ВВБЗР дозволяє отримати матеріал, який класифікується за показниками пожежної небезпеки: Г1 (низької горючості), РП1 (не поширює полум'я поверхнею), Д2 (з помірною димоутворювальною здатністю), Т2 (помірної токсичності). Оброблена деревина стає стійкою до біоруйнування та відповідає нормативним вимогам щодо корозійної дії на чорні метали. Таким чином, ВВБЗР, розроблених складів, відповідають повною мірою встановленим вимогам.

В подальшому дослідження зосереджено на завданні вогнезахисту легкозаймистих ЦВМ: тканин, паперу, очерету. Враховуючи особливості структури зазначених матеріалів, теоретичні дослідження другого розділу, досвід розроблення ДСА-1М та ДСА-2М, сформульовані такі вимоги до ВВБЗР: вони повинні характеризуватись здатністю до реалізації ефектів охолодження, інгібування, ізолювання, флегматизування; у своєму складі повинні мати антипірени (сполуки з атомами азоту і фосфору); за своєю ефективністю вогнезахисту повинні характеризуватись здатністю до переведення тканин, паперу, очерету в групу важкозаймистих матеріалів; повинні мати властивості поверхнево-активних речовин для сприяння «обгортанню» волокон вогнебіозахисною речовиною; повинні характеризуватись здатністю до зменшення димоутворення; повинні характеризуватись здатністю до зменшення токсичності продуктів горіння; повинні мати антисептичні властивості.

На виконання зазначених вимог використано полігексаметиленгуанідин-гідрофосфат карбаміду (ПГМГФК), в якому використано співвідношення ортофосфорної кислоти до карбаміду як 2:1.

ПГМГФК ідентифіковано методами ІЧ-спектроскопії, мікроскопії, термогравіметрії. Мікроскопічними дослідженнями встановлено полімерну природу ПГМГФК на відміну від кристалів фосфата карбаміду.

Визначено, що термодеструкція тканин, паперу, очерету відбувається в діапазоні температур $150 \div 300$ °С. Реалізація *охолоджувального ефекту* при застосуванні для вогнебіозахисту ПГМГФК підтверджується дериватографічними дослідженнями (рис. 10): спостерігається виражений ендоефект в діапазоні температур $140 \div 310$ °С, який протидіє термодеструкції матеріалів. Водний розчин ПГМГФК (ФСГ-1М) концентрації $20 \div 24$ % використовується для захисту тканин і паперу, а $25 \div 28$ % - для захисту очерету.

Ефект флегматизування досліджено шляхом газохроматографічного аналізу продуктів термодеструкції необроблених та оброблених ВВБЗР ФСГ-1М тканин і паперу (табл. 8). Результати вказують на зменшення кількості горючих газів (CO , CH_4 , H_2 та інш.), а також на збільшення кількості азоту в газових продуктах термодеструкції вогнебіозахищених матеріалів, що вказує на їх зафлегматизованість. Зважаючи на це, можна зробити висновки і про реалізацію *інгібувального та ізолювального ефектів*, оскільки кількість кисню в продуктах деструкції зменшується в 3-4 рази. На рис. 11

представлено фото зразків тканини та очерету до та після випробувань на займистість і горючість, відповідно.

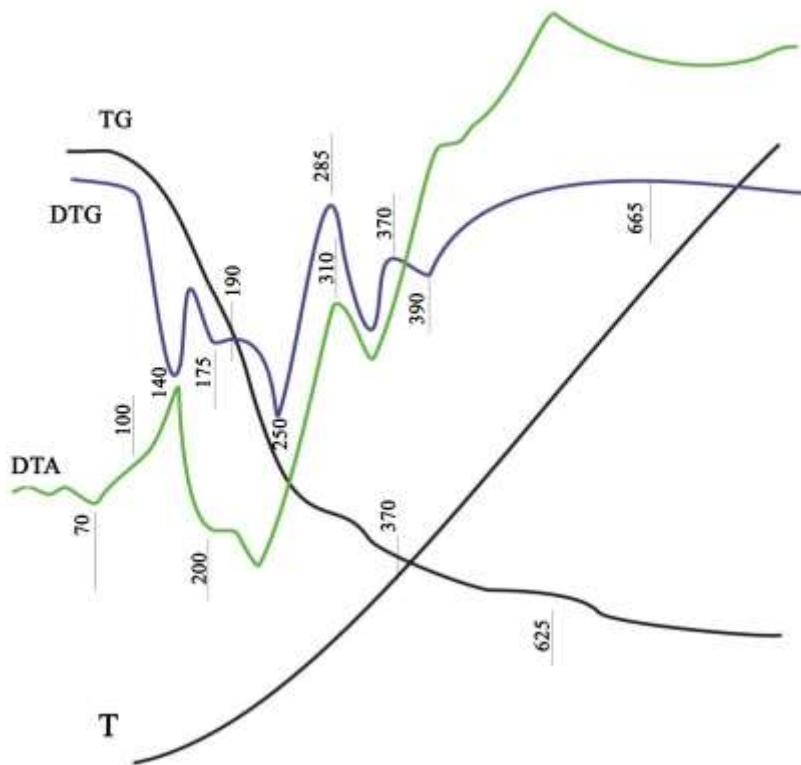


Рис. 10 – Криві дериватографічного аналізу ПГМГФК

Таблиця 8

Результати газохроматографічного аналізу продуктів термічної деструкції тканин і паперу (необроблених та оброблених ПГМГФК (ФСГ-1М))

Речовини	Вміст речовин в летких продуктах деструкції, %					
	Папір		Тканина з бавовни		Тканина з поліефіру	
	необроблений	оброблений	необроблена	оброблена	необроблена	оброблена
CO	46,56	1,32	38,53	0,98	21,93	0,41
CO ₂	35,31	69,13	41,11	68,01	30,04	39,18
CH ₄	7,83	0,21	9,82	0,68	0,27	0,05
C ₂ H ₆ + C ₂ H ₄	0,72	0,98	0,23	-	0,61	0,18
C ₃ H ₈	0,32	0,33	0,05	-	0,04	0,31
C ₃ H ₆	0,35	0,21	-	-	-	-
H ₂	5,15	0,18	6,93	0,31	3,97	1,18
O ₂	0,78	0,35	0,71	0,3	0,61	0,43
N ₂	2,98	27,29	2,62	29,79	42,53	58,67

За результатами досліджень представлено феноменологічну модель процесу вогнезахисту тканин, паперу, очерету з використанням ВВБЗР ФСГ-1М, яка розкриває суть впливу якісного і кількісного складу на процеси займання, поширення полум'я та припинення горіння вогнебіо захищених тканин і паперу, що дозволяє їх класифікувати за показниками пожежної небезпеки як матеріали: В1 (важкозаймисті), РП1 (не поширюють полум'я поверхнею), Т2 (помірнотоксичні), Д2 (помірної димоутворювальної здатності), що відповідає встановленим вимогам.

