УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ (УкрНДІЦЗ),
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ (НУЦЗУ),
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЖАРТОВСЬКИЙ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 614.84

ДИСЕРТАЦІЯ

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

21.06.02 – пожежна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.В. Жартовський

Науковий консультант –
Чумаченко Сергій Миколайович,
доктор технічних наук

Київ - 2018

АНОТАЦІЯ

Жартовський С.В. Розвиток наукових основ протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів водними вогнебіозахисними речовинами. – Кваліфікаційна наукова праця 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 водних вогнебіозахисних речовин (ВВБЗР) на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння целюлозовмісних матеріалів (ЦВМ): деревини, тканин, паперу, очерету.

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 реалізацію факторів охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання (екранування) для унеможливлення формування (або руйнування) трикутника горіння, коли горючими речовинами є ЦВМ. Оскільки максимальну реалізацію зазначених ефектів слід очікувати при максимальному насиченні поверхневих шарів деревини антипіренами зі складу ВВБЗР, запропоновано математичну модель, що дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині 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 речовини ДСА-1М (ДСА-2М) має становити 30,4 %.

Для оцінки охолоджувального ефекту від використання ВВБЗР запропоновані математичні моделі енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в захищеній та незахищеній деревині (заболонь сосни) при її нагріванні до настання фази полум'яного горіння. 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 вогнезахищеної деревини (обробленої ВВБЗР на основі фосфатів та сульфатів амонію) більше ніж в два рази порівняно з таким інтервалом для невогнезахищеної деревини, що створює певні передумови для ліквідації пожежі на початковій стадії її розвитку.

Оскільки ефект інгібування реалізується при рекомбінації активних радикалів поблизу та на поверхні ВВБЗР, інгібувальні властивості ВВБЗР досліджувались шляхом моделювання розрахунку енергетичних параметрів іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу ВВБЗР. Було розраховано енергетичну міцність ($E_{кул}$) таких комплексів. Аналіз результатів розрахунків показав, що значення $E_{кул}$ дещо більші для комплексів фосфоровмісних речовин з водневмісними активними центрами горіння, ніж для комплексів з кисневмісними центрами. Така ж залежність значень $E_{кул}$ виявлена і для комплексів азотовмісних речовин. Це дозволяє прогнозувати, що при використанні сумішей фосфоровмісних та азотовмісних речовин з'явиться вибірковість тяжіння кисневмісних та водневмісних активних центрів горіння 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 ЦВМ, тобто до ефекту синергізму.

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

Ефект ізолюівання доступу молекул кисню і води в капілярно-пористу структуру вогнебіозахищеної деревини досягається нанесенням плівки полігексаметиленгуанідингідрофосфату (ПГМГФ) на її поверхню. При цьому плівка ПГМГФ стає й дифузійним бар'єром для висолювання антипіренів з деревини. 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 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 ПГМГФ на поверхні захищеної деревини.

Розроблено метод пасивного протипожежного захисту ЦВМ на основі використання ВВБЗР. Запропоновано оптимальний склад речовин для деревини (ДСА-1М, ДСА-2М), 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 (ПГМГФ); 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 ВВБЗР 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.

Розроблено метод активного протипожежного захисту об’єкта з використанням ВВБЗР в якості вогнегасного заряду для первинних засобів пожежогасіння. Запропоновано оптимальний склад речовини нового покоління ФСГ-2М: у якої 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 можливості 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 тонкорозпилених струменів води.

Такий підхід до розв'язання проблеми дав можливість запропонувати в загальній системі протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ систему пасивного і активного протипожежного захисту з використанням ВВБЗР, що дозволяє ліквідувати або локалізувати пожежу на початковій стадії її розвитку. Проведено оцінювання технічної ефективності реалізації цієї системи за методом Гретенера, яке вказує на можливість зменшення пожежної небезпеки об'єкта в 14 разів в порівнянні з відсутністю такої системи.

Створена нормативно-технічна документація 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 ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М. Річний економічний ефект від впровадження розробленої системи протипожежного захисту об'єктів (за даними 2017 року) складає 64,4 млн. грн.

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

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. - Qualifying scientific work on the manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 21.06.02 – Fire Safety. Ukrainian Research Institute of Civil Protection, Kyiv; National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, 2018.

This thesis is devoted to solving a pressing scientific and applied problem in the field of fire safety, namely overcoming the imperfections of passive and active methods of fire protection facilities for the prevention, containment and elimination of fires at an early stage of their development by establishing the patterns of influence of the qualitative and quantitative composition of water-based fire-retardant bioprotective agents (WBFRBA) on the processes of ignition, spread and termination of burning of the cellulose-based materials (CBM), wood, textiles, paper, and cane.

As a theoretical basis for research, a systematic approach, implying a set of the guidelines to acquire knowledge about the impact of physical, chemical, and physico-chemical WBFRBA properties on implementation of cooling, inhibition, inerting, isolation (screening) factors to prevent the formation (or destruction) of the combustion triangle when the flammable substances are CMBs, was used. Since the maximum implementation of these effects can be expected upon the maximum saturation of the surface layers of wood with flame retardants from the WBFRBA range, a mathematical model to determine the optimal concentration of flame retardants in an aqueous working solution for fire-retardant bioprotective means used in fire protective surface coating of wooden elements of the loft roofs in buildings and structures at various facilities at the request of the state building standards in Ukraine was proposed. For example, it is shown that the optimum concentration of flame retardants in the flame retardant substances working solution from the DSA-1M (DSA-2M) should be 30.4%.

To assess the cooling effect of the WBFRBA use, the mathematical models of the energy component of chemical and physical processes occurring in the protected and unprotected wood (pine sap) when it is heated up to the flaming combustion phase. The mathematical modeling results indicate a significant expected cooling effect from the proposed use of flame retardants for wood flame protection, since the time interval from the start of heat exposure to the start of the flame-protected wood flaming combustion (treated with WBFRBA based on phosphate and ammonium sulphate) more than doubled as compared to this interval for the non-flame-protected

wood, which creates certain prerequisites for fire suppression at the initial stage of its development.

Since the inhibiting effect is implemented upon recombination of active radicals near and on the surface of WBFRBA, WBFRBA inhibitory properties were investigated by simulation of calculating the energy parameters of ion molecular and ion radical complexes of active combustion centers with WBFRBA thermal decomposition products. The energy strength (E_{kul}) of such systems has been calculated. The analysis of the calculation results showed that the E_{kul} value is slightly higher for the complexes of phosphorus-based compounds with hydrogen-based active combustion centers than for the complexes with oxygen-based centers. The same dependence of E_{kul} values was also revealed for complexes of nitrogenous substances. This allows predicting that when using the mixtures of phosphorus and nitrogen-based substances, the selectivity of proneness of the oxygen-based and hydrogen-based active combustion centers to various products of the thermal decomposition of the proposed substances will appear, which may result in an increased efficiency of both homogeneous and heterogeneous inhibition of chain combustion reactions of various CBMs, i.e. the synergy effect.

The inerting effect (dilution of combustible gas mixture with non-combustible gases) is implemented upon thermal decomposition of nitrogenous-based substances from the composition of WBFRBA components.

The effect of isolating the access of oxygen and water molecules to the capillary-porous structure of the flame-retardant bioprotective wood is achieved by applying a polyhexamethylenguanidinehydrophosphate (PHMGP) film onto its surface. This PHMGP film is also becomes a diffusion barrier for salting the flame retardants out of wood. The phenomenological model of salting the fireproof material out of the flame-retardant bioprotective wood is 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 wood surface, which reduces the effective flame retardant diffusion coefficient in wood 5-6 times. It has been proved experimentally that the preservation of the required level of

fire protection of flame-retardant bioprotective wood for at least 12 years is ensured by the presence of a PHMGP film on the surface of protected wood.

The method of passive CBM fire protection through the use of WBFRBA was developed. The optimum composition of substances for wood (DSA-1M, DSA-2M) was proposed based on the use of the properties of its components ensuring the implementation of such effects, i.e. biosecurity and isolation of the flame-protected wood layer from the oxygen and water diffusion out of the environment through the formation of an antiseptic polymer film (PHMGP) on the wood surface; inhibition of the active centers of thermal destruction and combustion using the synergistic mixtures of phosphates and ammonium sulphate (2:1); cooling by absorbing heat during the thermal conversion of flame retardants; inerting of gaseous products of degradation of the wood surface layer with the products of flame retardant thermal decomposition, which leads to a reduction in carbon monoxide 4 times, hydrogen - 8 times, and an increase in inerting nitrogen almost twice.

The optimum WBFRBA composition based on urea polyhexamethylenguanidinehydrophosphate (PHMGP) was proposed; it meets the requirements for efficient flame-retardant bioprotective treatment of textiles, paper, cane, and is identified using the infrared spectroscopy, optical microscopy, and differential thermal analysis. PHMGP solution in water has the technical name FSG-1M. FSG-1M substance with the PHMGP concentration of 20 ÷ 24% is used for flame-retardant bioprotective treatment of textiles and paper, and the PHMGP concentration of 25 ÷ 28% - for flame-retardant bioprotective treatment of cane. The mechanism of FSG-1M fire-retardant bioprotective action is disclosed; it is implemented through the manifestation of the following effects: bioprotection and isolation of the surface of textiles, paper, and cane from oxygen and water diffusion out of the environment by creation of a PHMGP film on the material surface; inhibition of the active combustion centers and material thermal destruction with PHMGP thermal decomposition products; cooling by absorbing heat during PHMGP thermal transformation; inerting of gaseous degradation products of the material

surface layer with PHMGP thermal decomposition products, which reduces the share of hydrogen, methane, carbon monoxide and increases the inerting nitrogen.

The method of active fire protection of facilities using WBFRBA as an extinguishing charge for primary fire-fighting was developed. The optimum composition of a new generation substance, FSG-2M, was offered; its surface tension is 2 times less than that of water (at PHMGP concentrations 31.7% and 0.2% of the film-forming S.F.P.M. surfactant); it is forming a hydrogel (at a 50% PHMGP concentration), which has a higher insulating and cooling capacity as compared to water; it has pronounced inhibitory properties; the thermal decomposition products are able to inert the combustible gas mixture of material thermal degradation products, which meets the requirements for use as a primary fire extinguishing means. The use of FSG-2M allows obtaining the finely atomized jets with the droplet size less than 100 microns using the air jets with an overpressure of 0.8 MPa. The relative fire extinguishing ability of FSG-2M while extinguishing the A class fire is 4.9 times higher than the efficiency of water under the same supply conditions. 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.

This approach to solving the problem allowed offering a system of passive and active fire protection using WBFRBA in a general system of fire protection for a facility with the CBM fire load, which allows eliminating or containing the fire at an early stage of its development. 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.

The developed specifications for WBFRBA production are as follows: TU U 13672801.002-1999, TU U 24.6-32528450-001-2003, process production regulations DSA-1M, DSA-2M; TU U 24.6-32528450-002-2004, process production regulations FSG-1M, FSM-2M, and production base DSA-1M, DSA-2M, FSG-1M. The annual economic effect of implementing the developed facility fire protection system (as of 2017) is UAH 64.4 million.

Список публікацій здобувача:

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 пилоподавлення / 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 вогнезахищеної 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) ДО6М 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) ДО6М 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. Жартовсьький // Матеріали 14-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників 26-27 вересня 2012, м. Київ,- 2012, С. 180 – 183.

30. Жартовский 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, ЧІПБ 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, ЧІПБ 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 ІІ-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуації 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: ІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України.- 2018, - С.40 – 41.

Зміст

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів 24
Вступ 26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖАМ НА ОБ'ЄКТАХ З ПОЖЕЖНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ……..……. 37
1.1. Аналіз статистичних даних про рівень захисту об'єктів в Україні від пожеж ……..……... 37
1.2. Аналіз робіт провідних вітчизняних та закордонних вчених в галузі захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку …….…..…. 44
1.3. Вогнезахист целюлозовмісних матеріалів для пасивного захисту об'єкта від пожеж …..……. 53
1.3.1. Водні вогнебіозахисні речовин для целюлозовмісних матеріалів… 56
1.3.1.1. Водні вогнебіозахисні речовини для деревини…….…… 56
1.3.1.2. Водні вогнебіозахисні речовини для тканин, паперу, очерету…… 60
1.3.2. Закономірності процесів, що впливають на рівень вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів 63
1.4. Водні вогнегасні речовини для активного захисту об'єктів від пожеж …….…… 69
1.5. Формулювання наукової проблеми і задач дослідження……. 78
Висновки до розділу 1 ……. 82
РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ В МЕТОДАХ АКТИВНОГО І ПАСИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ З ПОЖЕЖНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ 84
2.1. Загальна методика виконання досліджень……. 84
2.1.1. Системний підхід до забезпечення захисту об'єкта від пожеж…..... 84
2.1.2. Систематизація елементів протипожежного захисту об'єкта …..... 90

2.2. Теоретичне обґрунтування ефективності використання водних вогнебіозахисних речовин в методах пасивного і активного протипожежного захисту об’єкта ……. 94
2.3. Математична модель розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини ……..…… 106
2.4. Математична модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння 113
2.5. Математична модель охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого водною вогнебіозахисною речовиною 123
2.6. Удосконалення феноменологічної моделі процесу висолювання антипірену з деревини за наявності плівки полімерного антисептика на її поверхні 139
Висновки до розділу 2…..... 145
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПАСИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ’ЄКТІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН…….. 148
3.1. Загальні вимоги щодо розроблення і застосування водних вогнебіозахисних речовин для протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням із деревини 148
3.2. Обгрунтування складу водної вогнебіозахисної речовини нового покоління для протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням із деревини 159
3.2.1. Реалізація ефектів ізолювання і біозахисту при використанні полімерного антисептика у складі водної вогнебіозахисної речовини .. 159
3.2.2. Реалізація ефекту інгібування активних центрів горіння продуктів термічного розкладу деревини при використанні суміші фосфатів та сульфатів амонію у складі водної вогнебіозахисної речовини 163
3.2.3. Реалізація ефектів охолодження та флегматизування зони термодеструкції деревини при використанні суміші сольових

антипіренів та полімерного антисептика у складі водної вогнебіозахисної речовини 166
3.2.4. Оптимальний склад компонентів водних вогнебіозахисних речовин для деревини 171
3.3. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищеної деревини 174
3.3.1. Дослідження процесів займання та припинення горіння вогнебіозахищеної деревини 174
3.3.2. Дослідження здатності до поширення полум'я поверхнею вогнебіозахищеної деревини 177
3.3.3. Дослідження димоутворювальної здатності вогнебіозахищеної деревини та токсичності продуктів її горіння 180
3.4. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на строки збереження вогнезахисних та експлуатаційних характеристик вогнебіозахищеної деревини на протязі її експлуатації 186
3.5. Дослідження впливу якісного і кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на подовження тривалості початкової стадії пожежі на об'єктах з пожежним навантаженням із деревини 194
3.6. Феноменологічна модель вогнезахисту деревини, що оброблена екологічно безпечними водними вогнебіозахисними речовинами ДСА-1М, ДСА-2М 198
3.7. Загальні вимоги щодо розроблення і застосування водних вогнебіозахисних речовин для протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із тканин, паперу, очерету 202
3.8. Обгрунтування складу водної вогнебіозахисної речовини нового покоління для захисту об'єктів з пожежним навантаженням із тканин, паперу і очерету 207
3.9. Ідентифікація водної вогнебіозахисної речовини на основі

полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду 213
3.10. Реалізація ефектів ізолювання, охолодження, флегматизування та інгібування при використанні для вогнебіозахисту тканин, паперу, очерету водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметилен-гуанідингідрофосфат карбаміду 217
3.11. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищених тканин і паперу 221
3.12. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищеного очерету..... 230
3.13. Феноменологічна модель процесу вогнезахситу тканин, паперу, очерету, оброблених водною вогнебіозахисною речовиною ФСГ-1М.. 237
Висновки до розділу 3…..... 239
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН В ЯКОСТІ ЗАРЯДІВ ПЕРВИННИХ ЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ……..……..…….. 244
4.1. Обгрунтування вимог до водних вогнебіозахисних речовин для застосування в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння 244
4.2. Розроблення оптимального складу водної вогнебіозахисної речовини для застосування в якості заряда первинних засобів пожежогасіння…. 250
4.3. Дослідження закономірностей впливу якісного і кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М на процеси гасіння ЦВМ… 260
4.4. Дослідження закономірностей впливу якісного і кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М на процеси гасіння пожежі класу В…..... 263

4.5. Феноменологічна модель вогнегасної дії водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М під час гасіння пожеж класів А та В на початковій стадії їх розвитку 266
Висновки до розділу 4 269
РОЗДІЛ 5. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТА, В ЯКІЙ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ МЕТОДИ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН 271
5.1. Сутність і алгоритм методу пасивного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин…….. 271
5.2. Сутність і алгоритм методу активного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин…….. 285
5.3. Побудова системи протипожежного захисту об'єкта, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин ..… 292
Висновки до розділу 5 297
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЄЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТА, В ЯКІЙ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ МЕТОДИ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН 298
6.1. Розроблення нормативно-технічної документації для створення виробництва екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин 298
6.2. Оцінювання технічної ефективності системи протипожежного захисту об'єкта із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин…. 303
6.3. Оцінювання економічної ефективності системи протипожежного захисту об'єкта із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин … 308
Висновки до розділу 6 312

ВИСНОВКИ 313
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 318
ДОДАТКИ 349
Додаток А. Нормативні документи щодо виробництва водних вогнебіозахисних речовин…… 349
Додаток Б. Нормативні документи щодо застосування водних вогнебіозахисних речовин…… 357
Додаток В. Методики досліджень і випробувань. Протоколи випробувань .. 374
Додаток Г. Матеріали, що підтверджують впровадження результатів дисертаційної роботи…… 403
Додаток Д. Нормативна база щодо створення та застосування водних вогнебіозахисних речовин для протипожежного захисту об’єктів ..…… 415

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів

Активний протипожежний захист – застосування речовин, техніки, засобів, що придатні в любий час бути мобілізованими для гасіння пожежі на об’єкті.

Антипірен – за ДСТУ 2272: вогнезахисна речовина, додаванням якої в матеріал знижують його горючість.

Антисептик – за ГОСТ 20022.1-90 : захисна речовина, яка підвищує біостійкість деревини.

Вогнезахист - за ДСТУ 2272: зниження показників пожежної небезпечності матеріалу чи підвищення вогнестійкості конструкції.

Вогнезахисне просочування - за ДСТУ 2272: обробляння поверхні горючого матеріалу просочувальною вогнезахисною речовиною задля його вогнезахисту.

ВВР – водні вогнегасні речовини.

ВВЗР – водні вогнезахисні речовини.

ВВБЗР – водні вогнебіозахсині речовини.

Гелі – гомогенні та/або гетерогенні системи, зазвичай колоїдні розчини та/або розчини полімерів, які характеризуються деякими властивостями твердих тіл: здатністю зберігати форму, міцністю, пластичністю, пружністю.

Жар – розігріте вугілля.

Звуглювання - за ДСТУ 2272: утворення карбонізованого залишку внаслідок піролізу чи неповного згоряння органічної речовини або матеріалу.

Ймовірність впливу небезпечних чинників пожежі - за ДСТУ 2272: числова характеристика ступеня можливості впливу небезпечних чинників пожежі із заданими значеннями їх параметрів.

НДР – науково-дослідна робота.

Об’єкт захисту – за ГОСТ 12.1.004-91: будівля, споруда, приміщення, процес, технологічна установка, речовина, матеріал, транспортний засіб, вироби, а також їх елементи і сукупність.

Пасивний протипожежний захист – застосування заходів вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час гасіння пожежі на об’єкті.

Первинний засіб пожежогасіння - за ДСТУ 2272: технічний засіб, речовина, матеріал або їх комплекс, придатний (-а) до використання людиною для локалізації і (або) ліквідування пожежі на її початковій стадії.

Пожежне навантаження – горючі матеріали, розташовані в межах об’єкта.

ППЗО - протипожежний захист об’єкта.

ППР – проектування протипожежних робіт.

ПСРП – початкова стадія розвитку пожежі.

Продукти згоряння - за ДСТУ 2272: речовини й матеріали, які утворюються в результаті горіння.

СЗПБО (система забезпечення пожежної безпеки об’єкта) – за ДСТУ 2272: сукупність засобів та організаційних заходів, призначених для протипожежного захисту і запобігання пожежі на об’єкті.

Система (підсистема) – будова, структура, що становить єдність закономірно розташованих та функціонуючих частин.

СППЗО (система протипожежного захисту об’єкта) – сукупність організаційних заходів і технічних засобів, призначених на протидію впливу на людей небезпечних факторів пожежі і зменшення матеріального збитку від нього.

ТГМ – тверді горючі матеріали.

ЦВМ - целюлозовмісні матеріали (деревина, тканини, папір, очерет).

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан пожежної безпеки в багатьох країнах світу не відповідає вимогам сьогодення. На жаль, Україна входить до переліку цих країн. Пожежа чинить прямий негативний вплив на людину тепловою дією і отруєнням токсичними продуктами згорання та опосередкований – шляхом забруднення навколишнього середовища. Кількість пожеж та кількість загиблих на них людей протягом останніх десяти років не уклінно зростала, при чому переважна більшість летальних випадків - внаслідок отруєння. Значна кількість пожеж виникла на об'єктах, що віднесені до категорій з цивільного захисту, які повністю або частково можуть бути включені до переліку об'єктів критичної інфраструктури, тобто об'єктів, порушення функціонування або руйнування яких призводить до найсерйозніших наслідків для соціальної та економічної сфери держави, негативно впливає на рівень її обороноздатності та національної безпеки. В останні роки збільшився відсоток пожеж, що виникли внаслідок терористичних атак – підпалів.

Інтенсивний розвиток будівництва супроводжується збільшенням пожежного навантаження на об'єктах зазначених категорій. 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 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 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 P.J. 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 C.J. Ballhausen, R.S. Mulliken, H.B. 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: P.M. Kennedy, І.М. Абдурагімов, Ю.О. Абрамов, В.В. Азатян, А.В. Антонов, А.М. Баратов, А.С. Бєліков, О.О. Кірєєв, Д.О. Корольченко та інші. В розробляння засобів і заходів для пасивного протипожежного захисту (в розроблення 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. Березделвін, А.С. Бєліков, В.М. Жартовський, М.А. Касьянов, А.І. Козлюк, Н.І. Константинова, Ф.А. Левітес, Н.А. Максименко, С.В. Поздєєв, І.Г. Романенков, Н.А. Тичино, 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 інш.), 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.

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 УкрНДІЦЗ 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 УкрНДІЦЗ 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 методику 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 високоефективних 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 обробляння 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 ^{o}C і зменшує токсичність продуктів горіння, та метод активного захисту з використанням ВВБЗР в якості заряду для первинних засобів пожежогасіння, застосування яких унеможливлює повторне займання ЦВМ.

Удосконалено:

1. 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.

Дістав подальший розвиток:

1. Метод оцінювання рівня вогнезахисту дерев’яних конструкцій, в основу якого покладене співвідношення значень температур займання вогнезахищеної та вогненезахищеної 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 пожежним навантаженням 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 вогнебіозахисту деревини, тканин, паперу і очерету, які в подальшому використано при розробці технічних умов виготовлення та регламентів використання ВВБЗР, що серійно виробляються на потужностях ТОВ «Вогнебіозахист» (м. Київ) та ТОВ «Захист-Центр» (м. Київ). Ці підприємства забезпечують сертифікованими ВВБЗР близько 5-6 тисяч об'єктів в Україні на рік.

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. Крім того, результати дисертації впроваджено у навчальний процес Національного університету цивільного захисту України (за напрямами підготовки «Цивільний захист» та «Пожежна безпека») 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 прогнозні показники щодо збереження ефективного вогнезахисту виробів із деревини, що оброблені різними просочувальними засобами. В роботі [6] проведено порівняльний аналіз умов випробування вогнезахищеної 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 снові 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 методики математичного моделювання розподілу антипіренів в середині вогнезахищеної 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 таблиць, 66 ілюстрацій, список використаних джерел із 297 найменувань та 5 додатків.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЗАПОБІГАННЯ ПОЖЕЖАМ НА ОБ'ЄКТАХ З ПОЖЕЖНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Протягом останніх десятиліть спостерігалась недосконаліть захисту об'єктів від пожеж при відсутності належного регулювання з боку органів державної влади. Для усунення цього недоліку була проведена необхідна робота відповідними державними організаціями та науковими установами щодо виконання Загальнодержавної цільової програми цивільного захисту на 2009 – 2013 роки. Результатом цієї роботи стало прийняття Кодексу цивільного захисту України [143]. Кодекс регулює відносини, пов'язані із захистом населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій (НС), до яких віднесено і пожежі. Протипожежний захист став невід'ємним елементом сфери цивільного захисту щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, спричинених пожежами.

1.1. Аналіз статистичних даних про рівень захисту об'єктів в Україні від пожеж

Рівень захисту об'єктів в Україні, як і в багатьох країнах світу, знаходиться на неналежному рівні. Так в Концепції Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011 – 2015 [148] роки прямо зазначено, що прийняті впродовж 2002-2008 років галузеві та регіональні цільові програми забезпечення пожежної безпеки, а також інші програми, до яких включені окремі заходи щодо забезпечення пожежної безпеки, не виконані в повному обсязі.

За офіційними даними в останні 10 років реєструється більше 60 тисяч пожеж щорічно. Результати проведеного фахівцями Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту в 2017 році моніторингу стану з

пожежами в Україні за даними масивів карток обліку пожеж територіальних органів ДСНС України вказують на сталі тенденції, що вказували на щомісячне зростання основних показників статистики пожеж в Україні. Упродовж 2017 року в середньому щодня виникало 228 пожеж (у 2016-му – 203), внаслідок яких гинуло п’ятеро та діставало травми четверо людей, вогнем знищувалося або пошкоджувалося 68 будівель і споруд, 12 одиниць техніки. Щоденні матеріальні втрати від пожеж становили 21,5 млн грн (на 7,4 млн грн більше, ніж в 2016 році).

Упродовж 2017 року основною причиною виникнення пожеж (рис. 1.1) було необережне поводження з вогнем (59 197 пожежі або 71,2 % від загальної їх кількості). Ранжування пожеж в абсолютних показниках за причинами їх виникнення наведено на рис. 1.1.

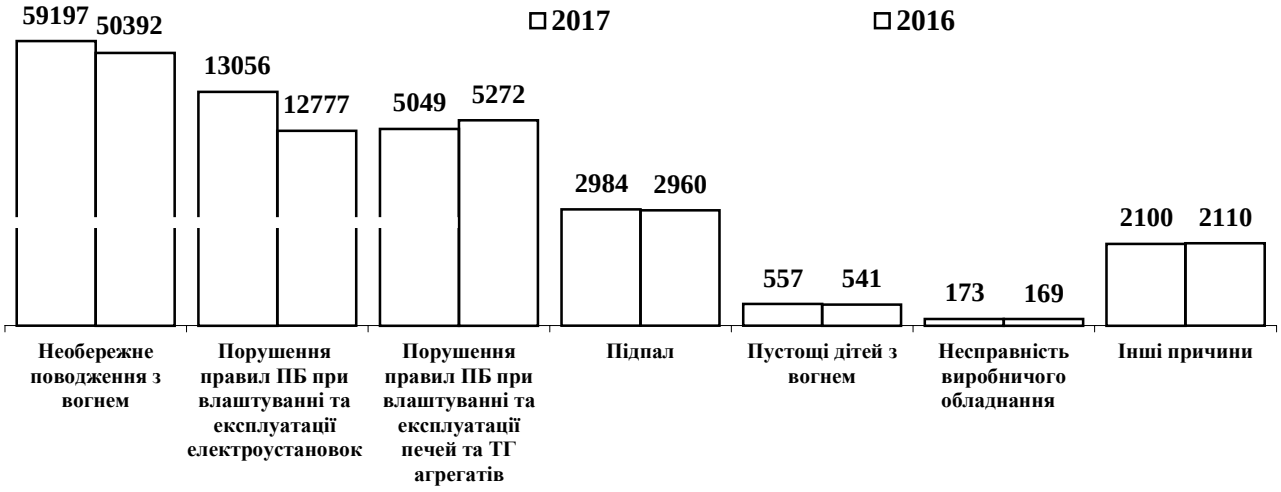


Рисунок 1.1 - Ранжування кількості пожеж за причинами їх виникнення

Серед основних причин виникнення пожеж особливу увагу слід звернути на пожежі, що виникли з причини підпалів, які минулого року знову зросли порівняно із попереднім.

Відсутність тенденції до зменшення відсотка виникнення пожеж в результаті необережного поводження з вогнем свідчить про недостатній (мало

ефективний) протипожежний захист об’єктів, особливо об’єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів (деревини, тканин, паперу, очерету), які здатні загоратися від малокалорійного джерела займання [288].

Статистичні дані використовують для оцінювання рівня пожежної безпеки як окремого об’єкта, так і держави в цілому. Загально визнаної методики щодо визначення рівня пожежної безпеки (або рівня протипожежного захисту об’єкта) іще не існує. В багатьох країнах світу проводиться розроблення аналітичних методів оцінки рівня пожежної безпеки об’єктів. Вони зумовлені трьома головними причинами: по-перше, намаганням отримання максимального економічного ефекту від проведення протипожежних заходів; по-друге, покращити процес проектування об’єктів та систем протипожежного захисту шляхом забезпечення мінімально допустимого рівня пожежної безпеки при заданому рівні ризику; по-третє, можливістю аналізу небезпечних ситуацій на об’єкті з урахуванням можливості спрощеної методики проектування.

В роботі [288] наведені принципи системного аналізу рівня пожежної безпеки, які задовольняють перерахованим вимогам. Здійснення аналізу пов’язують з вибором основних напрямків протипожежного захисту та способів його забезпечення. Літературні джерела [37, 38, 45, 171, 186, 189, 197, 234, 258, 266, 270, 276, 277, 281, 284] вказують на те, що методи, які використовують визначення небезпеки виникнення пожежі, можуть бути поділені на три групи. До першої відносяться методи оцінювання рівня пожежної небезпеки, які ґрунтуються на індексації небезпеки. Вони дають можливість розраховувати умовний рівень пожежонебезпеки і застосовуються для класифікаційного порівняння об’єктів за ступенем небезпеки.

Друга група включає детерміновані методи оцінювання допустимого рівня небезпеки, у відповідності до яких визначають параметри, що характеризують можливі значення пожежовибухонебезпечності речовин і матеріалів на об’єкті.

До третьої групи можна віднести об’єднуючі статистично-ймовірнісні методи, які використовують для розрахування ймовірності виникнення пожежі на об’єкті, оскільки враховують випадковий характер пожежонебезпечних подій.

Для з’ясування порівняльного рівня пожежовибухонебезпечності об’єкта пропонуються регресивні моделі, які ґрунтуються на точечних схемах. Загальним для таких систем є призначення точок, які відображають різні фактори, що впливають на рівень пожежної безпеки [288].

Виділяють два види факторів, які характеризують, з одного боку, небезпеку виникнення пожежі і її розвиток (*Y*), а з іншого боку – зменшення небезпеки виникнення пожежі і її розвиток (*Z*). Під ризиком *X* (чисельна оцінка небезпеки пожежі) приймається співвідношення числа точок *Y* та *Z*.

Варіанти виразів для оцінювання ризику *X* можуть бути представлені співвідношеннями:

$$X = Y - Z = \sum_{i=1}^{n} Y_i - \sum_{i=1}^{m} Z_i \ ; \tag{1.1}$$

$$X = \frac{Y}{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{m} Z_i}; \tag{1.2}$$

Умовність методу полягає у розподілені точок і оцінюванні значень різних факторів *Y* та *Z*, які за звичай вирішуються шляхом експертного опитування.

Широкого розповсюдження набув точковий метод Гретенера [34, 36, 45, 171, 186], який використовує другий вид співвідношення *Y* і *Z*:

$$R = \frac{PA}{NSF}, \tag{1.3}$$

де *R* – значення збитку (рівень ризику);

P – пожежне навантаження;

A – пожежна небезпека;

N – наявність водозабезпечення, пожежних підрозділів;

S – наявність пожежної автоматики;

F – вогнестійкість конструкцій.

Спочатку оцінюють пожежну небезпеку об’єкта (чисельник формули), для цього враховують розміри, тип і будівельні матеріали об’єкта, їх горючість, токсичність та інші показники пожежовибухонебезпечності матеріалів. Після цього оцінюють фактори захисту (знаменник формули): забезпеченість водою та іншими вогнегасними речовинами, наявність засобів сповіщення і гасіння пожеж, забезпеченість іншими засобами захисту та інш.

Кожному фактору присвоюється коефіцієнт, величину якого вибирають із значень заздалегідь розроблених таблиць.

Значення R вказує на те, чи достатніми були заходи захисту: якщо $R > 1$, то вважається, що протипожежний захист є недостатнім і його необхідно посилити.

Статистично-ймовірнісні методи знайшли своє застосування в нормативних документах. Так, наприклад, міжнародний стандарт ГОСТ 12.1.004 [197] побудований на ймовірнісному підході. Зазначений документ регламентує вимоги до заходів з пожежної профілактики і систем протипожежного захисту, що виходять з умов, щоб ймовірність впливу на людину небезпечних факторів пожежі, які перевищують межу можливих значень, була не вище 10^{-6} на рік. Призначення в цьому стандарті визначеного рівня безпеки є важливою обставиною, яка забезпечує принципову можливість обґрунтованого вибору систем захисту і витрат на них. Необхідно відзначити, що вказаний нормативний рівень є достатньо обґрунтованим і реально може бути досягнутим.

До небезпечних факторів пожежі необхідно віднести негативний вплив пожежі на екологію. Як відзначалось вище, при горінні ЦВМ в навколишнє середовище попадають високотоксичні продукти. Із збільшенням кількості пожеж збільшується екологічний ризик [258]. Цей ризик збільшувався також

внаслідок проведення вогнебіозахисних робіт на об’єктах при використанні речовин, що тривалий час вироблялись за технічними умовами за ГОСТ 28815 [63]. В результаті чого спрямовано накопичувалась велика кількість шкідливих речовин, а саме, солей важких металів (хрому, міді), пентафенолята натрію, фториду натрію та інш. За будівельними нормами і правилами кожного року на об’єктах з масовим перебуванням людей виконувалось вогнебіозахисне обробляння дерев’яних будівельних конструкцій зазначеними речовинами [63]. Автори [45, 189] під екологічним ризиком розуміють ймовірність збитків для навколишнього природного середовища та/або здоров’я людей від негативної події, яка має відповідну ймовірність своєї реалізації.

Як зазначається в роботі [37], нормативне значення індивідуального пожежного ризику було взяте в основному з голландських літературних джерел. В таблиці 1.1 наведено середні значення індивідуального пожежного ризику за 2004 – 2008 рр. в чотирьох державах Європи.

Таблиця 1.1

Середнє значення індивідуального пожежного ризику за 2004 – 2008 рр. в державах Європи [270]

№ п/п	Держава	Середнє число загиблих на пожежі		
		за рік	на 1 млн. населення	на 100 пожеж
1	Голандія	64	3,9	0,51
2	Україна	3982	86,0	8,06
3	Білорусь	1142	117,4	11,00
4	Росія	17147	121,3	7,81

Дані таблиці 1.1 засвідчують, що в Голландії нормативне значення індивідуального пожежного ризику 10^{-6} може бути прийнятим, а для держав колишнього СНД, враховуючи сучасний соціально-економічний рівень розвитку, значення його можливо прийняти в діапазоні $10^{-4} \div 10^{-5}$ в рік [270].

Зазначені дані свідчать про те, що держави колишнього СНД, на 20 -30 років відстають за цими показниками від європейських держав. Особливо велике відставання спостерігається у вирішені проблеми з реалізації ефективного захисту об’єктів від пожеж на початковій стадії їх розвитку. Тільки на початку XXI століття в Україні почали проводитись науково-дослідні роботи щодо протипожежного захисту об’єктів шляхом вогнезахисного обробляння антипіренами целюлозовмісних матеріалів. Виробництво водяних вогнегасників як засобів первинного пожежогасіння теж тільки-но почало розвиватися. Дані щодо первинних засобів пожежогасіння (в тому числі вогнегасників), які були використані при гасінні пожеж за 2005-2012 роки наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Відомості щодо первинних засобів пожежогасіння (в тому числі вогнегасників), які були використані при гасінні пожеж за 2005-2012 роки

Тип вогнегасників	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
Вогнегасник пінний	40	32	36	38	27	24	30	25
Вогнегасник вуглекислотний	325	308	312	288	299	238	248	215
Вогнегасник хладоновий	3	2	2	5	0	2	7	0
Вогнегасник порошковий	608	536	526	755	780	805	714	658
Вогнегасник водяний	3	9	10	8	3	9	8	6
Інші вогнегасники	7	3	10	5	21	13	6	9
Кількість пожеж, потушених з використанням первинних засобів пожежогасіння (в тому числі вогнегасників)	**986**	**890**	**896**	**1099**	**1130**	**1091**	**1013**	**898**
Кількість пожеж, потушених вогнегасниками	**463**	**412**	**460**	**537**	**535**	**599**	**568**	**489**
Кількість пожеж в будівлях, спорудах та на транспорті	**41686**	**40387**	**41968**	**38335**	**36370**	**37489**	**37822**	**44051**
Питома вага пожеж, потушених з використанням первинних засобів пожежогасіння (в тому числі вогнегасників)	**2,4**	**2,2**	**2,1**	**2,9**	**3,1**	**2,9**	**2,7**	**2,5**
Питома вага пожеж, потушених вогнегасниками	**1,1**	**1,0**	**1,1**	**1,4**	**1,5**	**1,6**	**1,5**	**1,1**

Дані таблиці 1.2 свідчать про те, що тільки 2,5 % пожеж, що відбулись в будинках, спорудах та на транспорті, було погашено на початковій стадії їх розвитку, оскільки підрозділи пожежної охорони прибувають для гасіння на стадії пожежі, що розвивається. Треба також відзначити, що після гасіння

пожежного навантаження з ЦВМ вуглекислотою або вогнегасним порошком (якість яких останнім часом погіршилася через додавання до їх складу інертних домішок) часто-густо відбувається повторне займання. Водяні ж вогнегасники мають малоефективні заряди [25, 26].

1.2. Аналіз робіт провідних вітчизняних та закордонних вчених в галузі захисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом попередження, локалізації і ліквідації пожеж на початковій стадії їх розвитку

Пожежне навантаження в умовах реальної експлуатації об'єкта (функціональна пожежна небезпека) складається з великої кількості різних матеріалів і виробів. Для вирішення загальних питань доцільно вибрати базовий матеріал, який, не змінюючи головну фізичну картину досліджуваного процесу, дозволяє позбутися практичної невизначеності під час аналізу реального пожежного навантаження для захисту об'єкта від пожеж.

Статистичний аналіз, що виконаний у ВНДІПО МВС СРСР в кінці XX століття [26], свідчить про наступне. Значна кількість пожеж характеризується тим, що горючими матеріалами є деревина і тканини, особливо на об'єктах з масовим перебуванням людей, де в 70,09 % випадках деревина була основним горючим матеріалом. А кількість загиблих людей в цих випадках складає 92 % від загального числа загиблих людей на пожежах.

Враховуючи зазначений аналіз [26], можна зробити припущення, що якщо до пожежного навантаження із деревини і тканин додати матеріали і вироби з паперу і очерету, то в якості базового пожежного навантаження об'єкта слід вважати целюлозовмісні матеріали (деревина, тканини, папір, очерет). В літературі часто-густо целюлозовмісні матеріали (ЦВМ) визначають як тверді горючі матеріали (ТГМ) [74].