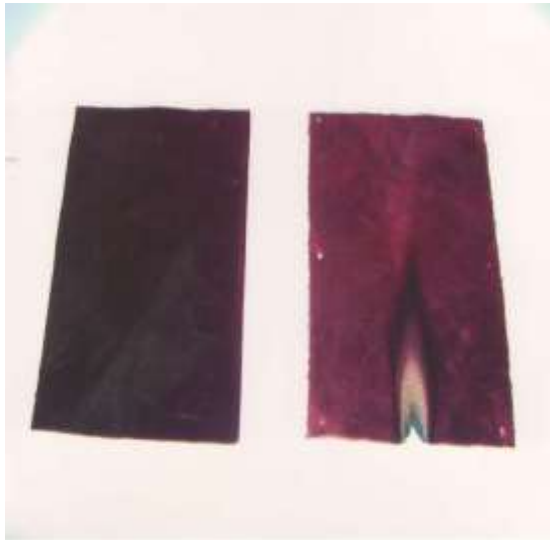


Рис. 11 – Зовнішній вигляд зразків тканини та очерету до та після випробувань на займистість і горючість

У четвертому розділі «Розроблення методу активного протипожежного захисту об'єктів шляхом використання водних вогнебіозахисних речовин в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння на початковій стадії розвитку пожежі» наведено результати створення відповідного методу активного ППЗО. Розроблено вимоги до ВВБЗР. Речовина заряду повинна:

- мати властивості, що сприятимуть змочуванню рідких поверхонь під час гасіння речовин пожежі класу В;
- мати властивості, що сприяють унеможливленню повторного займання матеріалів пожеж класу А;
- мати поверхневий натяг, нижчий порівняно з водою, що забезпечить краще змочування твердої поверхні, на яку подається водна вогнебіозахисна речовина;
- забезпечувати реалізацію вогнегасних ефектів: охолодження, ізолювання, флегматизування та інгібування;
- мати реологічні властивості, які забезпечують вищу порівняно з водою дисперсність за однакових умов розпилення струменя;
- мати більшу в'язкість порівняно з водою, або мати гелеутворювальну здатність для зменшення стікання водної вогнебіозахисної речовини з вертикальних та похилих поверхонь;
- мати показник корозійної активності не більше $1 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с);
- мати температурний діапазон експлуатації від -5 °С до +50 °С;

Реологічними дослідженнями водного розчину ПГМГФК встановлено: речовина є неньютонівською рідиною зі слабо вираженими псевдопластичними властивостями, які описуються законом Оствальда-де-Віля; в'язкість цієї рідини значна при малих швидкостях, але з подальшим ростом градієнта швидкості в'язкість зменшується; струмінь розчину довше зберігає компакту, «циліндричну» форму порівняно із водою, але при розпаді струменя утворюються краплини меншого розміру порівняно із

водою; при швидкостях потоку в 60 м/с розмір краплин розчину зменшується до $150 \div 200 \cdot 10^{-6}$ м, що класифікується як розпиленість струменів середньої дисперсності.

Шляхом багатофакторної оптимізації розроблено склад ВВБЗР нового покоління ФСГ-2М. До водного розчину ПГМГФК для надання змочувальної здатності ВВБЗР рідких гідрофобних поверхонь (під час гасіння речовини пожежі класу В) додають необхідну кількість плівкоутворюючої поверхнево-активної речовини (наприклад, S.F.P.M.). Внаслідок цього у ФСГ-2М поверхневий натяг удвічі менший ніж у води (при концентрації ПГМГФК – 31,7 % (табл. 9)); яка утворює гідрогель (при концентрації ПГМГФК – 50 %), що має більшу ізолювальну та охолоджувальну здатність порівняно із водою; яка має виражені інгібувальні властивості; продукти її термічного розкладу здатні флегматизувати горючу газоповітряну суміш продуктів термічної деструкції матеріалів.

Таблиця 9

Результати дослідження фізико-хімічних властивостей
ВВБЗР ФСГ-2М

Показник	Концентрація комплексної сполуки у ВВБЗР ФСГ-2М, %					
	0	4,0	8,0	16,0	32	64
Водневий показник, рН	7,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6
Густина, кг/дм ³	1,0	1,02	1,03	1,07	1,13	1,2
Поверхневий натяг водних розчинів ВВБЗР ФСГ-2М, мН/м	64,11	34,65	32,97	31,03	29,32	28,91

Дослідження впливу складу ФСГ-2М на закономірності займання, поширення полум'я поверхнею та припинення горіння ЦВМ проведені в лабораторних та полігонних умовах. Лабораторні дослідження довели, що відносна вогнегасна здатність ФСГ-2М під час гасіння ЦВМ в 4,9 рази вища порівняно із водою. Отримані результати поширено і для вогнищ пожеж класу В: запропонований метод за аналогічних умов забезпечує ефективність вогнегасіння тонкорозпиленими струменями в 3,2 рази вище порівняно із подаванням тонкорозпилених струменів води. На вогнегасну здатність ВВБЗР ФСГ-2М під час гасіння пожежі класу В впливає молекулярна маса застосованого ПГМГФК. Використана ВВБЗР модифікації ФСГ-2М з молекулярною масою ПГМГФК в 9 000 а.о.м. (рис. 12).

У таблиці 10 наведено результати досліджень вогнегасної здатності ВВБЗР щодо гасіння модельних вогнищ класу А з використанням вогнегасника ВВШ-9 (виробництва ПрАТ «Факел», м. Макіївка). Випробування свідчать про високу вогнегасну здатність ФСГ-2М: погашене модельне вогнище 3А, причому встановлено відсутність повторного займання такого вогнища при спробі повторного підпалу за тих же умов. На поверхні звугленого шару деревини, що погашена з використанням ФСГ-2М, утворюється модифікований вогнетривкий шар, який не здатний до

повторного займання, що підтверджене дериватографічними дослідженнями (рис.13).