При горінні ЦВМ температурний режим пожежі залежить від кількості пожежного навантаження в приміщенні і досягає максимального значення

800÷830^{0}С на 20-й хвилині пожежі при питомому навантаженні 25 кг/м^2,

830÷850 ^{0}С на 35-й хвилині пожежі при питомому навантаженні 50 кг/м^2,

950÷1000 ^{0}С на 70-й хвилині пожежі при питомому навантаженні 100 кг/м^2 [74].

За часом розвитку пожежі розподіляють на декілька стадій [26, 74]. Початкова стадія розвитку пожежі (ПСРП) включає в себе час від виникнення горіння до повного охоплення полуменевим горінням поверхні горючого навантаження (рис.1.2). Довготривалість цієї стадії залежить від виду і кількості горючого навантаження, потужності джерела займання, конструктивно-планувальних характеристик приміщення і може змінюватися в широких межах. Стадія пожежі, що розвивається, включає в себе період від повного охоплення полум'ям поверхні пожежного навантаження до досягнення постійної швидкості вигорання матеріалів пожежного навантаження. Стадія розвинутої пожежі характеризується досягненням найбільшої її інтенсивності. Всі параметри, що характеризують розвиток пожежі (швидкість вигорання, газообмін, концентрація продуктів згорання, температура, теплові потоки), мають максимальне і практично постійне значення. Стадія пожежі, що затухає, починається з моменту зменшення швидкості вигорання пожежного навантаження і завершується моментом досягнення початкового значення середньооб'ємної температури.

Середньооб'ємна температура є характеристикою пожежного навантаження і умов газообміну. При ПСРП вона досягає діапазону значень 235÷250 ^{0}С, що відповідає температурі займання незахищеної деревини (в залежності від породи деревини). В залежності від умов розвитку пожежі (площі та об'єму приміщення, площі та об'єму пожежного навантаження, наявності отворів тощо) перехід від ПСРП до стадії, що розвивається може відбуватися з явищем «загального спалаху», що пов'язане з різким зростанням тиску в осередку пожежі і, як наслідок, з подальшим руйнуванням отворів.

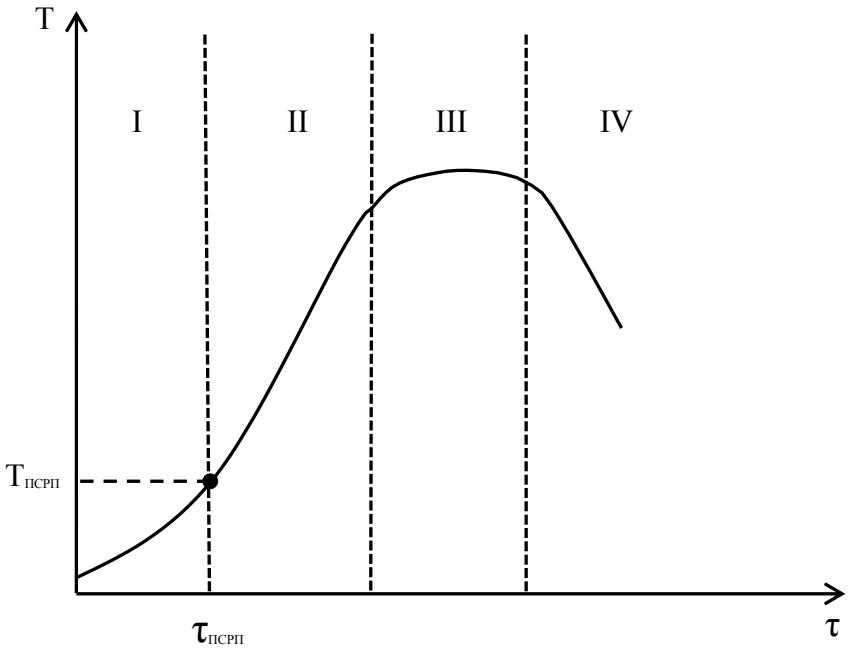


Рисунок 1.2 - Характер зміни середньооб'ємної температури пожежі в приміщені з пожежним навантаженням із деревини [26]: I – початкова стадія розвитку пожежі; II – стадія пожежі, що розвивається; III – розвинута стадія пожежі; IV – стадія пожежі, що затухає

Тривалість ПСРП ($\tau_{ПСРП}$) є перемінною характеристикою і за середньостатистичними даними становить 5÷13 хвилин [26]. Ця характеристика є також найбільш значущою при встановлені нормативів прибуття пожежних підрозділів на пожежу. В Україні відповідними нормативними актами встановлено, що час прибуття підрозділів пожежної охорони місце пожежі в містах не повинен перевищувати 5 хвилин, а в сільській місцевості – 12 хвилин [200].

Наприкінці XX століття вважалося, що арсенал вогнегасних речовин і технічних засобів їх подавання є достатнім, щоб при правильній організації бойової роботи забезпечувати локалізацію та гасіння пожеж на ПСРП. Для цього пожежні частини забезпечувались пінними та порошковими вогнегасними речовинами, технічними засобами для подавання компактної, розпиленої та тонко розпиленої води, системами створення водних завіс та

іншим технічним устаткуванням для успішного гасіння порівняно нескладних пожеж. Але некерована урбанізація останніх десятиліть при відсутності адекватних нормативів (а й часто-густо при їх порушенні) щодо щільності забудови значно погіршила можливість забезпечення якісного протипожежного захисту об'єктів. У всіх державах спостерігається зростання кількості пожеж, кількості загиблих на пожежах та зростання збитків. В Україні збільшується число випадків невиконання вимог щодо часу прибуття пожежних підрозділів на місце пожежі. Частіше всього підрозділи прибувають на стадії розвинутої пожежі, що значно ускладнює гасіння пожеж.

Дослідження фізико-хімічних основ і параметрів гасіння ТГМ дозволили науково обґрунтувати потрібну питому витрату води та інших вогнегасних речовин та фактичне фізичне обґрунтування часу гасіння [26]. Це дало можливість ввести поняття коефіцієнта використання вогнегасних речовин під час гасіння реальних пожеж, встановивши характер залежності $\upsilon_{пит} = f(F_п)$, де $F_п$ – площа пожежного навантаження. В результаті була запропонована методика науково обґрунтованого розрахунку сил і засобів, що потрібні для гасіння пожеж на об'єктах з масовим перебуванням людей [38]. Як показала статистика пожеж того часу (кінець XX століття) площа ординарної пожежі на момент прибуття пожежного підрозділу не перевищувала 10÷20 м^2 (а більше 80% таких пожеж мала площу $F_п \leq 5$ м^2). Розрахункові дані щодо питомої витрати вогнегасних речовин, які потрібні для гасіння пожеж на таких площах, дозволяли ставити під сумнів доцільність тогочасної тактики гасіння таких пожеж підрозділом у складі двох відділень (відділення у кількості 15 чоловік на автоцистерні та авто насосі). Проте, в роботі [38] прямо зазначається, що можливість форсування основного параметру – часу вільного розвитку пожежі – за існуючої тактики бойових дій та наявного пожежно-технічного озброєння майже повністю вичерпана. Отже, наявність перспектив скорочення часу вільного розвитку пожежі без кардинальних змін в тактиці та техніці гасіння

пожеж практично не має, що обумовлено станом систем комунікацій та інтенсивністю руху на вулицях і магістралях сучасних міст та селищ.

У 1986-1988 роках вважалось перспективним впровадження нового технічного рішення – створення автомобілів швидкого реагування (АШР) і пожежних автомобілів першої допомоги (ПАПД). Відповідні роботи було розпочато одночасно і в практиці пожежогасіння, і в наукових розробках. При цьому ідея полягала в тому, що на пожежу доцільніше прибути в складі підрозділу 3-5 чоловік, але за короткий час, ніж підрозділом в 15÷16 чоловік, але на 5-7 хвилин пізніше. Дослідження, що наведені в [38], показали, що застосування зазначеної концепції у тактиці гасіння пожеж на об'єктах з масовим перебуванням людей у будівлях I та II ступеня вогнестійкості дозволяє скоротити час вільного розвитку пожежі в середньому на 35÷40 %, що досить суттєво для початку пожежогасіння. Цей напрямок наукових досліджень розвивається і до тепер, але ефективність використання АШР та ПАПД у великих містах знижується через зростання інтенсивності трафіку та заторів на автошляхах.

Нові економічні умови останніх десятиліть сприяють переміщенню акценту концепції протипожежного захисту об'єкта з підвищення ефективності залучення підрозділів пожежної охорони на підвищення рівня захищеності від пожежі самого об'єкта. В цьому сенсі є дуже важливим облаштування об'єктів засобами первинного пожежогасіння, в першу чергу, вогнегасниками та автоматичними установками пожежогасіння. В роботі [38] наведено приклад натурних вогневих випробувань, що проводились УПО м. Запоріжжя в 1986 році. Фактичний (фізичний) час гасіння пожежі при потужному первинному джерелі займання (у вигляді 2÷3л суміші керосину та бензину на площі 0,2÷0,3м^2) становив 1÷2 хвилини, а питома витрата вогнегасного порошку «Пірант-А» склала всього 2÷3 кг/м^2.

Пасивний протипожежний захист мав би сприяти вирішенню зазначеної проблеми, але в багатьох випадках дерев'яні конструкції дахів або не захищені

взагалі, або захищені малоефективними засобами. Застосування води також призводить до додаткових збитків, особливо в адміністративних будівлях.

На теперішній час виконання процедур вогнезахисту ЦВМ і гасіння пожеж на об’єктах засвідчує, що, незважаючи на вимоги певних нормативних документів, в Україні відсутній системний підхід до вирішення проблем протипожежного захисту об’єктів.

На даний час в Україні діє міждержавний стандарт ГОСТ 12.1.004 [197], який декларує про необхідність створення на кожному об’єкті системи забезпечення пожежної безпеки об’єкта (СЗПБО). Відповідно до цього нормативного документа пожежна безпека об’єкта повинна забезпечуватись системами попередження пожежі і протипожежним захистом, а також організаційно-технічними заходами. Як зазначено в [148], сучасний стан пожежної безпеки в державі не відповідає вимогам нормативних документів і потребує реалізації комплексних довгострокових заходів, які повинні здійснюватись програмним методом. Особлива увага повинна приділятися системам захисту об’єктів від пожеж, яка складається з активного та пасивного протипожежного захисту.

Активний захист визначається застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в любий час бути мобілізованими для гасіння пожежі. *Пасивний захист* визначається застосуванням заходів вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час гасіння пожеж [104].

Стандарт [197] встановлює загальні вимоги безпеки об’єктів від пожеж на всіх стадіях життєвого циклу об’єкта: дослідження, розробка нормативних документів, проектування, конструювання, будівництво, виконання послуг, випробування, закупівля імпортної продукції, продаж продукції, зберігання, транспортування, встановлення, монтаж, наладка, технічне обслуговування, ремонт (реконструкція), експлуатація (застосування) і утилізація. Для об’єктів, що не відповідають діючим нормам, стандарт встановлює вимоги до

розроблення проектів, що компенсують небезпеку виникнення пожежі на стадіях будівництва, реконструкції і експлуатації об’єкта.

Системи забезпечення пожежної безпеки об’єктів повинні характеризуватися рівнем забезпечення пожежної безпеки людей і матеріальних цінностей, а також економічними критеріями ефективності цих систем для матеріальних цінностей, з урахуванням всіх стадій життєвого циклу об’єкта і виконувати одну з наступних задач:

- виключення можливості виникнення пожежі;
- забезпечення безпеки людей;
- забезпечення безпеки матеріальних цінностей;
- забезпечення безпеки людей і матеріальних цінностей одночасно.

Об’єкти повинні мати відповідні системи безпеки, що направлені на запобігання дії на людей небезпечних факторів пожежі, в тому числі їх вторинному прояву на необхідному рівні. Необхідний рівень забезпечення пожежної безпеки за допомогою зазначених систем повинен бути не менше за вірогідність 0,999999 запобігання дії небезпечних факторів на рік в розрахунку на кожний об’єкт.

Отже, СЗПБО являє собою складну систему, яка будується з трьох складових: системи запобігання пожежам, системи протипожежного захисту і системи організаційно- технічних заходів. Вони тісно взаємопов’язані і тому їх необхідно розглядати з одного боку як цілісну структуру, а з другого боку їх доцільно розглядати як окремі системи, оскільки в них діють багато різнопланових факторів, що приводять до різних за природою процесів.

Більш детально розглянемо систему протипожежного захисту об’єкта. Протипожежний захист за [197] повинен досягатися застосуванням одного із наступних способів або їх комбінації:

1. Застосування засобів пожежогасіння і відповідних видів пожежної техніки.
2. Застосування автоматичних установок пожежної сигналізації.

3. Застосування основних будівельних конструкцій і матеріалів, в тому числі таких, що використовуються для облицювання конструкцій, з нормованими показниками пожежної безпеки.

4. Застосування просочення дерев'яних конструкцій об'єкта антипіренами і нанесення на їх поверхню вогнезахисних фарб (покриттів).

5. Застосування пристроїв, що забезпечують обмеження розповсюдження пожежі.

6. Застосування організаційних заходів щодо використання технічних засобів, в тому числі автоматичних, для сповіщення про пожежу і евакуацію людей.

7. Застосування засобів колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі.

8. Застосування засобів протидимного захисту.

Для пожежної техніки повинні бути визначені:

- швидкодія і інтенсивність подавання вогнегасних речовин;
- допустимість вогнегасних речовин (в тому числі з позицій вимог екології та сумісності з горючими речовинами і матеріалами);
- джерела і засоби подавання вогнегасних речовин для пожежогасіння;
- нормативний (розрахунковий)запас спеціальних вогнегасних речовин (порошкових, газових, пінних, комбінованих);
- необхідна швидкість нарощування подачі вогнегасних речовин за допомогою транспортних засобів оперативних пожежних служб;
- вимоги до стійкості від дії небезпечних факторів пожежі і їх вторинних проявів;
- вимоги техніки безпеки.

Необхідно відзначити, що система протипожежного захисту об'єкта (СППЗО) залишається нерозвинутою складною системою з багатьма невирішеними науковими проблемами.

Хоча концепція пожежної безпеки кінця двадцятого століття й наголошувала на пріоритеті розвитку профілактичних робіт (протипожежного

захисту об’єктів), реально розвивався в основному тільки активний протипожежний захист. Розроблялись нові ефективні вогнегасні речовини, створювалась техніка для їх застосування, розроблялись відповідні нормативні акти і технічна документація, що значно покращило оперативно-тактичну діяльність пожежних підрозділів при протипожежному захисті об’єктів.

Значно повільніше розвивався напрямок пасивного протипожежного захисту об’єктів. Впровадження негорючих речовин і матеріалів у побуті та будівництві не дало відчутних результатів, оскільки будівельна галузь не відмовилась під природних матеріалів. Навпаки, у зв’язку із вимогами замовників щодо підвищення екологічності будівель, природні матеріали, в тому числі деревина, активно використовуються в будівництві. В зв’язку з цим пожежне навантаження об’єктів тільки зростала. Водночас вогнезахист деревини і виробів з неї розвивався дуже повільно, оскільки вогнезахист розглядався лише як додатковий компонент в загальній концепції захисту деревини від біоруйнування. Нормативно-технічна база розвивалась таким же шляхом: до ТК 19 майже не залучались спеціалісти з пожежної безпеки.

Згодом почалось розроблення водних вогнебіозахисних речовин (ВВБЗР). Ефективність вогнезахисту при цьому значно не покращилась, а екологічна небезпека об’єктів лише зросла тому, що в рецептурі вогнебіозахисних засобів були присутні особливо небезпечні і навіть отруйні для людини компоненти.

Таким чином, серед проблемних питань необхідно відзначити, що на об’єктах базове пожежне навантаження у вигляді ЦВМ майже невогнезахищена, застосовуються малоефективні вогнегасні речовини, а тому участь первинних засобів пожежогасіння в гасінні пожеж зовсім невелика. Невирішеність зазначених проблемних питань підтверджує актуальність реалізації ефективного захисту об’єктів від пожеж на початковій стадії їх розвитку.

Зазначені проблемні питання також унеможливлюють застосування системного підходу до створення СППЗО на основі методів пасивного і

активного захисту [104]. Хоча перспективним є створення СППЗО на основі використання ВВБЗР. Загальну схему імплементації такої СППЗО в структурі об’єкта можливо представити у вигляді, як запропоновано на рисунку 1.3. Отже, в кожному конкретному випадку необхідно визначити в елементах (підсистемах) пожежне навантаження, сформоване ЦВМ, що перебувають під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів пожежної небезпеки, та розробити комплекс заходів та засобів пасивного і активного протипожежного захисту.

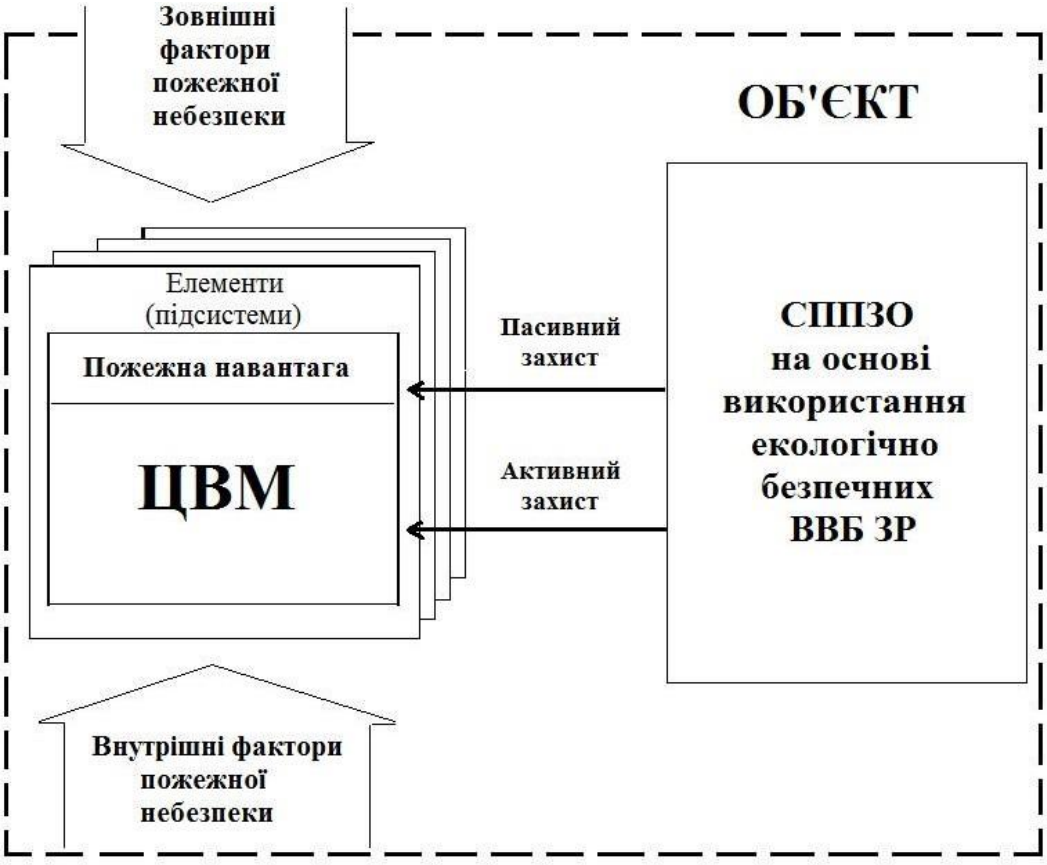


Рисунок 1.3 - Загальна схема імплементації СППЗО на основі використання ВВБЗР в структурі об’єкта

1.3. Вогнезахист целюлозовмісних матеріалів для пасивного захисту об’єкта від пожеж

Вогнезахист ЦВМ є актуальною проблемою, вирішення якої відбувається вже більше століття і постійно потребує удосконалення. Найбільшу увагу

приділяють вогнезахисту деревини і виробів з неї [13, 162, 208, 254, 247, 248, 250, 296]. Частіше всього користуються хімічним вогнезахистом, що полягає у введенні в структуру деревини уповільнювачів горіння (антипіренів). Для кожного класу (виду) матеріалів реалізується конкретний механізм захисної дії антипіренів. У теорії вогнезахисту деревини виділяють основних три підходи [13, 162, 208], які рекомендовано використовувати під час розробляння складу антипіренів [76, 162, 254]. Термодинамічний підхід має направляти піроліз ЦВМ в сторону зменшення виходу горючих газів і збільшення виходу карбонізованого шару. Кінетичний підхід передбачає інгібування процесів реакцій розкладу ЦВМ продуктами розкладу антипіренів. Технічний підхід передбачає створення вогнезахисних ізолюючих покриттів, які без втручання в структуру ЦВМ зменшують тепло- і масоперенос.

В залежності від ефективності вогнезахисних речовин і способів їх нанесення на ЦВМ, останні можна перевести із горючого стану у важкозаймистий або у важкогорючий стан. Використовуючи традиційні вогнезахисні речовини для деревини, можна досягнути важкогорючого стану із застосуванням спеціальної техніки, що реалізує методи глибокого просочення. Частіше всього використовують методи, що базуються на комбінуванні надлишкового тиску та вакууму. Але ці методи застосовуються лише при виготовленні (будівництві) нових деталей (конструкцій) з деревини, і їх не можливо застосувати для вже побудованих об’єктів. Для зведених об’єктів застосовують поверхневі способи вогнезахисного обробляння.

Важкозаймисті матеріали характеризуються нездатністю до займання від малокалорійних джерел займання. Такі матеріали при досягненні 5 хвилин від початку пожежі втрачають вогнезахисні властивості і не здатні в подальшому стримувати розповсюдження полум’я поверхнею [42, 43, 205, 246, 279]. Тобто це попереджувальний вогнезахист, який використовується для профілактики займання матеріалів у випадку, коли є передумови виникнення джерела займання при необережному поводженні з вогнем.

Важкогорючу вогнезахищену деревину поділяють на три підгрупи [64]: ІА, ІБ, ІВ. Важкогорюча деревина підгрупи ІВ характеризується здатністю протидії займанню в умовах початкової стадії розвитку пожежі. Такі умови сприятливі для успішної локалізації і ліквідації пожежі первинними засобами пожежогасіння.

Важкогорюча деревина підгрупи ІБ характеризується тим, що вона не повинна займатися і самостійно горіти в умовах пожежі, що розвивається, а важкогорюча деревина підгрупи ІА – в умовах розвинутої пожежі, відповідно.

Зазначена класифікація вогнезахтищеної деревини досить умовна і буде розглянута нижче.

Морфологічна побудова тканини і паперу значно відрізняється від такої у деревини. Проте пасивний протипожежний захист об’єктів з пожежним навантаженням із тканини, ковроліну і паперу також є актуальним. Досить часто фіксують загорання ковроліну в офісних приміщеннях при необережному поводженні з вогнем. Трапляються непоодинокі випадки займання завіс, костюмів та декорацій в театрах під час вистав, коли на сцені використовуються свічки. В таких випадках причиною швидкого розповсюдження полум’я є відсутність протипожежного оброблення виробів з тканин і паперу.

При вогнезахисті тканини фактору запобігання поширення полум’я і тління приділяється особливо велика увага, він відіграє вирішальну роль при вогнезахисному обробленні тканин. Це пояснюється надзвичайно розвинутою поверхнею тканин, що дає змогу швидкому їх горінню і тісному контакту з киснем повітря, який активізує процес тління матеріалу і може служити джерелом підпалювання прилеглих легкозаймистих матеріалів [7, 76, 147, 161, 172].

Як вже зазначалось, ефективний вогнезахист ЦВМ може бути досягнутий комплексним застосуванням як вогнезахисних речовин, так і технічними засобами їх застосування. Звичайно, вирішальну роль відіграють вогнезахисні

речовини і саме їм приділено увагу в подальших дослідженнях. Найбільшого поширення знайшло використання водних вогнебіозахисних речовин (ВВБЗР).

1.3.1. Водні вогнебіозахисні речовини для целюлозовмісних матеріалів

1.3.1.1.Водні вогнебіозахисні речовини для деревини

Захист дерев'яних будівельних конструкцій від вогню шляхом просочення їх водними розчинами антипіренів відомий спеціалістам вже більше століття. Широкого застосування цій спосіб набув під час Другої Світової Війни: дахи будинків обробляли водними розчинами фосфатів амонію. На той час це було дієвим заходом щодо захисту будівель від підпалу авіаційними бомбами.

Масове здійснення вогнезахисних робіт щодо деревини не зазнало істотних змін за останні 50 років. Для захисту від загоряння фахівці продовжують рекомендувати в основному сполуки фосфору, бору, галогеніди, відомі ще з часів Ломоносова [49, 164, 165, 208, 209, 232, 265, 278, 294, 297].

Наприкінці XX століття в Україні введено в дію нормативний документ у вигляді міждержавного стандарту ГОСТ 28815 «Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия» [63]. В ньому наведено характеристики як суто біозахисних речовин, так і ВВБЗР. Підприємства добровільного пожежного товариства, що і до тепер зберігає за собою позицію одного з лідерів ринку виконавців вогнебіозахисних робіт, досить широко застосовують наступні ВВБЗР: МС (суміш діамонійфосфата, сульфата амонію, фторида натрію), ДМФ (суміш діамонійфосфата, карбаміду, фторида натрію), БС (суміш борної кислоти і карбоната натрію), ББ (суміш борної кислоти і бури), ХМББ (суміш біхромата натрію, мідного купоросу, борної кислоти, бури) та інші. Всі вони належать до захисних засобів, що легко висолюються і вимиваються. Високою стійкістю до вимивання характеризуються антипірени, розчинні в органічних розчинниках чи оліях. Однак ефективність вогнезахисту

такими антипіренами значно нижча, ніж водорозчинними, і при цьому зазвичай спотворюється текстура деревини та тканин [27, 209].

Проблема вимивання антипіренів із вогнезахищеної деревини на сучасному рівні вирішується технологією будівництва. У сучасному будівництві вогнезахищена деревина використовується з максимальним захистом від дії атмосферних опадів та інших можливих впливів. Так, дерев'яні елементи горищних покриттів (крокви, лати) практично не взаємодіють з водою [22, 237, 265].

В зазначений період широкого розповсюдження набули науково-дослідні роботи щодо комплексного захисту деревини від вогню та біоруйнування під загальним терміном «захист деревини» з явним пріоритетом біозахисту [49, 164, 165, 232, 278]. Дані нормативно-технічної документації [55, 58, 63] щодо ефективності та терміну експлуатації обробленої деревини є не реальними і заводять в оману працівників пожежної охорони і техногенного нагляду. Так в роботі [58] наведено, що після оброблення деревини засобом ББ (борна кислота і бура) з витратою 25 г/м^2 середній термін служби конструкцій із деревини складає 30 років. Якщо диференціювати загальний термін «захист деревини» на складові, зокрема визначити ефективність вогнезахисту деревини засобом ББ із зазначеною витратою і визначити термін служби вогнезахищеної конструкції, то вона складатиме не більше 1 року. Нажаль, це не єдиний прикрий випадок, так в документі [63] до 90 % речовин, які визначаються як вогнебіозахисними, є шкідливими для людини та оточуючого середовища і відносяться за [51] до речовин I та II класу небезпеки. Хибною є думка про те, що вогнебіозахисні речовини, що просочують деревину, знаходяться в капілярах і порах майже навічно. В дійсності через процеси висолювання вогнебіозахисні речовини під час експлуатації переходять у стан аерогеля та аерозоля [77, 105, 106, 230] і вони є шкідливими. Тому роботи щодо розроблення нових безпечних ВВБЗР необхідно віднести до актуальних задач.

Ефективність вогнезахисного оброблення деревини у значній мірі залежить від його способу і технології виконання. Найпростішим способом оброблення деревини є просочення її антипіренами, що поділяється на поверхневе і глибоке [20, 208, 247]. Поверхневим вважається просочення деревини антипіренами на глибину 3-4 мм, а глибоке – на глибину більше 10 мм. Глибоке просочення стали застосовувати в 50-х роках XX століття для збільшення терміну експлуатації вогнезахищених конструкцій із деревини. Як показала практика і подальші науково-дослідні роботи, при цьому нехтувався причинно-наслідковий зв’язок [106]. Застосовували глибоке просочення під час використання антипіренів, які швидко висолювались, але сам процес висолювання не було подолано.

Для дослідження питань щодо глибокого просочення деревини антипіренами була проведена велика кількість НДР [19, 129, 208, 224, 233], створена відповідна нормативно-технічна документація [53, 55, 58, 63, 64]. Запропоновані новітні технології з використанням автоклавів, вакуумних апаратів, апаратів різного виду випромінення.

Одним з найперспективніших способів реалізації глибокого просочення деревини є метод, що реалізує електрогідравлічний ефект [224], тобто імпульсний процес перетворення електричної енергії в механічну енергію гідродинамічного збурювання внаслідок електричного розряду в рідині. Результати експериментального визначення глибини просочення деревини антипіреном ВАНН-1 із застосуванням такої технології в порівнянні з традиційними методами автоклавного просочування та «нагрівання – холодна ванна», доводять, що метод на основі реалізації електрогідравлічного ефекту є більш економічним і технологічним: забезпечує просочення деревини на глибину 15 мм у середньому в 100 разів швидше. При цьому економляться значні кошти у зв’язку з відсутністю необхідності попереднього висушування деревини.

Методи глибокого просочення спрямовані на збільшення кількості антипірену і антисептика в деревині і, в підсумку, на одержання вогнебіозахищеної деревини першої групи ефективності [53]. Однак зі збільшенням їх в деревині погіршується їх фізико-механічні властивості [47, 184, 232].

Ці обставини вимагають використовувати для вогнебіозахисту деревини методом просочення ефективні способи, що здатні за малих витрат і за рахунок необхідної концентрації в поверхневому шарі забезпечувати високий рівень вогнезахисту. Виникає проблема, яка полягає в тому, що для надання матеріалам з деревини заданих вогнезахисних властивостей способом капілярного просочення потрібні гарантовані методи нового класу дії, які здатні при малих кількостях забезпечувати необхідний ступінь вогнезахисту деревини [163].

До недоліків технологій глибокого просочення необхідно віднести той факт, що такі технології можуть застосовуватись для оброблення нових конструкцій для об’єктів, які ще будуються. Для побудованих об’єктів не можна їх застосовувати під час проведення ремонтних робіт [163].

Для здійснення поверхневого просочення використовують сучасні безповітряні розпилювачі, які дуже компактні і мобільні при використанні на горищах.

Поверхневе просочення деревини згідно з [208] передбачає два типи оброблення: багаторазове нанесення вогнезахисного засобу на поверхню без просушування між інтервалами та з просушуванням. При цьому якість просочення характеризується утриманням захисного засобу або регламентується витратою просочувальної речовини у відповідності до технічної документації та регламенту з вогнезахисного оброблення дерев’яних конструкцій.

Для інтенсифікації процесу поверхневого просочування до водних розчинів антипіренів додають поверхнево-активні речовини (змочувачі).

Використовують розчини піноутворювачів, призначених для пожежогасіння (найчастіше несульфовані акрилалкілфеноли) [53, 150], при цьому вдається досягати ступеня поглинання антипіренів деревиною до 35-45 кг/м^3 або 100-120 г/м^2.

Низька ефективність ВВБЗР змусила наглядові органи ввести в нормативну документацію (Державні будівельні норми) вимоги щодо періодичності вогнебіозахисної обробки дерев'яних конструкцій. Визначалось, що вогнезахисне обробляння необхідно проводити щорічно [208]. Однак ці вимоги часто-густо порушувались. До того ж відсутність критерію визначення достатнього ступеню вогнезахисту тільки сприяло цьому. В результаті обробляння проводилось не щорічно, а раз на 2-3 роки, коли рівень вогнезахисту деревини вже не міг суттєво впливати на збільшення часу ПСРП. Ця проблема є актуальною і до теперішнього часу.

1.3.1.2. Водні вогнебіозахисні речовини для тканин, паперу, очерету

Галузь застосування виробів з тканин, паперу, очерету дуже різноманітна. Пожежне навантаження об'єктів дедалі зростає за рахунок все більш широкого використання зазначених матеріалів для декоративного оздоблення приміщень різного призначення. При цьому, найбільш широкого застосування набуло використання тканин.

На теперішній час вогнезахист тканин здійснюється за двома способами, обробленням готової тканини ВВБЗР та хімічним прищепленням спеціальних реагентів до макромолекул тканин. Останній спосіб дуже є витратним та має вибірковість до хімічної природи тканин. Він застосовується для виготовлення спеціальних тканин спеціального призначення і професійного одягу [146, 160]. Застосування першого способу залежить від фізико-хімічних властивостей антипіренів (солей) та фізичних параметрів матеріалу: величин поверхні, об'єму і маси. Істотним фактором, який впливає на швидкість горіння

матеріалу, є співвідношення поверхня : об’єм, поверхня : маса. Чим більші ці величини, тим більше швидкість горіння [35, 145].

Суть вогнезахисного ефекту в зазначених матеріалах (тканинах, папері, очереті), просочених ВВБЗР, можливо пояснити проходженням наступних фізичних процесів [35, 145]:

- під впливом теплоти складові вогнезахисного засобу випаровуються або дисоціюють із поглинанням тепла, достатнім для попередження можливості підвищення температури захищеного матеріалу до температури займання;
- негорючі гази, що виділяються при нагріванні, розбавляють горючі газоподібні продукти до незаймистого стану;
- при температурі, нижчій за температуру горіння, складові вогнезахисних засобів плавляться, утворюючи повітрянепроникний шар, який протидіє доступу повітря до поверхні матеріалу.

Наведений механізм вогнезахисту таких матеріалів слід вважати спрощеним, що потребує удосконалення. Дійсно, поглинання теплоти при розкладанні вогнезахисних солей не є вирішальним чинником, яким пояснюється ефект вогнезахисту. Наприклад, бура, що традиційно використовується в якості антипірену, за поглинанням теплоти поступається сірчанокислому кальцію ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), який практично не виявляє вогнезахисних властивостей. Те ж спостерігається для антипіренів – карбонату калію (K_2CO_3) і хлориду кальцію ($CaCl_2$) в порівнянні з гідрокарбонатом натрію ($NaHCO_3$) [60].

Чисельні кристалогідрати ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ та інші), які повністю втрачають кристалічну воду в межах температур, що відповідають діапазону температур активного термічного розкладання тканин, можуть сприяти посиленню ефекта вогнезахисту за рахунок додаткового поглинання теплоти. Однак вирішальної ролі не відіграють, бо при самостійному їх

введенні в матеріал, що захищається, спостерігається полуменеве горіння і тління матеріалу [93].

При використанні антипіренів не спостерігається залежності між кількістю газів, що виділяються, та їх вогнегасною ефективністю. Так, наприклад, хлористий та сірчанокислий амоній, бікарбонат натрію та інші, хоча й мають перевагу по кількості газів, що виділяються, поступаються вогнезахисній ефективності діамонійфосфату.

Пояснення вогнезахисної дії утворенням повітрянепроникного шару на поверхні тканини при плавленні антипірену також неспроможне для полуменевої стадії горіння матеріалу [107]. Наприклад, борна кислота, яка легко плавиться та здатна утворювати суцільне покриття на матеріалі, практично не захищає тканини від горіння.

Потрібно відзначити, що вимоги до ВВБЗР для тканин дещо відрізняються від вимог до ВВБЗР для деревини [146, 208]. Важливішим для обох випадків є фактор висолювання на поверхні матеріалу. Якщо ергономіка вогнезахищеної деревини майже не страждає, то для вогнезахищених тканин вона стає вирішальною: на поверхні кольорових тканин утворюються плями. Це явище вказує на відсутність сил адгезії у кристалів сольових антипіренів до матеріалу. Така вогнезахищена тканина швидко втрачає вогнезахисну ефективність.

Аналіз літературних джерел щодо ВВБЗР для тканин, паперу, очерету показує, що вони повинні мати свої фактори впливу на процес вогнезахисту матеріалів. Для їх розроблення і застосування на практиці повинні бути розроблені інші, свої наукові підходи.

Станом на початок XXI століття відомостей щодо розроблення, виготовлення та застосування ВВБЗР для паперу і очерету в Україні не існувало.

Зазначена вище неповнота досліджень як під час розроблення ВВБЗР для деревини, так і для ВВБЗР для тканин і паперу, свідчить скоріше про їх

складність, ніж про нерозуміння їхнього значення для розширення можливостей з успішної ліквідації ймовірних пожеж на ПСРП.

1.3.2. Закономірності процесів, що впливають на рівень вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів

Аналіз фактів зменшення рівня вогнезахисту ЦВМ в процесі їх експлуатації наведений в багатьох публікаціях [13, 76, 208, 246], але вони не містять наукового пояснення цього феномену, як і не містять аналізу причинно-наслідкового зв'язку в процесах, що при цьому відбуваються в вогнезахищених ЦВМ, а також аналізу впливу антипіренів на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння цих матеріалів. Навіть у 2006 році спеціалісти ВНДІПО Росії пов'язували зниження рівня вогнезахисту деревини в часі лише з природнім старінням самого вогнебіозахисного просочувального засобу (МС) [13, 20, 93].

Отже, в дослідженні питання забезпечення необхідного рівня вогнезахисту ЦВМ та його збереження в процесі експлуатації матеріалів та конструкцій з ЦВМ можна виділити два основних аспекти. Перший безпосередньо пов'язаний із створенням високоефективних вогнебіозахисних засобів (в тому числі і ВВБЗР) для досягнення необхідного рівня вогнезахисту ЦВМ. І в цьому аспекті найважливішим є вивчення впливу хімічного складу ВВБЗР на закономірності інгібування ланцюгових реакцій горіння та інші фізико-хімічні реакції, що відбуваються у вогнезахищених ЦВМ під дією температури. Другий аспект пов'язаний із збереженням необхідного рівня вогнезахисту ЦВМ в процесі їх експлуатації. А в цьому аспекті найважливішим є вивчення процесів висолювання антипіренів на поверхню вогнезахищених матеріалів для створення відповідних уповільнюючих бар'єрів.

В контексті першого з зазначених аспектів слід зазначити, що важливу роль у створенні комбінованих ВВБЗР відіграють попередні дослідження механізму взаємодії їх компонентів з урахуванням активної ролі самої деревини

[64]. Тут нерідко має місце явище синергізму, що виникає в результаті спільного (очевидно різнотипного) впливу компонентів і утворення нових, більш ефективних сполук. Однак часто зустрічається і явище антагонізму – зниження ефективності спільної дії компонентів чи утворення в результаті реакції між ними нових, менш ефективних сполук. Так, антагоністичний ефект щодо впливу на полуменеве горіння спостерігається для сумішей діамонійфосфату і хлориду калію [242, 244].

У досліджені неадитивних властивостей сумішей компонентів вогнегасних порошків плідними виявилися теоретичні дослідження енергетичних параметрів іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів (ІМК, ІРК) активних центрів ланцюгових реакцій горіння з продуктами термічного розкладу частинок порошку [14, 243].

Моделювання гальмування процесів горіння в [92, 108] проведене в рамках традиційних понять хімічної кінетики. Швидкість реакції пропорційна при їхніх рівних умовах, концентрації частинок, що приймають участь в елементарному хімічному акті.

В тому випадку, коли одна із реагуючих частинок (молекула, атом, іон, з однієї сторони і радикали з іншої сторони) утворюють іон-молекулярний комплекс, загальна концентрація їх в реакційній сфері, природньо «зменшується». Перебуваючи в рамках традиційного (арреніусовського) описання, тобто, покладаючись, що швидкість реакції підкорюється закону дії мас, введено у кінетичну модель за загальною схемою стадії утворення іон-молекулярного комплекса:

$$nMX \longrightarrow (MX)_n$$

$$MX \longrightarrow M^+ + X^-$$

$$M^+ + R \longrightarrow MR$$

$$X^- + R \longrightarrow XR$$

$$(MX)_n + R \longrightarrow (MX)_n R\ ,$$

де M - атом катіону; X - атом аніону; R - радикал.