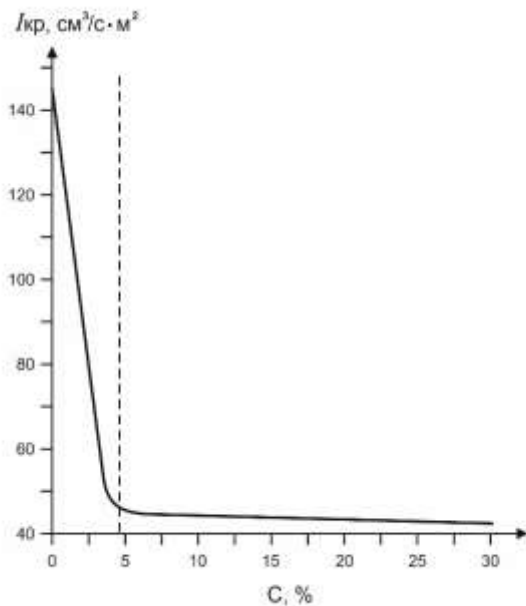


Рис. 12 - Залежність критичної інтенсивності подавання ВВБЗР ФСГ-2М на гасіння вогнища класу В від концентрації ПГМГФК у складі ВВБЗР

Таблиця 10

Результати досліджень вогнегасної здатності водних вогнегасних речовин щодо гасіння модельних вогнищ класу А з використанням вогнегасника ВВШ-9

водна вогнегасна речовина	позначення модельного вогнища пожежі	маса витраченої на гасіння ВВР (ΔM), кг	результат гасіння	показник вогнегасної здатності ВВР (Q_A), кг/м ²	примітка
6 % - піноутворювач S.F.P.M., вода - решта	2А	8,9	Погашено	0,93	При повторному підпалюванні вогнище горіло
6 % - піноутворювач S.F.P.M., вода - решта	3А	8,9	Не погашено	-	
ФСГ-2М (31,7 % ПГМГФК + 0,2 % S.F.P.M.)	3А	7,8	Погашено	0,55	На поверхні звуглених брусків спостерігалась наявність плівки. При повторному підпалюванні вогнище не загорілось
ФСГ-2М	4А	8,9	Не погашено	-	

Проведені дослідження дозволили пояснити феноменологію механізму вогнегасної дії ФСГ-2М, що ґрунтується на уявленні про реалізацію факторів охолодження, інгібування, флегматизування та ізолювання, наступним чином. ФСГ-2М має специфічні реологічні властивості, які дозволяють із звичайних протипожежних пристроїв (вогнегасників) утворювати розпилений струмінь з меншими краплинами розпилу (при тих же значеннях

робочого тиску). Коли краплі попадають у факел полум'я, відбувається тепломасовий обмін між ВВБЗР і полум'ям, при цьому випаровується вода і відбувається охолодження визначеного краплею об'єму полум'я. Водяна пара флегматизує об'єм полум'я.

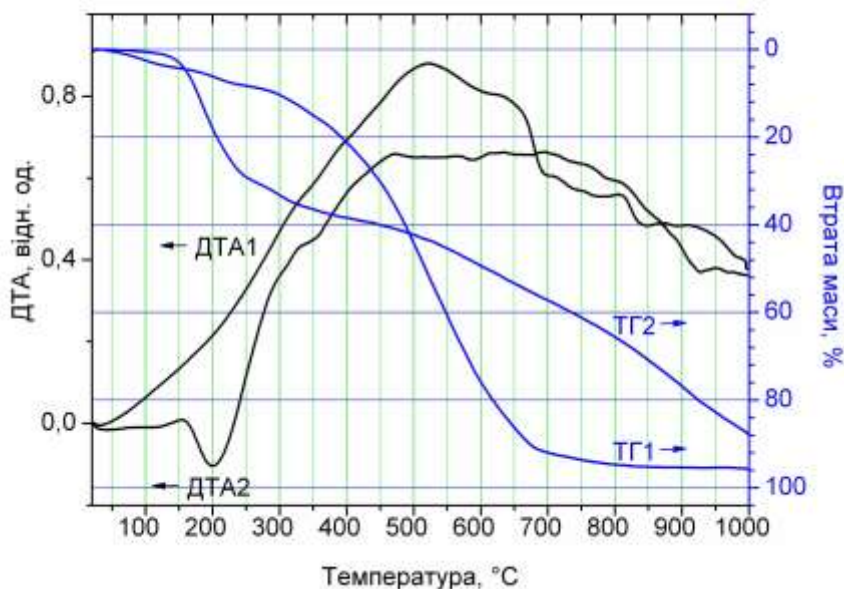


Рис. 13 - Результати дериватографічного дослідження зразка звугленого шару деревини (сосни) (1) та зразка модифікованого звугленого шару деревини (2)

Найменші краплини ВВБЗР, які достатньо позбулися води, перетворюються спочатку у гідрогель, а в подальшому у розплав. Згодом, за рахунок тепломасообміну в об'ємі полум'я, утворюються тверді частинки речовини, які в свою чергу розкладаються на молекули, атоми, іони та вступають у взаємодію з активними радикалами полум'я, утворюючи ІМК (ІРК), тобто відбувається інгібування ланцюгових реакції окислення горючих газів. Великі краплини, які перетворились у гідрогель, досягають поверхні нагрітої деревини і утворюють плівку з гідрогелю, яка в подальшому перетворюється у розплав речовини. Плівки гідрогелю речовини та її розплаву беруть участь у проходженні фізичних і фізико-хімічних процесів: завдяки ендотермічним ефектам при розкладенні речовини відбувається охолодження поверхні; плівка при плавленні виділяє інертні гази, які, по-перше, флегматизують зону окислювальної реакції, а, по-друге, створюють бар'єр для доступу кисню в зону хімічної реакції та виходу газових продуктів хімічної деструкції макромолекул целюлози. При цьому гідрогель ФСГ-2М виявляє високу адгезійну здатність і спроможність утримуватися на похилих поверхнях нагрітої деревини, що сприяє підвищенню ефективності її гасіння.