Відносну міцність комплексів, що утворюють, наприклад, галогеніди лужних металів з атомами, молекулами і радикалами, існування яких в полум'ї вуглеводнів є імовірним, визначали розрахунками міцності іон-молекулярних комплексів запропонованим в роботі [131] методом. За ним, на відміну від лінійних моделей Гаммет-Тафта, потенціал кожного з атомів записується у вигляді квадратичної форми ефективних зарядів q_i;

$$П_i = A_i q_i^2 + B_i q_i + C_i + M_i\ , \qquad (1.4)$$

де A, B, C - параметри атома i; M_i - поправка, яка враховує потенціал, що утворюється на атомі іншими зарядами.

Величина M_i визначається за формулою:

$$M_i = \sum_{j(\neq i)}^{N} (q_i / r_{ij}) \qquad (1.5)$$

де r_{ij} -відстань між атомам i та j ; N -число атомів.

Для N -атомної молекули, у якій всі атоми є симетрично незалежними, у відповідності до принципу вирівнювання $П_i$ запишемо низку рівнянь:

$$П_i = П_{i+1} \text{ при } i = 1,2.....N-1 \qquad (1.6)$$

Якщо у молекули є симетрично залежні атоми, то виберемо базис із $N - m$ незалежних атомів і запишемо для них систему: $П_i = П_{i+1}$, $i = 1,2.....N - m - 1$. Крім того, використовується співвідношення:

$$\sum_{i=1}^{N} q_i = Q\ , \qquad (1.7)$$

в якому $Q = 0$ для нейтральних частинок (атоми, молекули) або $Q = Q_i$ (значення самого заряду) – для заряджених частинок.

Для розрахунків q на атомах, радикалах та іонах практично любого ступеня складності була розроблена програма, яка працює в двох режимах [70].

Режим 1. Квадратичні члени, що входять в систему квадратних рівнянь, представляються малими, і на першій ітерації вирішується система лінійних рівнянь:

$$\begin{aligned} &B_1q_1 - B_2q_2 + (C_1 - C_2 + M_1 - M_2) = 0 \\ &B_2q_2 - B_3q_3 + (C_2 - C_3 + M_2 - M_3) = 0 \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &B_{m-1}q_{m-1} - B_mq_m + (C_{m-1} - C_m + M_{m-1} - M_m) = 0, \end{aligned} \qquad (1.8)$$

що дає значення зарядів q_i (в останньому рівнянні q_m виражається через $q_1, q_2, \ldots, q_{m-1}$ за допомогою співвідношення $\sum_{i=1}^{N} q_i = Q;$ тут Q – сумарний заряд, у випадку молекули $Q = 0$. Далі розраховуються значення $A_iq_i^2$ і після приєднання їх до вільних членів знову вирішується система лінійних рівнянь. Процедура такого типу зводиться звичайно за 5-10 ітерацій (якщо необхідна точність визначення зарядів порядку 0,01-0,001 одиниць електрона). Однак не виключено, що процедура буде розходитись. Розходимість має місце в тих випадках, коли який-небудь квадратичний член $A_iq_i^2$ „пригнічує" лінійні, тобто q_i (та їх квадрати) досить великі. Особливо часто така поведінка спостерігається в азотовмісних системах. Тоді потрібно переходити в режим 2.

Щоб прискорити отримання q при ітераційних розрахунках на ЕОМ, можна ввести наступні корегування: Aq^2 вносити не повністю, а , скажімо, на одну чверть або на половину від всієї величини, щоб зменшити «розмах», що обумовлений розсамоузгодженням.

Режим 2. За допомогою стандартного методу пошуку мінімуму функції багатьох перемінних (метод паралельних дотичних) шукають мінімум функції

$$F = \sum_{i=1}^{m-1} (A_iq_i^2 + B_iq_i + C_i + M_i - A_{i+1}q_{i+1}^2 - B_{i+1}q_{i+1} - C_{i+1} - M_{i+1})^2 \qquad (1.9)$$

по (m-1) перемінній - зарядам q_i (як і в 1.8) q_m не є незалежною перемінною, а визначається з рівняння (1.8). Пошук ведеться із стандартної

точки, що відповідає рішенню системи лінійних рівнянь, отриманих із (1.8), при зануленні квадратичних членів. Треба відзначити, що вибирати стартову точку необхідно, оскільки система (m-1) квадратних рівнянь має 2^{m-1} системних рішень. Більшість рішень, звичайно будуть комплексними, однак хоча б пара рішень може відповідати «розумним» значенням зарядів. Взагалі ж, вказана проблема виникає з m=2, коли одне квадратне рівняння приводить до двох дійсних рішень, і доводиться брати те з них, яке ближче до рішення відповідного лінійного рівняння.

Проведені розрахунки в [92] показали, що у присутності іонів (атомів), молекул і твердих частинок неорганічних солей полегшується загибель активних радикалів ланцюгових реакцій горіння. Загибель активних радикалів може відбуватися як за гомогенним, так і за гетерогенним механізмом, причому, спостерігається вибірковість іонів (атомів), молекул, активних центрів твердих частинок до різного виду радикалів, що дозволяє передбачити можливість їх сумісного вкладу в інгібування полум’я при використанні сумішей неорганічних солей.

Отже, розроблений в [131] метод розрахування енергетичних параметрів ІРК та ІМК доцільно використати для розрахунку параметрів комплексів, які утворюються при взаємодії активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу ВВБЗР. Однак програма розрахунків активних зарядів на атомах (іонах), молекулах, радикалах, яка для вирішення нелінійних рівнянь використовує метод послідовних наближень та метод паралельних дотичних, потребує удосконалення.

В контексті другого аспекту розглянемо процес висолювання антипіренів на поверхню вогнебіозахищеної деревини з подальшим обсипанням кристалів солей під дією гравітаційних сил [55]. Деревина являє собою природній полімер капілярно- пористої структури. Її фізико-хімічні властивості мало чим відрізняються від інших полімерів подібної структури (наприклад, мінералів) [208]. Для просочення таких матеріалів водою або водними розчинами солей до

них додають поверхнево-активні речовини (змочувачі). Отже, під час просочення спочатку заповнюються крупні пори і капіляри, а в подальшому – мілкі капіляри. При цьому процеси просочення описуються майже лінійними залежностями, про що свідчать авторитетні публікації [229, 232].

Після надання деревині вогнебіозахисних властивостей суттєвою характеристикою такої деревини є здатність утримувати просочувальні засоби в її структурі протягом тривалого проміжку часу в умовах коливань температури та вологості повітря в широких межах. З цим безпосередньо пов’язане питання щодо визначення терміну збереження необхідного рівня вогнезахисту деревини.

Механізм висолювання антипірену з деревини протягом періоду експлуатації можливо представити таким чином. Молекули води з повітря адсорбуються капілярно-пористою структурою деревини з утворенням розчину сольового антипірену. Отже, при зволоженні деревини кристали вогнезахисних речовин розчиняються і поступово «виносяться» капілярними силами на поверхню деревини. З часом вода випаровується, а кристали солей під дією гравітаційних сил обсипаються з поверхні вогнезахищеної деревини. Таким чином, концентрація антипіренів в деревині зменшується і, відповідно, знижується рівень вогнезахищеності деревини [93].

На реальних об’єктах може реалізовуватись не тільки процес висолювання антипіренів, а й процес їх вимивання, механізм якого дуже подібний до вище зазначеного. В літературі механізм вимивання представлений подібно до механізму капілярно-хімічної технології видобутку солей з капілярно-пористої структури копальних покладів за допомогою води, коли лімітуючою стадією є дифузія солей у воду в самих капілярах.

В обох випадках експериментально визначений ефективний коефіцієнт дифузії становить $D_e \sim 10^{-5}$ м^2/с. Такий порядок значень ефективного коефіцієнта дифузії дозволяє класифікувати описані процеси, як досить швидкі [8-11, 232, 274].

Наочно можна представити розглянуті процеси, що відбуваються в вогнезахищеній деревині, на прикладі деревини, вогнебіозахищеної ВВБЗР МС. По-перше, слід зазначити, що в складі засобу МС присутні гідрофосфат амонію та сульфат амонію (в якості антипіренів) та фторид натрію (в якості антисептика). Ці речовини добре розчиняються в воді. Під час зволожування між солями відбувається іонний обмін, що позначається на зменшенні інгібувальної здатності антипірену. Тобто відбувається антагонізм дії антипіренів та антисептика: утворюється гідрофосфат натрію, який не виявляє інгібувальної здатності. Це явище було встановлено експериментально та представлено в роботі [242]. По-друге, на протязі короткого терміну, що, як правило, не перевищує 1÷1,5 року, відбувається висолювання антипіренів на поверхню вогнезахищених конструкцій, що додатково знижує рівень вогнезахищеності деревини.

З наведеного аналізу виходить, що при розроблені рецептур нових високоефективних ВВБЗР потрібно спиратися на дані теоретичних (квантово-механічних) розрахунків та експериментальні дані, що дозволять скласти (синтезувати) синергетичні компоненти ВВБЗР в контексті забезпечення максимального інгібувального ефекту. А також, доцільно знайти технічне рішення, що дозволить максимально уповільнити процес висолювання антипіренів на поверхню вогнебіозахищеної деревини.

1.4. Водні вогнегасні речовини для активного захисту об’єктів від пожеж

Ефективність активного протипожежного захисту об’єкта значною мірою залежить від якості вогнегасних речовин та технології їх застосування. До сучасних вогнегасних речовин належать водні вогнегасні речовини, піноутворювачі загального та спеціального призначення, газові вогнегасні речовини, вогнегасні порошки, аерозолеві вогнегасні речовини [14]. Основною складовою водних вогнегасних речовин (ВВР) є вода. Вода – найбільш

поширена вогнегасна речовина, яка характеризується високою питомою теплоємністю, прихованою теплотою пароутворення, вона хімічно інертна по відношенню до більшості горючих речовин і матеріалів, доступна і дешева.

Використання води є надійним і ефективним при гасінні пожеж, що пов'язані з горінням речовин і матеріалів у всіх трьох агрегатних станах (твердому, рідкому, газоподібному). Однак при гасінні водою, через недосконаліть техніки подачі і розпилення води, а також внаслідок ряду інших причин, в більшості випадків не реалізуються всі її унікальні фізичні і фізико-хімічні властивості.

Воду застосовують без добавок або з добавками, формуючі компактні, розпилені (середній діаметр краплин понад 100 мкм) і тонко розпилені (середній діаметр краплин до 100 мкм) струмені [14].

Основний механізм гасіння компактними водними струменями полягає в охолоджені горючої речовини, а в окремих випадках використовується й механізм відривання полум'я з поверхні горючої речовини. І до теперішнього часу застосування компактних водних струменів залишається найбільш поширеним. Необхідно визначити недолік цього традиційного способу водного пожежогасіння, який полягає у нерівномірності зрошування зони пожежі, при цьому далеко не вся вода впливає на процес горіння. Із загальної кількості води, яка подається у вигляді компактних струменів, на гасіння використовується всього від 6 до 10 відсотків від поданого об'єму, а в окремих випадках – не більше 1 % [236].

Механізм гасіння розпиленою водою складається з процесів охолодження поверхні горючої речовини та розбавлення горючих газів водяною парою. Тобто застосування тонкорозпиленого струменю води додатково забезпечує ефективне охолодження й зони хімічної реакції (полум'я).

Для реалізації розпиленого і тонкорозпиленого струменів часто використовуються різні технічні пристрої. На теперішній час розроблено багато методів розпилення води, які класифікуються за способом підведення енергії,

що витрачається на подрібнення потоку води: гідравлічний, механічний, пневматичний, пульсаційний ультразвуковий, електричний, акустичний, комбінований тощо [188]. У пожежній техніці для розпилення води використовується переважно гідравлічний метод, в якому енергетичним фактором є тиск нагнітання, коли при проходженні через розпилювальні пристрої відбувається розпад потоку рідини на краплини.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних пристроїв розпилення рідини показує, що особливу увагу розробники приділяють проблемам підвищення якості і ефективності розпилення, а також підвищенню тонкості диспергування. Велике значення у вирішенні цієї проблеми є використання хімічних добавок до води з утворенням ВВР [12, 31, 33, 89, 90, 133, 154, 157, 175, 191, 207, 226, 269, 280, 282, 283, 286, 287, 291, 295].

Дуже часто для поліпшення вогнегасних властивостей води до неї додають поверхнево-активні речовини (ПАР), які здатні зменшити її поверхневий натяг і підвищити змочувальну здатність. Для цього застосовують аніонактивні, катіонактивні та неіогенні сполуки. Їх концентрація у воді зазвичай становить 0,5-10%.

Вода має незначну в’язкість, що позначається під час гасіння твердих матеріалів. Завдяки цій властивості вода швидко стікає з поверхні матеріалу, на яку її подано. Послаблення такого ефекту можна досягти шляхом введення невеликих кількостей загусників – водорозчинних полімерів, наприклад, ефірів целюлози, що призводить до підвищення в’язкості водного розчину. В'язкість розчинів є характеристикою сил когезії, тобто сил взаємодії макромолекул у рідині [48, 132, 175, 176]. При підвищенні в'язкості підвищується і сили адгезії - сили взаємодії між двома фазами (в нашому випадку між водним розчином і поверхнею твердого горючого матеріалу). Внаслідок зростання сил когезії й адгезії швидкість стікання ВВР з поверхні об'єкта зменшується, а отже збільшується час контакту ВВР з горючою речовиною і тому вогнегасна ефективність ВВР збільшується. При розчиненні невеликої кількості полімерів

в'язкість водних розчинів підвищується на 2-3 порядки, при цьому значення в'язкості залежить не тільки від природи полімеру, але й від його молекулярної маси. Ця залежність описується напівемпіричним рівнянням Марк-Куна-Хаувинка [235].

$[\acute{\eta}] = K\,\mu^{\alpha}$

де μ - молекулярна маса полімеру;

K, α- константи, що визначаються природою полімеру;

$[\acute{\eta}]$ - характеристична в'язкість розчинів полімерів.

Поширеними добавками в якості загусників є альгінат натрію, натрій карбоксиметилцелюлоза, поліакрилова кислота, поліоксиметилен, метилцелюлоза, поліакриламід, полівініловий спирт [130].

Більш високу вогнегасну здатність мають водні розчини з полімерними добавками, які не тільки загущують, а й при підвищенні температури здатні до гелеутворення або до утворення на поверхні горючої речовини негорючого покриття, яке виконує вогнезахисну функцію. Застосування розчинів гелеутворюючих добавок може підвищити вогнегасну ефективність води в 1,5-2 рази [90]. Поширеними гелеутворюючими добавками є полісилікат натрію, поліакриламід і метилцелюлоза.

Вогнегасна здатність розчинів гелеутворюючих добавок залежить від в'язкості, структури й міцності гелю, характеру поверхні горючої речовини й розміру осередку горіння. В'язкість водного розчину повинна бути такою, щоб забезпечити можливість його подачі до осередку пожежі по трубопроводах і шлангах. Проблематичним є застосування таких водних розчинів для утворення розпилених та тонко розпилених струменів.

Для підвищення вогнегасної ефективності до гелеутворюючих водних розчинів додають солі, наприклад, хлорид натрію, карбонат амонію, бікарбонат калію [130] і таким чином створюють комбіновані ВВР. У роботі [30] досліджували вогнегасні властивості композицій, які складалися з водних розчинів високомолекулярних речовин (загусники, гелеутворювачі), змочувача

(піноутворювач ПО-ЗАИ) та неорганічних солей. У ролі загусників використовували натрієву сіль карбоксиметилцелюлози і поліакрилову кислоту. Ці композиції відрізняються за своїми властивостями від розчинів індивідуальних речовин. Так, композиція, яка складається з води, загусника і змочувача, характеризувалась високою в'язкістю, низьким поверхневим натягом і високою змочувальною здатністю. Вона використовувалась для формування компактних струменів. Вогнегасна ефективність води підчас гасіння деревини підвищувалась у 2,4 рази.

На початку XXI сторіччя в Національному університеті цивільного захисту України (м. Харків) розпочаті і здійснюються науково-дослідні роботи щодо розроблення і застосування гелеутворювальних систем (ГУС) для попередження, локалізації та ліквідації пожеж і загорянь [3-5, 128, 134-137, 140, 141, 190, 211-223] переважно для житлового сектору.

Головним компонентом ГУС, що утворює гель, є силікат лужного металу. Додатковим компонентом частіше всього є речовина, яка визиває швидке гелеутворення силікатної складової. Під час подачі таких розчинів вони змішуються на поверхні твердого горючого матеріалу, що горить. Між компонентами розчинів відбувається взаємодія, що приводить до утворення гелю. Гель утворює на поверхні твердого горючого матеріалу нетекучий вогнегасний шар. Цей шар міцно закріплюється на вертикальних і похилих поверхнях [3, 134, 135, 140, 216]. В роботі [4] відзначається, що на теперішній час концентраційні області гелеутворення встановлені для великої кількості ГУС, але практичне використання багатьох з них виявилось проблематичним. Багатьма дослідженнями встановлено перспективність ГУС, що являє собою водний розчин полісилікату натрію ($Na_2O \cdot nSiO_2$), а другий – водний розчин солі: сульфату алюмінію, сульфату магнію, хлориду кальцію (найбільш пріоритетний) [5, 137, 141, 211, 218, 219]. В роботі [217] проведено оптимізацію кількісного складу гелеутворюючої системи для гасіння пожеж об’єктів житлового сектору: $Na_2O \cdot 2{,}95SiO_2$-$CaCl_2$. Необхідно відзначити, що

досліджувані ГУС без механічного впливу обсипаються з поверхні деревини впродовж 2-14 діб після нанесення на поверхню.

Для підтвердження теоретичних розрахунків та лабораторних результатів щодо застосування ГУС для гасіння пожеж в житловому секторі була розроблена автономна установка гасіння гелеутворюючими складами (АУГГУС). Яка формується з двох балонів. В одному знаходиться водний розчин полісилікату натрію, а в другому водний розчин коагулятору (каталізатор гелеутворення - $CaCl_2$). Подача компонентів ГУС відбувається через окремі розпилювачі, що дає змогу, у разі необхідності, використовувати лише один компонент та проливати тверді горючі матеріали. Сумарна одночасна масова подача обох розпилювачів встановлена в межах 0,11 – 0,13 кг/с [31]. В таблиці 1.3 наведені технічні характеристики АУГГУС.

Таблиця 1.3

Технічні характеристики АУГГУС

№ з/п	Параметри, розмірність	Значення
1	Загальна маса установки із зарядом, кг	25 ± 0,5
2	Об’єм балонів з вогнегасним складом, л	8 × 2
3	Об’єм балону з повітрям, л	1
4	Тиск у повітряному балоні, МПа	18 ± 2
5	Тиск в мережі низького тиску, МПа	0,25 ÷ 0,3
6	Масова витрата вогнегасного складу, кг/с	0,11 ÷ 0,13
7	Ефективна площа гасіння, $м^2$	до 16
8	Максимальна дальність подачі компактного струменя, м	8 ± 1
9	Максимальна дальність подачі розпиленого струменя, м	3 ± 4
10	Час роботи однієї заправки, с	150 ÷ 180
11	Габаритні розміри, мм	520 × 420 ×240

Випробування АУГГУС з оптимізованим складом ГУС $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2$ – 3,8%, $CaCl_2$ – 11,4 % [217] проводили під час гасіння модельних вогнищ класу А в квартирах.

Результати випробувань показали, що для гасіння у квартирі пожежі площею 3-6 $м^2$ достатньо запасу гелеутворюючих компонентів, який знаходиться в АУГГУС (16 л). Для гасіння таких пожеж традиційною вогнегасною речовиною – водою потрібний був її об'єм у 2-3 рази більший, ніж ГУС. Внаслідок меншої витрати та зниженню часу горіння на пожежах, де використовувався ГУС, відмічено зменшення збитків від заливання нижніх поверхів приблизно на 10 – 15 % [215].