Таким чином, властивості речовини ФСГ-2М, запропонованого складу, повною мірою відповідають розробленим вимогам, що висуваються до речовин, які придатні до використання в якості вогнегасного заряду для

первинних засобів пожежогасіння на об'єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ.

У п'ятому розділі «Створення системи протипожежного захисту об'єкта, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин» представлені результати розроблення СППЗО для об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ. Ця система є складовою загальної системи забезпечення пожежної безпеки об'єкта і представляє собою комплекс заходів і засобів, спрямованих на захист об'єкту від пожежі на початковій стадії її розвитку (рис.14).



Рис. 14 - Схема реалізації системи СППЗО з використанням екологічно безпечних ВВБЗР

Алгоритм функціонування пасивного протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із деревини, тканин, паперу, очерету реалізується шляхом розроблення і впровадження Правил з вогнезахисту з використанням ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М.

Алгоритм функціонування активного протипожежного захисту об'єкта з пожежною навантаженням із матеріалів пожеж класів А і В базується на заміні вогнегасного водяного заряду на заряд ВВБЗР ФСГ-2М у засобах пожежогасіння (вогнегасниках, автоматичних установках пожежогасіння тощо) для забезпечення відповідних норм належності на об'єкті. Під час гасіння матеріалів пожежі класу А з використанням ФСГ-2М реалізуються умови, що сприяють унеможливленню повторного займання пожежного навантаження.

Для аудиту пасивного ППЗО в якості базового параметру при визначенні критерія якості вогнезахисного оброблення дерев'яних конструкцій на об'єктах пропонується прийняти температуру займання верхнього шару вогнезахищеної деревини.

При аудиті активного ППЗО пропонується визначати відповідність наявних засобів пожежогасіння із зарядом ВВБЗР нормам їх належності на об'єкті, що визначається розрахунком величини пожежної навантаги.

Таким чином, розроблена СППЗО об'єднує запропоновані методи вогнезахисту, що усуває антоганістичні ефекти, можливі при безсистемному застосуванні заходів і засобів активного і пасивного захисту ЦВМ.

У шостому розділі представлені «Дослідження дієздатності системи протипожежного захисту об'єкта, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням водних вогнебіозахисних речовин». Прикладами спрацювання запропонованої системи ППЗО є декілька десятків зафіксованих випадків успішної ліквідації пожеж на об'єктах критичної інфраструктури (школах, лікарнях, готелях, адміністративних і житлових будинках тощо), коли вогнезахищені дерев'яні конструкції унеможлиблювали розвиток пожежі: поверхня конструкції лише обвуглювалась. Горіння ж інших матеріалів гасили із застосуванням ВВБЗР, що дозволило ліквідувати або локалізувати пожежу на початковій стадії її розвитку.

Створені нормативно-технічні бази для виробництва ВВБЗР: ТУ У 13672801.002-1999, ТУ У 24.6-32528450-001-2003, технологічні регламенти виробництва ДСА-1М, ДСА-2М; ТУ У 24.6-32528450-002-2004, технологічний регламент виробництва ФСГ-1М, ФСГ-2М та виробнича база ВВБЗР на ТОВ «Вогнебіозахист», ТОВ «Захсит-Центр», яка забезпечує (щорічно) понад 5 000 об'єктів України зазначеними вогнебіозахисними засобами. Проведено оцінювання ефективності реалізації запропонованої системи пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта із застосуванням ВВБЗР методом Гретенера, яке вказує на можливість зменшення пожежної небезпеки об'єкта в 14 разів у порівнянні з відсутністю зазначеної системи. Розрахований річний економічний ефект від впровадження розробленої системи протипожежного захисту об'єктів (за даними 2017 року) складає 64,4 млн. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведені результати розв'язування актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у подоланні недосконалості методів протипожежного захисту об'єктів для попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку шляхом створення і реалізації методів пасивного і активного захисту з використанням ефективних екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

Основні наукові та практичні результати і рекомендації під час виконання досліджень і впровадження роботи:

1. Аналіз стану проблемних питань щодо застосування водних вогнебіозахисних речовин свідчить про необхідність перегляду та розвитку наукових основ їх створення на засадах системного підходу для вирішення задач ефективного попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку.

Вперше обґрунтовано доцільність створення єдиної системи пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин і встановлена пріоритетність пасивного захисту, що дозволяє забезпечити ефективний захист об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів на початковій стадії розвитку пожежі та локалізувати або ліквідувати її.

2. Вперше запропоновано математичну модель розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини. Модель дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині для максимального насичення поверхневих шарів деревини. Використання моделі придатне для вогнебіозахисних засобів, що використовуються при поверхневому вогнезахисті дерев'яних елементів горищних покриттів будівель та споруд на об'єктах різного призначення на вимогу державних будівельних норм в Україні. Наприклад, показано, що оптимальна концентрація антипіренів у робочому розчині антипірену зі складу водної вогнебіозахисної речовини ДСА-1М (ДСА-2М) має становити 30,4 %.

3. Вперше запропоновано математичну модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, які відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння, що дозволяє визначити час від початку дії теплового потоку на необроблену деревину (різної породи, товщини тощо) до моменту займання (спалахування), що дає можливість оцінити ресурс часу для ліквідації осередку займання пожежного навантаження. Наприклад, встановлено, що необроблена дерев'яна дошка заболоні сосни (для якої експериментально встановлена температура займання в 235 °C) товщиною в 10 мм під дією зовнішнього опромінення в 40 кВт/м² займається через 6,5 хв., що практично унеможливорює ліквідацію пожежі пожежними підрозділами на початковій стадії розвитку.

4. Вперше запропоновано математичну модель, що пов'язує охолоджувальний ефект від використання водних вогнебіозахисних речовин

для вогнезахисту деревини з вкладом у прогнозне подовження часу від початку термічного впливу до займання деревини (тобто, з подовженням початкової стадії розвитку пожежі), яку доцільно використовувати при розробленні компонентного складу вогнезахисних просочень. Наприклад, встановлено, що насичення поверхневих шарів деревини (заболонь сосни товщиною 10 мм) антипіренами зі складу водної вогнебіозахисної речовини ДСА-1М (ДСА-2М) дозволяє подовжити час до займання деревини більше, ніж в два рази (за умови зовнішнього опромінення в 40 кВт/м^2), що створює певні передумови для ліквідації пожежі на початковій стадії її розвитку.