При наявності позитивних властивостей вогнегасних ГУС, вони мають ряд недоліків. Так в роботі [139] зазначено, що при пожежі під час переходу ГУС у ксерогель, останній відшаровується від поверхні деревини, утворюючи тріщини, так при товщині шару в 3-4 мм вони досягають 1 мм. Цей факт пояснюється слабкою адгезією вогнегасного шару до поверхні деревини. Тобто ГУС не витримують довготривалого теплового впливу пожежі – вони частково розтріскуються, обсипаються та відшаровуються. Для вирішення цієї проблеми необхідно було провести підбір таких складових ГУС, які під час теплової дії були б здатні зберігати експлуатаційні характеристики і загальну цілісність вогнегасного покриття. В роботі [138] відзначено, що до недоліків ГУС необхідно віднести також те, що вони не здатні цілковито гасити пожежі класу А, після гасіння виникає повторне займання пожежного навантаження. В роботі [137] проведені дослідження вогнегасної дії ГУС, до яких добавлено вогнегасні солі: дігідрофосфат амонію та сульфат амонію. Склад ВВР був таким: $(NH_4)_2SO_4$(17 %) + $NH_4H_2PO_4$(10 %) + $Na_2O{\cdot}2{,}7SiO_2$(18 %) + H_2O(55 %). В лабораторних умовах було показано, що ВВР при витраті 2,8 $кг/м^2$ здатний затримати повторне займання до 13,2 хвилини. Крім того були експериментально визначені показники вогнегасної здатності ГУС під час гасіння модельних вогнищ пожежі класу 1А. Для подачі компонентів зазначеної ГУС була розроблена і виготовлена автономна установка гасіння пожеж ГУС (АУГГУС-П), в цій установці використано гідравлічний принцип розпилення вогнегасних розчинів.

Під час гасіння модельного вогнища пожежі класу 1А дотримувались вимог ДСТУ 3675. Вологість брусків соснової деревини дорівнювала 10 %. Модельне вогнище знаходилось на електронних вагах неперервної дії. Момент початку гасіння визначався після втрати 45 % маси модельного вогнища в процесі горіння. Загальний час разгоряння модельного вогнища складав біля 7 хвилин.

В таблиці 1.4 наведено результати гасіння модельного вогнища пожежі класу 1А водою та ВВР.

Результати таблиці вказують, що вогнегасна здатність ВВР на основі дігідрофосфата амонію (25 %) вище за оптимізованого ГУС $NH_4H_2PO_4$(25 %) + $Na_2O{\cdot}2{,}7SiO_2$(12%). Автори не пояснюють цей феномен. Але тут явно вбачається антагонізм між іонами (атомами) натрію та іонами (атомами) фосфору під час інгібування водними розчинами цих сполук активних центрів полум'яного горіння. Ці питання потребують подальших досліджень.

Таблиця 1.4

Результати гасіння модельного вогнища пожежі класу 1А водою та ВВР

Вогнегасна речовина	Витрата вогнегасної речовини на гасіння модельного вогнища 1А, кг	Показник вогнегасної здатності вогнегасних речовин під час гасіння модельного вогнища 1А, кг/м^2	Показник вогнегасної здатності вогнегасних речовин для лабораторного модельного вогнища, кг/м^2
H_2O	7,8	1,3	1,23
$NH_4H_2PO_4$(25 %) + $Na_2O{\cdot}2{,}7SiO_2$(12 %)	2,7	0,45	0,28
$NH_4H_2PO_4$(25 %)	2,1	0,35	0,26

В останні 20 років у світовій практиці активного протипожежного захисту об'єктів різного призначення все більшого поширення набувають технології точного розпилювання водних вогнегасних речовин, які дозволяють найбільш

повною мірою реалізувати унікальні фізико-хімічні властивості води, та води з модифікуючими добавками. За різними джерелами до таких технологій відносять такі, які забезпечують подавання на гасіння струмені водних вогнегасних речовин за дисперсності їх краплин не вище 350 мкм. Беззаперечними перевагами таких технологій є висока ефективність, екологічна безпека, незначні побічні збитки, можливість пожежогасіння як поверхневим так і об'ємним (локально-об'ємним) способами, економічність та придатність застосування за масового перебування людей тощо [16, 17, 29, 44, 88, 91, 261, 253].

В роботах [30, 191] відзначається можливість використання зазначених композицій для вогнезахисту деревини. Системи, які містять водорозчинний полімер і неорганічну сіль, або водорозчинний полімер і змочувач, мало відрізняються від розчинів полімерів. Було показано що у випадку застосування потрійної композиції (водорозчинний полімер, неорганічна сіль і змочувач) зразки деревини майже втрачають здатність до займання. Необхідно відзначити обмеженість концентрації неорганічної солі у зазначеній композиції, оскільки проявляється здатність до висолювання водорозчинного полімеру, або його коагуляції [31], що стримує використання таких композицій в пожежній техніці.

Інформації про використання ВВБЗР в якості вогнегасних речовин не виявлено. В той же час наведений аналіз щодо розроблення ВВР свідчить про перспективність додавання до води різних інгредієнтів для покращенні її вогнегасної дії, зокрема для надання інгібувальних властивостей. Подібні інгредієнти можуть бути в складі ВВБЗР. Отже, доцільно дослідити гіпотезу щодо можливості створення таких ВВБЗР, які б можна було використати у якості зарядів для засобів пожежогасіння, що, в свою чергу, сприяло б створенню єдиної підсистеми пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта.

Наведений аналіз літературних джерел щодо створення та застосування ВВР свідчить про те, що цей напрямок науково-дослідних робіт є перспективним для вирішення завдань активного ППЗО, отже, активно розвивається. Вже відомі ВВР, які за деякими фізико-хімічними властивостями та, відповідно, й вогнегасній здатності переважають воду, вогнегасні порошкові склади та газові вогнегасні речовини. Але оптимізація складів ВВР часто-густо проводиться досить поверхово: без врахування закономірностей впливу їх складу на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння різних матеріалів.

В додатку Д наведено аналіз нормативної бази щодо створення та застосування водних вогнебіозахисних речовин для захисту об’єктів від пожеж.

1.5. Формулювання наукової проблеми і задач дослідження

Сучасний стан профілактики виникнення, протидії та ліквідації пожеж в багатьох країнах світу не відповідає вимогам сьогодення. На жаль, Україна входить до переліку цих країн. Пожежа чинить прямий негативний вплив на людину тепловою дією і отруєнням токсичними продуктами згорання та опосередкований – шляхом забруднення навколишнього середовища. Кількість пожеж та кількість загиблих на них людей протягом останніх десяти років не уклінно зростала, при чому переважна більшість летальних випадків - внаслідок отруєння. Значна кількість пожеж виникла на об’єктах, що віднесені до категорій критичної інфраструктури, тобто об’єктів, порушення функціонування або руйнування яких призводить до найсерйозніших наслідків для соціальної та економічної сфери держави, негативно впливає на рівень її обороноздатності та національної безпеки. В останні роки збільшився відсоток пожеж, що виникли внаслідок терористичних атак – підпалів.

Інтенсивний розвиток будівництва супроводжується збільшенням пожежного навантаження на об’єктах зазначених категорій. При цьому протягом останніх 20 років неухильно зростає пожежне навантаження за

рахунок матеріалів пожежі класу А, особливо через застосування ЦВМ, що в даний час становить приблизно 80% від загальної маси 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 останніх років). При цьому всього 1,1 % пожеж за останні 20 років в Україні погашено на початковій стадії їх розвитку. Тривалий час використовуались ВВБЗР для ЦВМ, які у своєму складі мали високотоксичні речовини (наприклад, фторид натрію, пентафенолят натрію, солі хрому та інш.), 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 високо небезпечними. Отже, захист об’єктів від пожеж не спрацьовував належним чином, оскільки заходи та засоби активного захисту (застосування вогнегасних речовин та техніки їх подавання) та пасивного захисту (вогнезахист деревини та інших ЦВМ) суттєво не впливали на покращення загального рівня захисту об’єктів від пожеж.

Отже, стан порушеного питання характеризується протиріччями:

1) на практиці:

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

б) з другого боку, відсутні ефективні та екологічно безпечні ВВБЗР, використання яких дає змогу попереджати та ліквідувати пожежі на об’єктах;

2) 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.

Метою роботи є розвиток наукових основ протипожежного захисту на об’єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом створення і реалізації методів пасивного і активного протипожежного захисту з використанням високоефективних екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

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

- проаналізувати сучасні методи запобігання пожежам 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.

На рисунку 1.8 представлено структурно-логічну схему проведення дисертаційних досліджень.

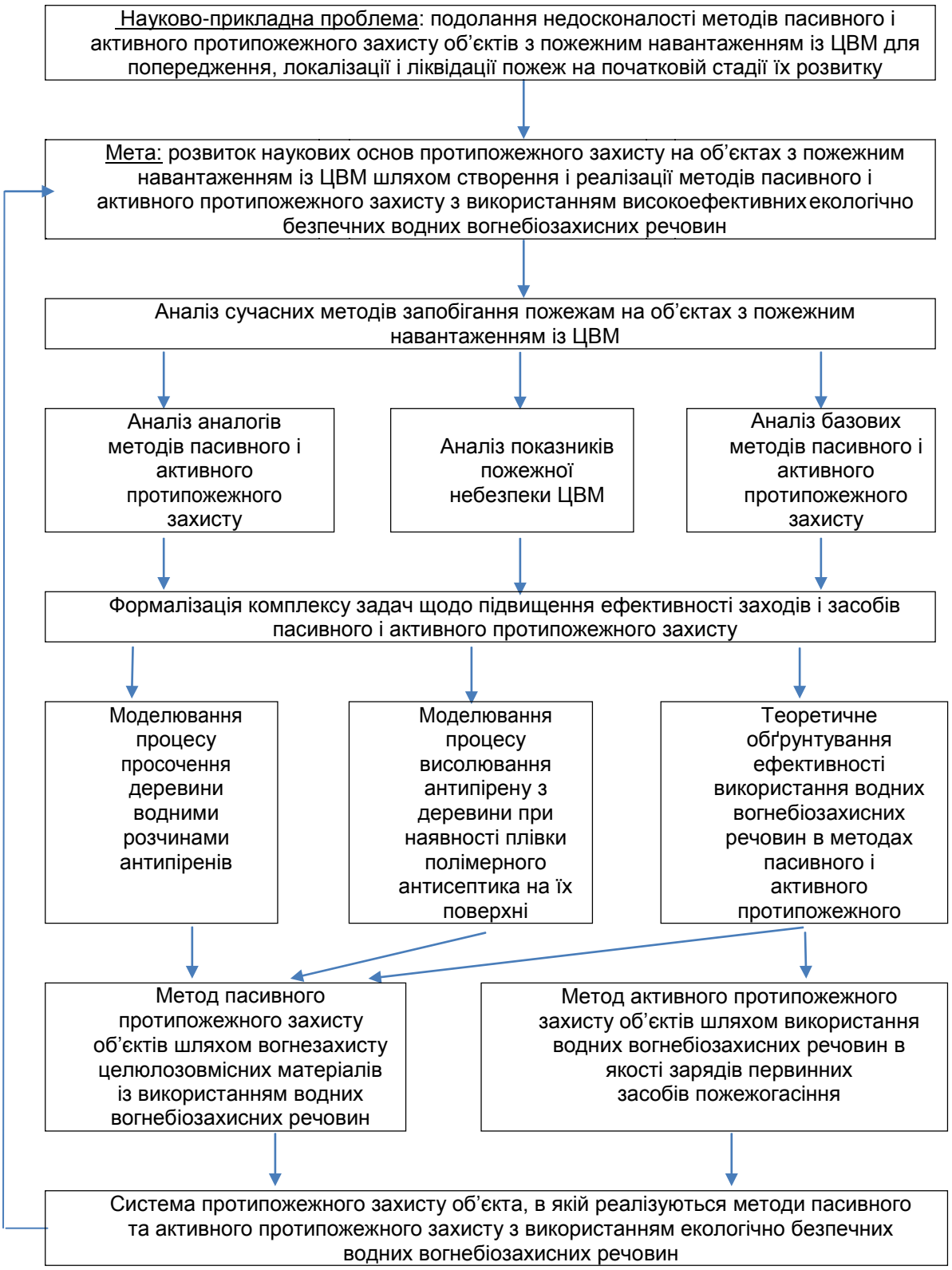


Рис. 1.8 - Структурно-логічна схема проведення дисертаційних досліджень

ВИСНОВКИ

1. Інтенсивний розвиток будівництва супроводжується збільшенням пожежного навантаження на об’єктах різного призначення. При цьому протягом останніх 20 років в Україні неухильно зростає пожежне навантаження за рахунок матеріалів пожежі класу А, особливо через застосування целюлозовмісних матеріалів, але всього 1,1 % пожеж в цей період погашено на початковій стадії їх розвитку.

2. Дана робота присвячена розвитку наукових основ протипожежного захисту на об’єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ шляхом розробляння екологічно безпечних методів активного і пасивного протипожежного захисту, які, за рахунок їх комплексного застосування, дозволяють створити систему захисту об’єктів від пожеж на початковій стадії їх розвитку.

3. Не зважаючи на декларування пріоритетності профілактичних заходів, в теорії і практиці пожежної безпеки останніх десятиліть більш активно розвивався напрямок активного протипожежного захисту об’єктів: розроблялись вогнегасні речовини та техніка їх подавання.

4. В останні роки надзвичайно зріс ризик терористичних атак на об’єкти різного призначення, особливо в умовах військового тероризму, що досяг в Україні рівня повномасштабних бойових дій. Це значно обмежує можливості заходів і засобів активного протипожежного захисту об’єктів. Отже, лише комплексне застосування методів активного і пасивного протипожежного захисту здатне попередити та ліквідувати пожежі на об’єктах з пожежним навантаженням із ЦВМ на початковій стадії їх розвитку.

5. Незважаючи на те, що науці відомі шляхи реалізації факторів припинення горіння (флегматизація, охолодження, інгібування, ізолювання), до теперішнього часу не створено системного використання методів активного і пасивного протипожежного захисту, які б передбачали застосування заходів і засобів, що дозволяють реалізувати весь комплекс зазначених факторів.

6. Враховуючи, що за статистикою целюлозовмісні матеріали (ЦВМ) формують більше 80% від загальної маси пожежного навантаження, при чому в структурі ЦВМ переважна більшість припадає на деревину, тканини, папір та очерет (тобто матеріали, що здатні займатися від малокалорійних джерел займання), ця наукова робота присвячена протипожежному захисту на об’єктах, де пожежне навантаження сформоване головним чином за рахунок зазначених матеріалів.

РОЗДІЛ 2
ОСОБЛИВОСТІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ В МЕТОДАХ АКТИВНОГО І ПАСИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ З ПОЖЕЖНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ІЗ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Загальна методика виконання досліджень

2.1.1. Системний підхід до забезпечення захисту об'єкта від пожеж

На теперішній час в науці створився специфічний підхід до дослідження об'єктів, явищ і процесів великої складності, який реалізує на практиці філософські принципи цілісного розгляду явищ і процесів у всій їх складності, взаємозв'язку і взаємообумовленості їх розвитку, що отримав назву «системний підхід».

Системний підхід частіше всього розглядається як методологія дослідження і вирішення складних проблем, що побудована на загальній теорії систем, за якою системний підхід розглядається як сукупність загальних методологічних принципів отримання знань щодо системних об'єктів.

Існує також дещо інша точка зору, за якою термін «системний підхід» відноситься до наукової орієнтації, що реалізується в конкретних дослідженнях як спосіб науково-технічного мислення, а не як спеціальний алгоритм або набір алгоритмів, що надані досліднику в якості формального математичного або логічного апарату (методики, моделі і т.п.).

В основі всіх цих уявлень лежить поняття системи. При всій важливості цього поняття для науки в теперішній час не існує єдиного загально прийнятого визначення терміну «система». В літературних джерелах можна зустріти десятки тлумачень цього терміна: від вельми абстрактних, що застосовуються в загальній теорії систем, до відносно популярних, коли розглядається його змістовий акцент. Інколи робляться намагання дати класифікацію існуючих визначень поняття «система» з тих або інших міркувань. Ці розбіжності трактовок і відтінків в тлумаченні понять «система», «системний підхід»,

«системний аналіз» є зрозумілими і природними, так як відображують безпосередню зацікавленість представників різних наукових дисциплін.

Під системою будемо розуміти цілісну сукупність об’єктів (елементів), що пов’язані між собою визначеними відношеннями і взаємодіють таким чином, щоб забезпечити виконання системою деяких достатньо складних функцій (досягнення визначеної мети). Цілісність означає, що відносно навколишнього середовища система виступає і відповідно сприймається як щось єдине.

Обов’язковими компонентами любої системи є елементи, що її створюють, і зв’язок між ними. Процес поділення системи на елементи (підсистеми) і саме поняття елемента умовне і відносне, так як любий елемент, у свою чергу, завжди можна розглядати як сукупність різних елементів. В результаті першого акту розбиття системи (її декомпозиції) утворюються підсистеми (блоки) першого рівня. В процесі другого акту підсистеми першого рівня розбиваються на підсистеми другого рівня і т. д. В підсумку систему можна представити у вигляді дерева підсистем різних рівнів. Оскільки всі підсистеми і елементи, з яких створена система, визначеним чином взаєморозташовані і взаємопов’язані, утворюючи дану систему, можна говорити про структуру системи. «Структура системи - це те, що залишається незмінним в системі при зміні її стану, при реалізації різних форм поведінки, при здійснені системою операцій і т. ін.» [174].

Будь-яка система має, як правило, ієрархічну структуру, тобто може бути представлена у вигляді сукупності підсистем різного рівня, послідовно розташованих. При аналізі тих або інших конкретних систем достатнім виявляється виділення деякого визначеного числа ступенів ієрархії. При цьому системи нижнього рівня є підсистемами більш високого рівня, аж до так званої суперсистеми, що знаходиться на вищому ступені ієрархічної структури.

Коли мова йде про конкретну систему, завжди мають на увазі деяку відносно відокремлену частину суперсистеми, що реалізує визначені функції і складена із кінцевої множини елементів - носіїв визначених властивостей. Все,

що лежить поза цією відокремленістю, розглядається як зовнішнє середовище, що взаємодіє з даною конкретною системою.

Зовнішнє середовище системи - це чисельність об’єктів (з їх суттєвими властивостями), що не входять в систему, зміна властивостей яких може змінювати стан системи. В складі об’єктів середовища можуть бути такі, що впливають на поведінку системи і на які впливає сама система. Іншими словами, з частиною середовища система в тому або в іншому розумінні може взаємодіяти. Зовнішні об’єкти, що не впливають на суттєві властивості системи і на які система також не впливає, не відносяться до її зовнішнього середовища.

Таким чином задача щодо того, які з об’єктів віднести до системи, а які до зовнішнього середовища, цілком залежить від мети дослідження. Наприклад, середовищем для системи, що досліджується, можуть бути взаємодіючі з нею інші системи, в тому числі системи вищого ступеня.

В теорії систем розглядають різні типи і класи систем. В залежності від ступеня і практичної значущості впливу зовнішнього середовища на систему, її поведінку та процес функціонування, системи поділяються на відкриті та закриті (замкнуті). Процеси, що протікають у відкритих системах, у своїй більшості визначаються впливом зовнішнього середовища і самі здійснюють на неї суттєву дію (на відміну від закритих систем, які в процесі функціонування використовують тільки ту інформацію, яка виробляється всередині самої системи).

Системи функціонують в просторі і часі. Процес функціонування системи представляють собою змінення стану системи, перехід її від одного стану в інший. У відповідності з цим системи поділяються на статичні і динамічні.

Статична система - це система з одним можливим станом. Динамічна система - система з великою кількістю станів, в якій з часом відбувається перехід від одного стану в інший. Всі реальні (фізичні) системи є динамічними. У зв’язку з останнім зауваженням необхідно відзначити, що всі системи можна поділити на матеріальні (реальні) і нематеріальні (символічні). Перші включають в себе щонайменше два фізичних об’єкти. Тут встановлення самого

факту наявності фізичних об’єктів, їх властивостей і природи, потребує змістовного дослідження в галузі природничих і суспільних наук [41]. Символічні системи використовуються для побудови моделей реальних систем.