5. Удосконалено феноменологічну модель процесу висолювання вогнезахисної речовини з вогнебіозахищеної деревини, що додатково враховує дифузію води та водних розчинів антипіренів у шарі цілеспрямовано сформованого бар'єра у вигляді полімерної плівки антисептика на поверхні вогнебіозахищеної деревини, що дозволяє зменшити ефективний коефіцієнт дифузії антипіренів в деревині на 5-6 порядків. Експериментально доведено, що збереження необхідного рівня вогнезахисту вогнебіозахищеної деревини щонайменше протягом 12 років забезпечується за рахунок наявності плівки полігексаметиленгуанідингідрофосфата на поверхні захищеної деревини, яка ефективно протидіє процесу висолювання антипіренів.

6. Розроблено метод пасивного протипожежного захисту целюлозовмісних матеріалів на основі використання водних вогнебіозахисних речовин.

Запропоновано оптимальний склад водних вогнебіозахисних речовин для деревини, що ґрунтується на використанні властивостей їх складових, які забезпечують реалізацію таких ефектів: біозахисту та ізолювання вогнезахищеного шару деревини від дифузії кисню і води із оточуючого середовища шляхом утворення на поверхні деревини плівки полімерного антисептика (полігексаметиленгуанідингідрофосфата); інгібування активних центрів термодеструкції та горіння шляхом використання синергетичної суміші фосфатів та сульфатів амонію (у співвідношенні 2:1); охолодження за рахунок поглинання теплоти при термічному перетворенні антипіренів; флегматизування газоподібних продуктів деструкції поверхневого шару деревини продуктами термічного розкладу антипіренів, що приводить до зменшення кількості карбон оксиду в 4 рази, водню – у 8 разів, та до збільшення флегматизуючого азоту майже на два порядки.

Запропоновано оптимальний склад водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду (ПГМГФК), яка відповідає вимогам щодо ефективності вогнебіозахисту тканин, паперу, очерету, та ідентифікована за допомогою ІЧ-спектроскопії, оптичної мікроскопії, диференційного термічного аналізу. Розчин ПГМГФК у воді має технічну назву ФСГ-1М. Речовина ФСГ-1М з концентрацією ПГМГФК в 20÷24 % використовується для вогнебіозахисту тканин і паперу, а з концентрацією ПГМГФК в 25÷28 % - для вогнебіозахисту очерету. Розкрито

механізм вогнебіозахисної дії ФСГ-1М, який реалізується за рахунок прояву ефектів: біозахисту та ізолювання поверхні тканини, паперу, очерету від дифузії кисню та води із оточуючого середовища шляхом утворення плівки ПГМГФК на поверхні матеріалу; інгібування активних центрів горіння та термодеструкції матеріалів продуктами термічного розкладу ПГМГФК; охолодження за рахунок поглинання теплоти при термічному перетворенні ПГМГФК; флегматизування газоподібних продуктів деструкції поверхневого шару матеріалів продуктами термічного розкладу ПГМГФК, що призводить до зменшення частки водню, метану, оксиду карбону та до збільшення флегматизуючого азоту.

7. Розроблено метод активного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин в якості вогнегасного заряду для первинних засобів пожежогасіння. Запропоновано оптимальний склад водної вогнебіозахисної речовини нового покоління ФСГ-2М: у якій поверхневий натяг у 2 рази менший ніж у води (при концентраціях ПГМГФК – 31,7 % та 0,2 % плівкоутворюючого ПАР S.F.P.M.); яка утворює гідрогель (при концентрації ПГМГФК – 50 %), що має більшу ізолювальну та охолоджувальну здатність порівняно із водою; яка має виражені інгібувальні властивості; продукти її термічного розкладу здатні флегматизувати горючу газоповітряну суміш продуктів термічної деструкції матеріалів, яка відповідає вимогам щодо застосування в якості заряду первинних засобів пожежогасіння. Використання ФСГ-2М дає можливість отримання тонко розпилених струменів з розміром краплин менше 100 мкм при використанні пневматичної форсунки з надлишковим тиском в 0,8 МПа. При цьому відносна вогнегасна здатність ФСГ-2М під час гасіння вогнища пожежі класу А в 4,9 рази вища за ефективність води за однакових умов їх подавання. Отримані результати поширено і для вогнищ пожеж класу В: запропонований метод за аналогічних умов забезпечує ефективність вогнегасіння тонкорозпиленими струменями в 3,2 рази вище порівняно із подаванням тонкорозпиленних струменів води.

8. Створено систему протипожежного захисту об'єкта, в якій реалізовано метод пасивного захисту з використанням водних вогнебіозахисних речовин, що підвищує температуру займання деревини до 400 °С і зменшує токсичність продуктів горіння, та метод активного захисту з використанням водних вогнебіозахисних речовин в якості заряду для первинних засобів пожежогасіння, застосування яких унеможливорює повторне займання ЦВМ. Реалізація цієї системи дозволяє підвищити захист об'єктів від пожеж на початковій стадії їх розвитку та зменшує забруднення навколишнього середовища. Проведено оцінювання технічної ефективності реалізації запропонованої системи за методом Гретенера, яке вказує на можливість зменшення пожежної небезпеки об'єкта в 14 разів в порівнянні з відсутністю такої системи.

9. Дістав подальший розвиток метод оцінювання рівня вогнезахисту дерев'яних конструкцій, в основу якого покладене співвідношення значень

температур займання вогнезахищеної та вогнenezахищеної деревини в якості критерія визначення рівня вогнезахисту, що дозволяє визначати якість проведених робіт з вогнезахисту та достатність рівня вогнезахисту дерев'яних конструкцій протягом їх експлуатації під час проведення аудиту пасивного захисту об'єкта від пожеж.

10. Створена нормативно-технічна документація для виробництва водних вогнебіозахисних речовин: ТУ У 13672801.002-1999, ТУ У 24.6-32528450-001-2003, технологічні регламенти виробництва ДСА-1М, ДСА-2М; ТУ У 24.6-32528450-002-2004, технологічний регламент виробництва ФСГ-1М, ФСГ-2М та виробнича база ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М, яка забезпечує щорічно понад 5 000 об'єктів України зазначеними вогнебіозахисними засобами. Річний економічний ефект від впровадження розробленої системи протипожежного захисту об'єктів (за даними 2017 року) складає 64,4 млн. грн.

Основні положення і результати дисертації опубліковано у роботах:

Монографія

1. Жартовський С.В. Екологічні аспекти використання гуанідинових полімерів в умовах надзвичайних ситуацій: [Монографія] Видання друге / Т.В. Магльована, Т.Ю. Нижник, С.В. Жартовський - Черкаси: видавець ФОП Гордієнко Є.І., 2017. – 210 с. (ISBN 978-966-9730-54-1).

Статті у міжнародних виданнях

2. Жартовский С.В. Системный подход к созданию противопожарной защиты объекта с использованием водных огнезащитных и огнетушащих веществ / С.В. Жартовский // Пожаровзрывобезопасность: научн.-техн. журнал, «Пожнаука», Москва, 2013, т. 22, №9 – С.25 – 32.

3. Жартовский С.В. Разработка водного огнезащитного вещества для пассивной противопожарной защиты объекта с пожарной нагрузкой из тканей / С.В. Жартовский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. Научно-техн. журнал. Минск, 2013, Вып. 1 (33), - С.61 – 69.

4. Chumachenko S.N., Zhartovskyi S.V., Titenko A.N. Methods of creating a mathematical model of an energy component of chemical and physical processes that occur in wood when it is heated prior to the flaming phase, BiTP Vol. 44, Issue 4, 2016, pp. 131-136, DOI: 10.12845/bitp.44.4.2016.10.

Статті у наукових фахових виданнях

5. Жартовський С.В. Визначення строку збереження ефективного вогнезахисту виробів з деревини, які оброблені просочувальними засобами ДСА-1 та ДСА-2, за результатами натурних випробувань / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, О.В. Корнієнко // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2009. – № 2 (20). – С. 26–33.

6. Жартовський С.В. Про деякі невідповідності стандартизованих методів і методик визначення вогнезахисту виробів з деревини умовам їх експлуатації / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2010. – № 1 (21). – С. 94 - 102.

7. Жартовський С.В. Композиційна просочувальна речовина для вогнебіозахисту деревини і тканин / С.В. Жартовський, К.І. Соколенко, Д.І. Рихліцький // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2010. – № 2 (22). – С. 30 – 37.

8. Жартовський С.В. Екологічні аспекти вогнезахисту деревини і тканин комплексним засобом ФСГ-1 / С.В. Жартовський // Збірник наукових праць: Вісник ЛДУБЖД, Львів – 2010; № 4, частина 1, - С. 106 – 111.

9. Жартовський С.В. Дослідження фізико-хімічних властивостей водної вогнегасної речовини ФСГ-2 і механізму її вогнегасної дії під час гасіння пожеж класу А / С.В. Жартовський // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2011. – № 1 (23). – С. 132 – 142.

10. Жартовський С.В. Активний і пасивний протипожежний захист об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011, - С. 44 – 52.

11. Жартовський С.В. Експериментальні дослідження поглинання водних розчинів антипіренів при просоченні торцевих та бокових граней стандартизованих зразків деревини / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, Є.Ю. Шеверєв // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2011. – № 1 (23). – С. 143 – 149.

12. Жартовський С.В. Проблеми та шляхи забезпечення безпеки життєдіяльності об'єктів з використанням води і водних речовин / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, І.Я. Кріса, І.А. Рихліцький, Д.І. Рихліцький // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Збірник наукових праць. Ч.1. Технічні науки, №5, 2011, С. 129 – 135.

13. Жартовський С.В. Дослідження реологічних властивостей водної вогнегасної речовини ФСГ-2 / С.В. Жартовський, О.Д. Коваль, І.Г. Маладика, В.М. Кришталь // Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. № 9. – С. 53-60.

14. Жартовський С.В. Водна вогнегасна речовина як засіб пілоподавлення / С.В. Жартовський // Горноспасательное дело: сб. научн. тр. / НИИГД «Респиратор» - Донецк, 2012, Вып. 49. - С. 148 – 157.

15. Жартовський С.В. Застосування полімерної поверхнево-активної речовини гуанідинового ряду з метою підвищення вогнегасних властивостей води / В.М. Жартовський, Т.В. Магльована, С.В. Жартовський // Пожежна безпека: теорія і практика. Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля – 2012. – № 12. – С. 35 - 40.

16. Жартовський С.В. Сучасні засоби активного і пасивного захисту об'єктів культового призначення / С.В. Жартовський // Пожежна безпека. збір. наук. праць, Львів.: ЛДУБЖД, №22, 2013, - С.81 – 86.

17. Жартовський С.В. Створення підсистеми протипожежного захисту об'єктів із застосуванням водних вогнезахисних та вогнегасних речовин /

С.В. Жартовський // Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2013. - №12, - С. 73 – 79.

18. Жартовський С.В. Феноменологічна модель вогнезахисту деревини із застосуванням водної вогнебіозахисної речовини ДСА-2 / С.В. Жартовський // Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2013. - №13, - С. 20 – 27.

19. Жартовський С.В. Удосконалення будівельних норм з пожежної безпеки об'єктів / В.В. Ніжник, О.О. Сізіков, Р.В. Уханський, С.В. Новак, Л.М. Нефедченко, С.В. Жартовський, Д.В. Мартюк // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2014. – № 1 (29). – С. 65 – 71.

20. Жартовський С.В. Методика створення математичної моделі розподілу антипіренів всередині вогнезахисної деревини / С.М. Чумаченко, С.В. Жартовський, О.М. Тітенко, В.В. Троцько // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.5. – С. 378-385. *(Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).*

21. Жартовський С.В. Методика розроблення математичної моделі охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого водною вогнебіозахисною речовиною / С.М. Чумаченко, С.В. Жартовський, О.М. Тітенко // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.8. – С. 337-347. *(Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).*

22. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об'єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із целюлозовмісних матеріалів / С.В. Жартовський // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27.10. – С. 101-105. *(Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).*

23. Жартовський С.В. Технічні методи аудиту пожежної безпеки об'єктів з пожежною навантагою із дерев'яних будівельних конструкцій / С.В. Жартовський // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2018. – Вип. 28.1. – С. 85-90. *(Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).*

24. Жартовський С.В. Використання солей полігексаметиленгуанідину в складах водних вогнегасних речовин для протипожежного захисту об'єктів із целюлозовмісних матеріалів / С.В. Жартовський // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2018. – Вип. 28.6. – С. 93-98. *(Видання індексується бібліометричною платформою Index Copernicus).*

Патенти

25. Деклараційний патент на корисну модель №8963 Україна, МПК В27Л3/50 Композиція для вогнезахисту деревини / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський, П.Ф. Борисов - №2007002536 опубл. 15.08.2005, Бюл. №8 - 3 с.