В теорії систем розрізняють так звані прості, великі і складні системи (хоча чіткої межі між цими типами систем провести не можливо) [41]. Під простою системою розуміють таку систему, функціонування якої (в рамках конкретної задачі) можна досліджувати як щось ціле, без розбиття (поділу) її на більш мілкі підсистеми. Великою називають систему, яку важко досліджувати без поділу на більш прості підсистеми. Після такого поділу функціонування підсистеми можна досліджувати практично незалежно одна від одної. Однак є такі системи, функціонування компонентів яких настільки взаємообумовлене і взаємопов’язане, що ізольований розгляд процесів їх функціонування або просто неможливий, або може привести до помилкових висновків. Такі системи звуться складними. Вважають також, що великі системи переходять в складні в результаті посилення взаємовпливу компонентів, що їх складають.

Наголосимо ще раз, що велика кількість авторів не вбачають суттєвої різниці між термінами "велика" і "складна" система і вважають їх синонімами. Але є й багато прихильників іншої точки зору. Наприклад, вважають, що термін велика система відображує лише кількість її елементів і зв’язків між ними, а складність характеризує неоднорідність цих елементів і зв’язків. Отже, складну систему неможливо досліджувати інакше, як за підсистемами, не тільки тому, що її "не охопиш поглядом", але тому, що неоднорідність кожної із них потребує для свого опису іншої мови [159, 173, 177].

Одною з ознак складності системи вважають можливість різного її поділення на підсистеми (за різними ознаками - структурними, функціональними і т. ін.). Другою ознакою складності вважають властивість цілісності системи. Це значить, що зміни, які виникають в якомусь із її елементів, відбиваються на інших елементах, на функціонуванні всієї системи. Звідси витікає необхідність системного підходу до вивчення складних систем, що в даному випадку означає дослідження кожної частини системи з

урахуванням цілей і функціонування системи в цілому. Вивчення таких систем особливо ускладнюється тим, що в них діють багато різних факторів, що приводять до різних за природою, але тісно пов’язаних процесів.

Важливими властивостями складних систем є: ієрархічність організації, цілеспрямованість функціонування, велика чисельність елементів, наявність інформаційного зв’язку між ними. Інколи до числа властивостей складних систем додають здатність до самоорганізації (самоуправління), при цьому розуміють здатність системи на основі інформації про зовнішнє середовище поступово змінювати структуру або значення своїх параметрів таким чином, щоб в більшій мірі відповідати своєму цільовому призначенню. Систему, яка має такі властивості, називають також кібернетичною.

З урахуванням розглянутих тут в досить короткій формі основних понять теорії систем можна стверджувати, що системний підхід орієнтований на дослідження визначеної системи як єдиного цілого, коли вивчаються принципи організації елементів в цілісну систему, а функціонування кожної підсистеми і окремих елементів розглядається з точки зору головної цілі, що стоїть перед системою.

Наряду з поняттям системного підходу існує і широко застосовуються в науковій літературі поняття "системний аналіз", причому не рідко допускається мішанина у використанні цих понять. Системний підхід представляє собою сучасну загальнонаукову методологію дослідження складних об’єктів (систем). Загальна теорія систем - це міждисциплінарна теорія, що узагальнено описує системи різних типів і класів, а також розробляє специфічні методи їх аналізу. Отже, системний аналіз можна розглядати як конкретну реалізацію системного підходу на основі ідей і методів теорії систем, тобто як сукупність визначених методів і принципів, які використовують для дослідження процесу функціонування різних складних систем з метою його удосконалення.

Необхідно також відзначити, що «системний аналіз» - це дисципліна не математична. Він адаптує, вбирає методи, що грунтуються на аналізі формалізованих моделей. Але цим далеко не вичерпується. Як всяка

синтетична дисципліна, він широко спирається на неформальні процедури і використовує вербальні, якісні обґрунтування [34, 36, 173, 177].

Практична реалізація системного підходу до вирішення різних проблем пов’язана із застосуванням спеціальних методів і технічних засобів аналізу реальних систем, технології виявлення системних зв’язків і т.п., які інтенсивно розробляються в теперішній час. Основним методом вивчення складних систем, що лежать в основі системного підходу, є метод моделювання. Сутність цього методу полягає в тому, що створюється модель досліджуваної системи, за допомогою якої і вивчається процес функціонування реальної системи.

Слід зазначити, що результати математичного моделювання мають практичний зміст тільки в тому випадку, коли модель адекватна реальному процесу, тобто достатньо добре відображує дійсність. Як відомо, щоб побудувати математичну модель процесу функціонування любої системи, необхідно спочатку дати змістовний опис цього процесу, потім формалізувати всі поняття і відношення, що пов’язані с системою, параметри, що характеризують досліджуваний процес, та після цього знайти його математичний опис. Аналізуючи шляхи виникнення математичних моделей, академік М.М. Моісеєв [174] впровадив поняття феноменологічних моделей. Моделі, які являють собою змістовний опис явищ або процесів, що отримані в результаті прямого спостереження для безпосереднього вивчення і осмислення, називають феноменологічними.

Отже, методологічною основою дисертаційної роботи є системний підхід як сукупність загальних методологічних принципів отримання знань щодо впливу фізичних, хімічних, фізико-хімічних властивостей ВВБЗР (факторів охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання) на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння різних речовин і матеріалів в системних об’єктах таких, як об’єкт з пожежним навантаженням із ЦВМ, що розглядається з точки зору захисту від пожеж [104].

2.1.2 Систематизація елементів протипожежного захисту об’єкта

Система протипожежного захисту об’єкта (СППЗО) є складовою більш складної системи забезпечення пожежної безпеки об’єкта (СЗПБО). Протипожежний захист об’єкта (ППЗО) повинен досягатися застосуванням одного з наступних способів або їх комбінацією [197]:

1. Застосування засобів пожежогасіння і відповідних видів пожежної техніки.

2. Застосування автоматичних установок пожежної сигналізації.

3. Застосування основних будівельних конструкцій і матеріалів, в тому числі таких, що використовуються для облицювання конструкцій, з нормованими показниками пожежної безпеки.

4. Застосування просочення дерев’яних конструкцій об’єкта антипіренами і нанесення на їх поверхню вогнезахисних фарб (покриттів).

5. Застосування пристроїв, що забезпечують обмеження розповсюдження пожежі.

6. Застосування організаційних заходів щодо використання технічних засобів, в тому числі автоматичних, для сповіщення про пожежу і евакуацію людей.

7. Застосування засобів колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі.

8. Застосування засобів протидимного захисту.

СППЗО також відноситься до складних систем, і тому в її структурі можна виділити підсистему пасивного і активного протипожежного захисту. Наведений вище перелік способів захисту характеризується виконанням різних функцій, а тому його можна розкласти на способи пасивного і активного протипожежного захисту. Оскільки пасивний протипожежний захист визначається застосуванням заходів вогнезахисту, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації під час гасіння пожежі, до заходів пасивного протипожежного захисту слід віднести заходи за пунктами 2, 3, 4, 7, 8 наведеного переліку. Натомість активний протипожежний захист визначається

застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в любий час бути мобілізованими для гасіння пожежі. Отже, до заходів активного протипожежного захисту слід віднести заходи за пунктами 1, 5, 6 переліку.

Заходи пасивного і активного протипожежного захисту тісно взаємопов'язані та взаємообумовлені, тому їх необхідно розглядати з одного боку як цілісну підсистему в структурі СППЗО, а з іншого – як окремі структури (елементи), бо в них діють багато різнопланових факторів, які призводять до різних за природою процесів.

Основним функціональним завданням пасивного протипожежного захисту об'єкта є забезпечення нормативного часу протидії виникнення пожежі або затримки її на початковій стадії до прибуття пожежних підрозділів. В Україні цей норматив складає 5 хвилин для міст і 12 хвилин - для сільської місцевості [200].

Оскільки в переважній кількості випадків пожежне навантаження на реальних об'єктах (особливо на об'єктах з масовим перебуванням людей) становить деревина, тканини, папір, текстильні покриття, очерет, то в заходах пасивного протипожежного захисту особливу роль відіграє просочення зазначених матеріалів ВВБЗР. Наприклад, отримана таким чином вогнебіозахищена деревина буде мати значні відмінності порівняно з незахищеною деревиною стосовно показників пожежобіобезпеки. Дійсно, температура займання звичайної незахищеної деревини лежить в діапазоні 235÷250 ^{0}C, температура займання вогнебіозахищеної деревини може бути підвищена до 400 ^{0}C. З літературних джерел також відомо, що перехід від початкової стадії пожежі до стадії пожежі, що розвивається характеризується досягненням температурних значень середньо об'ємної температури того ж діапазону значень в 235÷250 ^{0}C. Логічно очікувати, що за рахунок проведення заходів з вогнебіозахисту деревини, тривалість початкової стадії розвитку пожежі (ПСРП) буде значно подовжена, оскільки перехід до подальшої стадії пожежі буде можливим по досягненні більш високих температур. Отже, існує можливість середньостатистичну тривалість ПСРП в 5÷10 хвилин [26]

подовжити до 15÷20 хвилин, що розширює можливість ліквідації пожежі на стадії ПСРП.

В переліку заходів з активного протипожежного захисту особливо важливим є застосування засобів пожежогасіння і відповідних видів пожежної техніки [197]. Традиційно серед засобів пожежогасіння найбільш широко використовується вогнегасна речовина – вода. Як показано в розділі 1, перспективним засобом слід вважати воду з різними цільовими добавками, зокрема ВВБЗР.

Базуючись на цьому, доцільно розглядати використання ВВБЗР в єдиній підсистемі пасивного і активного протипожежного захисту об'єкта. Відповідно, побудова такої підсистеми СППЗО направлена на вирішення проблеми підвищення рівня протипожежного захисту об'єкта.

В цьому аспекті проведено аналіз статистичних даних про пожежі в Україні. В статистичних даних можна виділити три групи, що безпосередньо пов'язані з використанням ВВБЗР.

Група 1. *Пожежі на об'єктах, де був відсутній протипожежний захист дерев'яних конструкцій.* Гасіння пожеж частіше всього відбувалось за рахунок використання компактних водних струменів. Ефективність гасіння була не висока, час гасіння – великий, збитки від пожеж – значні. В цих випадках відсутні передумови спрацювання підсистеми пасивного і активного ППЗО.

Група 2. *Пожежі на об'єктах, де вогнезахисне обробляння дерев'яних конструкцій за різних причин було неефективним.* Пасивний ППЗО майже не вплинув на початкову стадію пожежі при її гасінні компактними водними струменями, тобто не було створено передумов для спрацювання підсистеми з пасивного та активного ППЗО. Збитки від пожеж - значні.

Неефективне вогнезахисне оброблянні дерев'яних конструкцій відбувалось, як правило, в періоди до появи нових ВВБЗР. В цих випадках частіше всього використовувався вогнебіозахисний засіб МС. В рецептурі цього засобу присутні компоненти, що є антагоністами в процесі інгібування ланцюгових реакцій полум'яного горіння: амонієві солі ортофосфорної кислоти

і фторида натрію [162]. З урахуванням процесів висолювання, термін вогнезахисту зазначеного ВВБЗР становив не більше 1 року.

Група 3. *Пожежі на об'єктах, де вогнезахисне обробляння дерев'яних конструкцій здійснене новими ефективними просочувальними ВВБЗР*. Пожежне навантаження формували переважно бітумні, пластикові полімерні матеріали. Пожежі впевнено погашені з використанням компактних водних струменів, тобто спостерігалось ефективне пожежогасіння. Збитки від пожеж були незначні. В цих випадках спрацювала підсистема пасивного і активного ППЗО, але ефективність пожежогасіння була б іще вищою, якби для активного ППЗО використовувались тонко розпилені струмені ВВБЗР.

Необхідно відзначити, що при ефективному вогнезахисному оброблянні дерев'яних конструкцій та при малому пожежному навантаженні, пожежу можна загасити первинними засобами на початковій стадії. Такі випадки класифікуються як загоряння і не попадають до офіційної статистики пожеж, що відбулися протягом звітного періоду (календарного року) і викривлює загальне уявлення про рівень ефективності вогнезахисту на об'єктах в державі. В Росії на державному рівні поновлюється визначення терміну «*загоряння*» [34] та вноситься до переліку офіційних статистичних даних.

Важливим елементом методології, що пропонується, є встановлення критеріїв і методів їх визначення, за якими можливо оцінити якість отриманих результатів вогнезахисту. Одним з параметрів, за яким можливо створити зазначені критерії, може бути температура займання вогнезахищеної та вогненезахищеної деревини. Цей параметр визначає декілька характеристик. По-перше, про якість вогнезахисту свідчить підвищення температури займання з 230-235 ^{0}С (у вогненезахищеної деревини) до 400-410 ^{0}С (у вогнезахищеної деревини). По-друге, підвищення температури займання пожежного навантаження подовжує час 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.

Отже, в основі захисту систематизованого об’єкта від пожеж є феномен класичного трикутника горіння: горюча речовина, окисник, джерело займання. Тому, в теоретичному плані, фундаментальним є феноменологічне моделювання заходів пасивного і активного захисту: розкриття суті впливу факторів охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання (екранування) на унеможливлення реалізації або руйнування трикутника горіння при використанні ВВБЗР [162]. В цьому аспекті найбільш важливими є: обґрунтування ефективності використання водних вогнебіозахисних речовин в методах пасивного і активного протипожежного захисту об’єкта; феноменологія процесу просочення деревини водними розчинами антипіренів; феноменологія створення бар’єру для процесу висолювання антипірену з целюлозовмісних матеріалів за наявності плівки полімерного антисептика на їх поверхні.

2.2 Теоретичне обґрунтування ефективності використання водних вогнебіозахисних речовин в методах пасивного і активного протипожежного захисту об’єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ

В теоретичному плані розвиток наукових основ створення ВВБЗР ґрунтується на отриманні нових та поглиблених знань щодо умов реалізації комплексу вогнезахисних та вогнегасних факторів впливу ВВБЗР (охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання) на процеси займання, поширення полум’я поверхнею та припинення горіння різних матеріалів. Зазначені фактори розглядатимемо при введенні ВВБЗР в зону термічних перетворень, що визначається мікрооб’ємом капіляр і пор деревини при пасивному захисті та мікроб’ємом полум’я при активному захисті від пожеж.

На початковій стадії вплив ВВБЗР на зону термічних перетворень подібний до впливу води. Тому логічним буде почати з дослідження охолоджувального ефекту шляхом аналізу балансу теплоти в зоні термічних перетворень. Для цього скористаємось розрахунками з роботи [196]:

$$\partial U/\partial t = \omega_* - E_F F - u \nabla U, \qquad (2.1)$$

де U - густина внутрішньої енергії, Дж/м^3;

ω_* - швидкість тепловиділення за рахунок хімічних реакцій в одиниці об'єму, Дж/м^{3}с;

E_F – швидкість поглинання тепла одиницею поверхні, Дж/м^{2}с;

F – питома поверхня вогнегасної речовини в об'ємі горіння, 1/м;

u - швидкість газового потоку, м/с.

Останній член характеризує долю тепла, що переноситься потоками газу. Із рівняння (2.1) випливає, що припинення горіння має місце при виконанні умови:

$$F > F_* = (\omega_* - u \nabla U)/ E_F, \qquad (2.2)$$

що є критерієм перешкоджання тепловому займанню.

Коли основну роль відіграє ефект охолодження, наприклад, при гасінні розпиленою водою, критерій гасіння має наступний вигляд:

$$F > F_* = \eta_* \dot{m}_Г / \dot{m} \cdot E_Г / W \cdot f_*, \qquad (2.3)$$

де $\eta_* \leq 1$ – коефіцієнт повноти згоряння;

$\dot{m}_Г$ - масова швидкість горіння, кг/(м^{2}с);

$\dot{m}$ - масова швидкість випаровування кг/ (м^{2}с);

$E_Г$ - теплотворна здатність палива, Дж/кг;

W – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

f_* - питома поверхня горючих матеріалів в об'ємі полум'я.

Для пожежі класу В величина $f_* \approx H_{пл}^{-1}$, де $H_{пл}$ - висота полум'я.

Здавалося б, доцільніше за все при гасінні пожеж збільшувати питому поверхню дисперсного засобу шляхом його все більшого подрібнення, оскільки $F = \sigma n \sim \bar{r}^{-1}$, де $\sigma \sim \bar{r}^{-2}$ - середня поверхня однієї частинки, а $n \sim \bar{r}^{-3}$ – їх концентрація, $\bar{r}$ – середній радіус частинки. Це дозволило б суттєво підвищити ефективність гасіння при незмінній масі (об'єму), що витрачається на гасіння. Однак така можливість виправдана лише в тому випадку, коли пристрій

подавання речовини розташовано безпосередньо в полум'ї. При гасінні ж ззовні дрібні частинки не можуть проникнути вглибину області горіння, так як вони, по-перше, легко виносяться всхідними газовими потоками полум'я та, по-друге, досить швидко гальмуються в газовому середовищі. В такому випадку зменшення середнього розміру частинок супроводжується тим, що сповільнюється рух фронту значущих концентрацій в зону горіння, що визначається розміром F_*, та разом з цим збільшується час гасіння [25, 195, 289].

Експериментальні дослідження проникнення розпиленої води в полум'я показали [2, 73, 108, 150, 168, 192 194, 241, 241, 248-250, 254, 260, 290], що в залежності від напору струменя оптимальний розмір краплин коливається в межах r = 0,05 ÷ 0,4 мм. Крім того, здатність до розпилення має чутливість до виду горючого матеріалу, який визначає інтенсивність піролізу і температуру полум'я, тобто швидкість всхідних потоків. Щоб краплинка не піднімалась догори динамічний напір всхідних струменів газу повинен бути врівноваженим силою тяжіння, що можливо при :

$$r \geq r_{\text{кр}} = \frac{3}{8} \frac{\rho_*}{\rho} \frac{u_*^2}{g} , \qquad (2.4)$$

де ρ_* - густина газу, ρ - густина речовини, g- прискорення сили тяжіння, u_* - вертикальна складова швидкості газу в полум'ї.

Зокрема при $\rho_*/\rho = 10^{-3}$ із рівняння (2.4) для критичного значення радіуса краплі отримаємо значення:

u_*, м/с	1	2	5	10
$r_{\text{кр}}$, мм	$3{,}35 \cdot 10^{-2}$	0,15	1	4

З цих даних впливає, що краплинки радіусом в 1 мм мають достатній час для відповідного впливу на процеси горіння.

Таким чином, в полум'ї відбувається природнє розділення краплинок: легкі виносяться потоком вгору, важкі падають донизу. Це сприяє збільшенню вертикального масштабу початкового струменя речовини, яка гасить полум'я, і також разом з цим збільшується і розмір аерозольної хмари, що екранує

поверхню горіння від випромінювання полум'я. Якщо густина краплинок в струмені, що розширюється, залишається достатньо великою, то ефект буде сприяти гасінню. Ймовірно, для кожного конкретного полум'я повинен бути свій оптимальний спектральний набір розмірів краплинок, пов'язаний із середнім значенням величини u_*, яке приводить до швидкого зриву полум'я. До того ж, густина розподілу краплинок за розміром повинна бути максимально наближена до критичного розміру $r \equiv r_{кр}$.

Наведені уявлення безпосередньо стосувались розкриття суті вогнегасної дії води, але ВВБЗР мають певні відмінності від води оскільки, як правило, мають у своєму складі до 30% (мас.) вогнегасних солей. Нехай ВВБЗР з інгібувальними солями має розмір краплин в 1мм. Коли така краплинка попадає в полум'я, починається її нагрівання і випаровування розчинника (води), що супроводжується охолодженням об'єму полум'я, тобто відбувається реалізація основного фактора впливу води на процеси горіння. Як було наведено вище, час витання краплинок може бути 5 секунд або і більше. За цей час вода, як розчинник, повністю випаровується з краплини і відбувається перехід останньої з рідкого стану в твердий. Отже краплини перетворюються в частинки інгібувальної солі, густина яких буде більше ніж у два рази ніж початкова густина ВВР. Такий перехід збільшує час витання в об'ємі полум'я. Розмір частинок інгібувальних солей може досягати 50 - 100 мкм, тобто досягне стану тонкорозпиленої сольової вогнегасної речовини (СВР). В подальшому частинки СВР будуть діяти в мікро об'ємі полум'я всіма факторами впливу, що характерні для СВР (інгібуванням, флегматизуванням, екрануванням).