26. Патент на корисну модель № 23802 Україна, МПК (2006) Д06М 11/00 В27К 9/00 Композиція для поверхневого вогнебіозахисту і гідрофобізації очерету та соломи / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський - №U200700252, опубл. 11.06.2007, Бюл. №8 – 3 с.

27. Патент на корисну модель № 23803 Україна, МПК (2006) Д06М 11/00 Просочувальний розчин для поверхневого вогнебіозахисту тканин та паперу / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський - №U200700253, опубл. 11.06.2007, Бюл. №8 – 3 с.

Матеріали науково-технічних конференцій

28. Жартовський С.В. Вогнезахист целюлозовмісних матеріалів в системі безпеки життєдіяльності людини / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський // «Пожежна безпека – 2009» Збірник тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції. – Львів: ЛДУ БЖД. – 2009. – С. 170-172.

29. Жартовський С.В. Системний підхід до забезпечення активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів / С.В. Жартовський // Матеріали 14-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників 26-27 вересня 2012, м. Київ,- 2012, С. 180 – 183.

30. Жартовський С.В. Реологические свойства водного огнетушащего вещества ФСГ-2 / В.М. Жартовский, С.В. Жартовский, А.Д. Коваль, И.Г. Маладыка, В.Н. Крышталь // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института: Москва, ВНИИПО, 2012. – С. 142 – 143.

31. Жартовский С.В. Системный подход к обеспечению противопожарной защиты объектов с пожарной нагрузкой из целлюлозосодержащих материалов / С.В. Жартовский // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института: Москва, ВНИИПО, 2013,- С. 129 - 131.

32. Жартовський С.В. Реалізація підсистеми протипожежного захисту об'єкта із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин / С.В. Жартовський // Матеріали 15-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників 24, 25 вересня 2013 р. – м. Київ, С. 28 – 30.

33. Жартовський С.В. Економічна ефективність підсистеми протипожежного захисту об'єктів із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин на початковій стадії розвитку пожежі / С.В. Жартовський, В.В. Ніжник, О.М. Тищенко // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» НУЦЗ України, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля, Черкаси, 12-13 грудня 2014 року, С. 135 – 137.

34. Жартовський С.В. Запобігання надзвичайним ситуаціям, що обумовлені загораннями і пожежами на об'єктах критичної інфраструктури / С.В. Жартовський, В.В. Ніжник, М.Г. Шкарабура, І.Г. Маладика // Матеріали

Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» НУЦЗ України, ЧПБ імені Героїв Чорнобиля, Черкаси, 9-10 жовтня 2015 року, С. 178 – 180.

35. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи захисту об'єкта критичної інфраструктури від надзвичайних ситуацій, обумовлених загораннями і пожежами / С.В. Жартовський // Праці II-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури», ISBN 978-966-7792-05-3, м. Київ, 2016, С. 542 – 546.

36. Жартовський С.В. Проблематика математичного моделювання ризиків надзвичайних ситуацій для об'єктів критичної інфраструктури, обумовлених загораннями та пожежами / С.В. Жартовський, С.М. Чумаченко, В.В. Троцько, О.М. Тітенко // М 34 Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016: тези доповідей Одинадцятої міжнародної науково-практичної конференції (Жукин, 27 червня – 1 липня 2016 р.) / М-во осв. і наук. України, нац. Акад. наук. України, Академія технологічних наук України, Інженерна академія України та ін. – Чернігів : ЧНТУ, 2016, С. 260 – 263.

37. Жартовський С.В. Дослідження ефективності водної вогнегасної речовини ФСГ-2М при гасінні пожеж класу В / С.В. Жартовський, О.А. Криницький, В.А. Гузієнко // X Міжнародна наук.-практ. конференція: теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій / – Черкаси: ПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.- 2018, - С.40 – 41.

АНОТАЦІЯ

Жартовський С.В. Розвиток наукових основ протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів водними вогнебіозахисними речовинами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека). – Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ; Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2018.

Дисертацію присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, що полягає у подоланні недосконалості методів пасивного і активного протипожежного захисту об'єктів для попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку, шляхом встановлення закономірностей впливу якісного і кількісного складу вогнебіозахисних речовин на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння целюлозовмісних матеріалів: деревини, тканин, паперу, очерету. На цій основі розроблено методи їх перетворення у важкогорючі та важкозаймисті матеріали, які характеризуються помірною токсичністю продуктів горіння та малою димоутворювальною здатністю. Вогнезахищені

матеріали є стійкими до біоруйнування та не спричиняють корозію чорних металів. Водні вогнебіозахисні речовини використовуються в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння. Розроблено феноменологічні моделі процесів вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів (деревини, тканин, паперу, очерету) та процесу гасіння целюлозовмісних матеріалів при використанні водних вогнебіозахисних речовин, які формують уявлення про реалізацію ефектів охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання.

Такий підхід до розв'язання проблеми дав можливість побудувати в загальній системі протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів систему пасивного і активного протипожежного захисту з використанням водних вогнебіозахисних речовин, що дозволяє ліквідувати або локалізувати пожежу на початковій стадії її розвитку.

Ключові слова: целюлозовмісні матеріали, водні вогнебіозахисні речовини, димоутворення, токсичність, система пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта.

АННОТАЦИЯ

Жартовский С.В. Развитие научных основ противопожарной защиты объектов с пожарной нагрузкой из целлюлозосодержащих материалов водными огнебиозащитными веществами. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.02 - «Пожарная безопасность» (261 - Пожарная безопасность). - Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты, Киев; Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы в сфере пожарной безопасности, заключающейся в преодолении несовершенства методов пассивной и активной противопожарной защиты объектов для предупреждения, локализации и ликвидации пожаров на начальной стадии их развития, путем установления закономерностей влияния качественного и количественного состава огнебиозащитных веществ на процессы воспламенения, распространения и прекращения горения целлюлозосодержащих материалов: древесины, тканей, бумаги, камыша. На этой основе разработаны методы их перевода в трудногорючие и трудновоспламеняемые материалы, характеризующиеся умеренной токсичностью продуктов горения и малой дымообразующей способностью. Огнезащищенные материалы устойчивы к биоразрушению и не вызывают коррозии черных металлов. Водные огнебиозащитные вещества используются в качестве зарядов для первичных средств пожаротушения. Разработаны феноменологические модели процессов огнезащиты целлюлозосодержащих материалов (древесины, тканей, бумаги, камыша) и

процесса тушения целлюлозосодержащих материалов при использовании водных огнебиозащитных веществ, которые формируют представление о реализации эффектов охлаждения, ингибирования, флегматизации, изолирования.

Такой подход к решению проблемы позволил создать в общей системе противопожарной защиты объекта с пожарной нагрузкой из целлюлозосодержащих материалов систему пассивной и активной противопожарной защиты с использованием водных огнебиозащитных веществ, которая позволяет ликвидировать или локализовать пожар на начальной стадии его развития.

Ключевые слова: целлюлозосодержащие материалы, водные огнебиозащитные вещества, дымообразование, токсичность, система пассивной и активной противопожарной защиты объекта.

ABSTRACT

S.V. Zhartovskyi. Development of scientific bases of fire protection for the facilities with fire load created by the cellulose-based materials using the water-based fire-retardant bioprotective agents. - Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Engineering, major 21.06.02 - "Fire Safety" (261 - Fire safety). - Ukrainian Research Institute of Civil Protection, Kyiv; National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to the further development of scientific bases for fire protection of facilities with the fire load created by the cellulose-based materials using the water-based fire-retardant bioprotective agents. On this basis, the methods of passive and active fire protection of wood, textiles, paper, and cane using the efficient environmentally friendly water-based fire-retardant bioprotective agents of a new generation were developed and proposed.

The first chapter is devoted to the analysis of modern advances in scientific and practical terms for the creation of water-based fire-retardant bioprotective agents and appropriate regulatory and technical framework, as well as assessment of their effectiveness. It is defined that the direction of creating the means and measures for active protection has been developing actively for a long time, but the area of passive fire protection has been developing at a slower pace. It is established that the formulations of water-based fire-retardant bioprotective agents were developed on outdated scientific basis, using the salt-based flame retardants and preservatives prone to rapid salting, so the efficacy of flameproof wood treatment was maintained for a short period. The harmful substances were used preservatives, causing harm to the environment. So, these substances could not provide for an effective solution to the problems of preventing or eliminating the fires at the initial stage of their development.

The second chapter presents the methodological basis for creation of active and passive fire protection using the water-based fire-retardant bioprotective agents. The facility protection from fire was systematized in accordance with

regulatory requirements in the overall security system, and the expediency of creating a single system of passive and active protection was explained. A mathematical model of flame retardant distribution in the flame-protected wood was proposed; it allows determining the optimal concentration of flame retardant in an aqueous working solution for the maximum saturation of surface wood layers. The mathematical models of the energy component of chemical and physical processes occurring in the protected and unprotected wood when it is heated up to the flaming combustion phase were presented, enabling to estimate the time resource to eliminate the hearth of fire load. Calculations show that the use of a mixture of phosphates and ammonium sulphate in protective substances creates conditions for extension of the initial fire stage more than twice. The phenomenological model of salting the flame retardant out of the flame-retardant bioprotective wood was improved, which further allows for the diffusion of water and aqueous solutions of flame retardants in the layer of a specifically formed barrier in the form of an antiseptic polymer film on the surface of the flame-retardant bioprotective wood, which reduces the effective flame retardant diffusion coefficient in wood 5-6 times.

The third chapter describes the development of methods for passive fire protection of cellulose-based materials using the water-based fire-retardant bioprotective substances with a comprehensive effect, consisting of an aqueous solution of a synergistic mixture of phosphates, ammonium sulfate and aqueous polyhexamethylenguanidinehydrophosphate solution, or aqueous urea polyhexamethylenguanidinehydrophosphate solution. The level of fire-retardant bioprotective treatment efficiency for the fire load was determined using the indices of fire hazard and resistance to biodegradation; the loading materials are classified as materials with low flammability, barely flammable; materials not propagating the flame on the surface with moderate smoking ability, moderate toxicity hazard and resistant to biodegradation.

The fourth chapter presents the development of a method for active fire protection of the facilities using the environmentally friendly materials based on urea polyhexamethylenguanidinehydrophosphate as an extinguishing charge in the primary fire extinguishing means. This realizes a set of extinguishing influence factors, i.e. cooling and inerting during the water evaporation, followed by inhibition of the active centers of chain reactions in the flame combustion products of thermal decomposition of these substances, and formation of a protective film on the surface of the compound material. This ensures 4.9 times more effective fire extinguishing using the finely atomized jets of these substances as compared to the finely atomized water jets. The results obtained were applied to the hearths of B class fires, since the proposed method ensures 3.2 times more effective fire extinguishing with finely atomized jets under similar conditions as compared to supply of the finely atomized water jets.

The fifth chapter is dedicated to the creation of the facility fire protection system, implementing a passive protection method using the substances with developed compositions, increasing the wood ignition temperature to 400 °C and

reducing the toxic combustion products, as well as an active protection method using the water-based fire-retardant bioprotective substances as the charge for primary fire fighting, the use of which prevents re-ignition of cellulose-based materials.

The sixth chapter presents the feasibility study of the proposed facility fire protection system. Implementation of such a system can improve the facility protection from fires at an early stage of their development and reduces pollution. The technical efficiency of the system implementation using the Gretener method was assessed, and the outcomes indicate the possibility of reducing the facility fire risk 14 times as compared to the absence of such a system. Also, the calculations proving the economic efficiency of the proposed system are presented.

Keywords: cellulose-based materials, water-based fire-retardant bioprotective agents, smoke generation, toxicity, passive and active facility fire protection system.

Підписано до друку 26.12.2018. Обл-вид., арт 0,9.
папір офсетний, друк цифровий.
Тираж 100 прим. Замовлення № 2612/2018
Віддруковано ФОП Клименко Ю.Я.
м. Київ. вул. П. Запорожця, 4
Тел.: 066 260 76 86