Розвинутість поверхні вогнегасної речовини в осередку пожежі визначає не тільки швидкість її охолодження, а ще й швидкість паралельних процесів, що приводять до зриву полум'яного горіння. Як відомо [15, 25, 153, 195, 196, 238, 289] при гасінні полум'я інгібувальними сольовими антипіренами рекомбінація активних центрів реакцій відбувається як безпосередньо на поверхні частинок солей, так і в результаті їх взаємодії з леткими компонентами термохімічного розкладу СВР. Швидкість виходу летких

продуктів та їх концентрація в об’ємі горіння буде прямо пропорційна величині питомої поверхні СВР, так що при деякому критичному значенні відбудеться зрив як ланцюгового займання [153], так і теплового [25].

Таким чином, інгібування полум’я пов’язане з рекомбінацією активних радикалів поблизу та на поверхні вогнегасної речовини. Швидкість зменшення концентрації активних центрів реакцій горіння N при цьому визначається величиною [196]:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{полум'я} = -KFN - \sum_i K_i N_i N \equiv -K_F FN, \qquad (2.5)$$

де $N_i \sim F$ – концентрація летких інгібувальних компонентів термічного розкладу вогнегасної речовини;

K та K_i – константи гетерогенних і бімолекулярних перетворень;

K_F - сумарна константа розриву ланцюгів.

Тоді для гасіння полум’я вогнегасними солями необхідно виконання умов:

$$\gamma - (K_F F + 1/\tau_R)\, N \le 0. \qquad (2.6)$$

$$\varepsilon / C_* \rho_* \cdot N / \tau_R - E_F / C_* \rho_* \cdot F - u/l \cdot (T - T_0) < 0. \qquad (2.7)$$

Нерівність (2.6) – критерій зриву ланцюгового займання, а (2.7) – теплового.

Тут γ – швидкість генерації радикала;

τ_R – середній час життя радикалів у відсутності інгібітора;

ε – середня теплота, що виділяється при послідовності всіх реакцій, які народжуються одною молекулою радикала;

C_* та ρ_* - питома теплоємність і густина газу в полум’ї;

T – температура полум’я;

T_0 – температура газової суміші на вході в зону реакції;

l - середній розмір зони реакції.

Як визначено в [196], після введення порошку газова суміш, яка реагує, релаксує до режиму із стаціонарною концентрацією радикалів, визначеною виразом (2.6), тобто:

$$N_{\text{СТ}} = \gamma\, \tau_R / (1 + K_F\, F\, \tau_R), \qquad (2.8)$$

і , підставляючи це значення в (2.7), можна визначити, що гасіння відбудеться при:

$$F > F_* = \sqrt{Z^2 + \Phi} - Z, \qquad (2.9)$$

де

$$Z = \frac{1}{2}\ \frac{E_F + u/l \cdot C_* \rho_* \tau_R K_F (T - T_0)}{E_F \tau_R K_F};$$

$$\Phi = \frac{\varepsilon\gamma - u/l \cdot C_* \rho_* (T - T_0)}{F_F K_F \tau_R}. \qquad (2.10)$$

Необхідно відзначити відмінність умов впливу і взаємозв’язку частинок інгібірувальних солей з ВВБЗР у мікро об’ємі зони горіння від умов інгібування солями порошкових вогнегасних речовин. У випадку з ВВБЗР, коли в мікро об’ємі відбувається охолодження за рахунок випаровування води, а також за рахунок розбавлення водяною парою горючої газової суміші (зменшення концентрації кисню), інгібірувальна ефективність частинок солей в таких умовах може збільшитися в декілька разів [238, 239].

Таким чином, можна представити феноменологічну модель вогнегасної дії ВВБЗР під час гасіння пожеж твердих горючих матеріалів (ТГМ), наприклад, деревини. Пожежа з навантаженням із деревини складається з полум’яного горіння газоподібних продуктів піролізу та конденсованого горіння карбонізованого поверхневого шару деревини. Як відомо, полум’яне горіння ТГМ майже не відрізняється від полум’яного горіння горючих рідин і газових сумішей. Тому ми розглянемо вплив і взаємозв’язок краплини ВВБЗР з карбонізованою поверхнею ТГМ, яка із гідрофільної перетворилася на гідрофобну. Краплина ВВБЗР повинна мати менший поверхневий натяг ніж у води, тоді вона буде здатна змочувати нагріту поверхню ТГМ. Подальше випаровування розчинника (води) приводитиме до утворення спочатку плівки гелю, а в подальшому плівки розплавлених солей (комплексної хімічної сполуки). Ці плівки будуть ізолювати як доступ кисню, необхідного для

гетерогенного горіння ТГМ, так і вихід газоподібних продуктів піролізу в полум'я. Гелеутворювальна властивість ВВБЗР повинна бути особливо корисною під час гасіння вертикально розташованих поверхонь ТГМ, оскільки це підвищить коефіцієнт корисної дії ВВБЗР на пожежах, особливо в приміщеннях багатоповерхових будинків. Відомо, що за статистичними даними при гасінні пожеж в приміщеннях житлового фонду компактними струменями води коефіцієнт корисної дії складає не більше 10 % [236].

Таким чином, проведені теоретичні дослідження фізичного і феноменологічного моделювання процесів впливу і взаємодії ВВБЗР з полум'ям та конденсованим горінням поверхонь ТГМ показали значну відмінність від таких процесів при використанні звичайної води. При використанні ВВБЗР можуть реалізовуватись як фізико-хімічні, так і технічні переваги, які підвищують ефективність пожежогасіння. За допомогою ВВБЗР можна подолати технічні труднощі при подаванні вогнегасної речовини для гасіння пожеж. Так при подаванні розпиленого струменя ВВБЗР з розмірами краплин 0,5 – 1 мм, частинки подрібнюються в полум'ї до краплин і частинок інгібувальної речовини у тонко розпиленому стані. Отже, наведені результати досліджень свідчать про перспективність використання ВВБЗР для підвищення ефективності активного захисту об'єктів від загорань та пожеж. Можна стверджувати, що такі ВВБЗР повинні складатися з води, що забезпечує охолодження та флегматизацію, та водорозчинних солей або комплексних хімічних сполук, що забезпечують ефекти інгібування і ізолювання, а також здатні до гелеутворювання при певних концентраціях.

Літературний аналіз розділу 1 свідчить про те, що застосування ВВБЗР дає можливість реалізувати практично всі відомі фактори, що протидіють процесам займання та розповсюдження полум'я по поверхні та/або прискорюють процеси припинення горіння. Включення відповідних компонентів в склад ВВБЗР дає можливість посилити вогнезахисну або вогнегасну дію за рахунок фактору інгібування активних центрів горіння (АЦГ) речовин пожеж класів А та В продуктами термічного розкладу неорганічних

сполук (зі складу ВВБЗР) [14, 25, 26]. Відомо також, що під час застосування сумішей неорганічних сполук виникають неадитивні процеси, які або посилюють, або послаблюють інгібуючий ефект. Тобто реалізуються синергетичні або антагоністичні явища. Неврахування ефекта антагонізму під час створення рецептур ВВБЗР часто-густо призводить до зменшення ефективності вогнезахисту ЦВМ [13], або до зменшення вогнегасної дії при використанні водних вогнегасних речовин під час гасіння пожеж класу В [14]. В зазначених випадках ефект антагонізму спостерігався під час використання фосфоровмісних неорганічних сполук в суміші з лужними солями галогенідів [242, 244]. З іншого боку, використання сумішей хлорида калію з хлоридом натрію, бікарбонатом натрію та з іншими натрієвими солями приводить до підвищення вогнегасної здатності, тобто до реалізації синергетичного ефекту. Таким чином при створенні складів ВВБЗР із сумішей речовин велике значення мають як теоретичні, так і експериментальні дослідження реалізації неадитивних явищ. З точки зору теоретичних досліджень для виявлення таких явищ перспективним виглядає напрямок моделювання процесів інгібування шляхом квантово-хімічних розрахунків енергетичних параметрів іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів (ІМК, ІРК) активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу сумішей неорганічних сполук [92]. З огляду на експериментально визначений ефект синергізму (під час визначення вогнегасної здатності) при використанні азото- та фосфоровмісних сполук в складах вогнегасних порошків, доречно буде провести квантово-хімічні розрахунки енергетичних параметрів ІРК активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу ВВБЗР, які також у своєму складі містять суміші азото- та фосфоровмісних сполук.

Фізико-хімічні характеристики атомів і їх сполук у наукових та технологічних дослідженнях поповнюються головним чином за рахунок хімічних експериментів. Для встановлення інгібувальних властивостей сумішей неорганічних сполук застосовують експериментальні дослідження, зокрема за зміненням інтенсивності поглинання ОН-радикалу вуглеводневого полум’я

продуктами їх термічного розкладу [131]. Але існує багато прикладних задач, для яких постановка експерименту технічно неможлива або технологічно невиправдана. У таких випадках доводиться спиратися на результати квантово-хімічних розрахунків енергетичних параметрів ІМК (ІРК). Ідея полягає в тому, щоб за допомогою розрахунку енергетичного параметра ІМК (ІРК) ($E_{кул}$ – кулонівської енергії взаємодії, ккал/моль) побудувати ряди їх міцності та теоретично спрогнозувати інгібувальні властивості таких комплексів [108, 162, 239].

Частинки ВВБЗР під дією температури розкладаються на іони фосфоровмісних сполук ($H_2PO_4^-$, HPO_4^-, PO_3^-, PO^+, P_2O^+, $P_2O_2^+$, $P_2O_3^+$ тощо) та азотовмісних сполук (NH_4^+, NH_2^-, NH^-, NO^+, NO_2^+ тощо). Будемо розглядати радикали ланцюгових реакцій горіння вуглеводневих речовин (H, CH_3, CH_2, O, OH, CO тощо).

В роботах [131, 162, 239] розглядається напів-емпіричний метод розрахунку ряду фізико-хімічних параметрів, який у своїй основі базується на концепції Лайнуса Полінга про вирівнювання електронегативності і на розширеному методі Х'юккеля. Зокрема, авторами запропонована модель визначення енергетичних параметрів молекул, ІМК, ІРК з урахуванням визначення ефективних зарядів атомів в молекулах, ІМК, ІРК. Електронегативність (E) атомів визначається за виразом:

$$E = Aq^2 + Bq + C, \qquad (2.11)$$

де: q – ефективний заряд атома; A, B, C – параметри, які є індивідуальними для кожного атому [131, 162, 239].

Електронегативність - здатність атома утримувати зовнішні (валентні) електрони. Вона визначається ступенем тяжіння цих електронів до позитивно зарядженого ядра. Ця властивість проявляється в хімічних зв'язках як зміщення електронів зв'язку в бік більш електронегативного атома.

Електронегативність атомів, що беруть участь в утворенні хімічного зв'язку, - один з головних чинників, який визначає не тільки тип, але й

властивості цього зв'язку, і цим самим впливає на характер взаємодії між атомами при протіканні хімічної реакції.

Електронегативність не є абсолютною константою елемента. Вона залежить від ефективного заряду ядра атома, який може змінюватися під впливом сусідніх атомів або груп атомів, типу атомних орбіталей і характеру їх гібридизації. Тому завдання розрахунку електронегативності для атомів, які входять в хімічні сполуки прикладного призначення, є актуальною.

Відповідно до запропонованого методу [131] необхідно отримати рішення системи нелінійних рівнянь відносно ефективного заряда атома q_i.

$$A_1 q_1^2 + B_1 q_1 + C_1 + M_1 - A_2 q_2^2 - B_2 q_2 - C_2 - M_2 = 0;$$

$$A_2 q_2^2 + B_2 q_2 + C_2 + M_2 - A_3 q_3^2 - B_3 q_3 - C_3 - M_3 = 0;$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$A_{m-1} q_{m-1}^2 + B_{m-1} q_{m-1} + C_{m-1} + M_{m-1} - A_m q_m^2 - B_m q_m - C_m - M_m = 0; \qquad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^{N} q_i = Q,$$

де Q - сумарний заряд. У випадку молекули Q=0.

Розв’язання системи нелінійних рівнянь такого виду може бути проведене декількома методами. Особливістю прикладної задачі, яка розглядається, зокрема перелік нелінійних доданків вимагає застосування саме наближених числових методів.

Із застосуванням методу Ньютона для рішення систем нелінійних рівнянь та метода Крамера для рішення системи лінійних рівнянь було вдосконалено емпіричний метод розрахунку електронегативності атомів ІМК (ІРК) активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу ВВБЗР [108, 162]. Розраховано енергетичну міцність ($E_{кул}$) комплексів. Використовуючи дані розрахунки та дані літературних джерел [52, 226] щодо енергетичного стану азотовмісних та фосфоровмісних ІМК, ІРК з активними центрами процесів горіння (АЦГ), побудовано ряди міцності комплексів (табл. 2.4, 2.5).

Таблиця 2.4

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

ІМК, ІРК з кисневмісними АЦГ		ІМК, ІРК з водневмісними АЦГ	
Комплекс	$E_{кул}$, ккал/моль	Комплекс	$E_{кул}$, 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 2.5

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

ІМК, ІРК з кисневмісними АЦГ		ІМК, ІРК з водневмісними АЦГ	
Комплекс	$E_{кул}$, ккал/моль	Комплекс	$E_{кул}$, 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

Розглядаючи результати розрахунків $E_{кул}$ для ІМК, ІРК, що наведені в таблиці 2.4, можна стверджувати, що значення $E_{кул}$ значно більші для

комплексів фосфоровмісних речовин з водневмісними АЦГ, ніж для комплексів з кисневмісними АЦГ. Така ж залежність значень $E_{кул}$ для комплексів азотовмісних речовин, що наведено в таблиці 2.5 [108, 162].

Можна прогнозувати, що при використанні сумішей фосфоровмісних речовин та азотовмісних речовин (продуктів розкладу полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду) з'явиться вибірковість тяжіння кисневмісних АЦГ (O', O'H, HO_2' тощо) та водневмісних АЦГ (H', OH', $C'H_3$, $C'H_2$ тощо) до різних продуктів термічного розкладу зазначеної речовини, що в результаті може привести до підвищення ефективності як гомогенного, так і гетерогенного інгібування ланцюгових реакцій горіння різних органічних речовин, тобто до ефекта синергізму. Цей ефект досліджено теоретично та експериментально в роботах [92, 242-244].

Крім ефектів охолодження та інгібування в мікрооб'ємі капіляр і пор слід врахувати реалізацію ефекта флегматизування, тобто перетворення горючого середовища на негорюче шляхом розведення його флегматизаторами [14]. До таких речовин відносяться негорючі гази N_2, CO_2. Вони можуть бути продуктами термічного розкладу неорганічних та органічних речовин, зокрема, фосфатів та сульфатів амонію, азотовмісних полімерів тощо. Присутність таких газів переводить стехіометричний стан реакції, наприклад, окиснення в нестехіометричний стан, коли прояв інгібіторів значно посилюється [238].

Для підсилення ефектів охолодження, інгібування, флегматизування доцільно використати і ефект ізолювання мікроб'єму капіляр і пор від впливу зовнішніх факторів, насамперед, від доступу кисню і води з повітря. Для цього можна на поверхню вогнезахищеної деревини нанести плівку полімерного антисептика. Зменшення концентрації кисню в капілярах і порах буде сповільнювати швидкість процесу термодеструкції макромолекул целюлози [122, 144, 162]. Важливою складовою цього ефекта є ізолювання вогнебіозахищеної деревини від доступу води з повітря для подальшого припинення процеса висолювання антипіренів, що призводить до втрати необхідного рівня вогнезахисту.

2.3 Математична модель розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини

Відповідно до діючих нормативів в Україні якість вогнезахисного обробляння контролюється за експрес-методом відповідно до вимог [64]. Сутність цього методу полягає в тому, що стружку вогнезахищеної деревини (пробу) товщиною до 1 мм поміщають у полум'я сірника і витримують 15 секунд. Після чого визначають час самостійного горіння і тління стружки, що служить підґрунтям для відповідних висновків. Однак, за допомогою цього методу можна контролювати лише важкозаймисту деревину (вогнезахищену деревину другої групи). Переважна ж більшість споруд передбачає використання важкогорючої деревини (вогнезахищеної деревини першої групи). Подібна ситуація і в країнах Митного союзу. Наприклад, в Росії використовують експрес-метод з використанням приладу ПМП-1, в якому реалізовано той же метод "стружки" [187].

Таким чином, задача створення більш точних методів контролю, за допомогою яких можливо було б визначити переведення деревини у важкогорючий стан залишається не вирішеною. Значною мірою цьому б сприяло визначення концентрації антипіренів, що утримуються у вогнезахищеній деревині.

Вихідні положення методики, що пропонується ґрунтуються на фізичних властивостях деревини, яка за своєю внутрішньою будовою відноситься до гідрофільних полімерно-пористих матеріалів. В капілярах і порах деревини знаходиться повітря і вода. Свіжа зрізана деревина містить більше 50% води, а під час експлуатації рівноважний вміст вологи складає, як-правило, 10-12%. Волокна деревини, капіляри і пори знаходяться здебільшого в паралельному напрямку до поверхні матеріалу (і саме цією поверхнею деревина й експлуатується на реальних об'єктах).

Як і будь-який капілярно-пористий матеріал, деревина здатна поглинати гідрофільні рідини, в тому числі водні розчини антипіренів. Цією властивістю користуються для її вогнезахисту, а процес поглинання розчину антипірену

називають просоченням. З дослідження руху рідин в капілярно-пористих системах [8-11, 274] відомо, що швидкість і глибина просочення зменшується із збільшенням густини рідини, та збільшується із збільшенням її змочувальної здатності. Тобто для збільшення глибини просочення в такі рідини додають поверхнево-активні речовини (змочувачі). Такий прийом використовується й при поверхневому просоченні деревини вогнезахисними засобами.

Для математичного моделювання розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини пропонується методика, що складається з наступних етапів [263].

Етап 1. Здійснення експериментальних досліджень з просочування деревини та отримання даних із застосуванням капілярно-хімічної технології видобутку речовин з пористих матеріалів [8]. При цьому вважаємо, що феноменологічна модель процесу просочення деревини розчином антипірену виглядає так: рух розчину антипірену забезпечується перпендикулярно площині поверхні. В цьому випадку розчин антипірену спочатку поступає в пори деревини, що більші за розміром і є менш упорядкованими структурами матеріалу, а з них в капіляри. Процес просочування відбувається наступним чином. Спочатку рідина попадає в більш товсті капіляри, а найбільш тонкі заповнюються в останню чергу. З часом інтенсивність руху розчину в капілярах зменшується. На цю стадію впливає густина розчину: із збільшенням густини зменшується глибина просочення, тобто, все більше тонких капілярів залишаються незаповненими. Схематично, характер просочення деревини водними розчинами антипіренів різних концентрацій показано на рисунку 2.1 (концентраціям 5, 10, 15, 20, 25, 30 % відповідають відносні величини 1, 2, 3, 4, 5, 6). По осі ординат відкладена величина концентрації (маса антипірену) водного розчину антипірену (1 відповідає 5 %-му розчину антипірену, 2 – 10%-му і так далі до 6). По осі абсцис відкладена величина глибини просочення в міліметрах. Динаміку процесу просочення графічно зображено штрих-пунктирними лініями (керуючись попереднім припущенням, що цей процес наближений до лінійної залежності). При побудові лінійних залежностей

враховані експериментальні дані про те, що глибина просочення 30%-ним розчином антипірену вогнебіозахисного засобу ДСА-2 складає 3 мм, а глибина просочення 5%-ним розчином складає 4 мм [109].

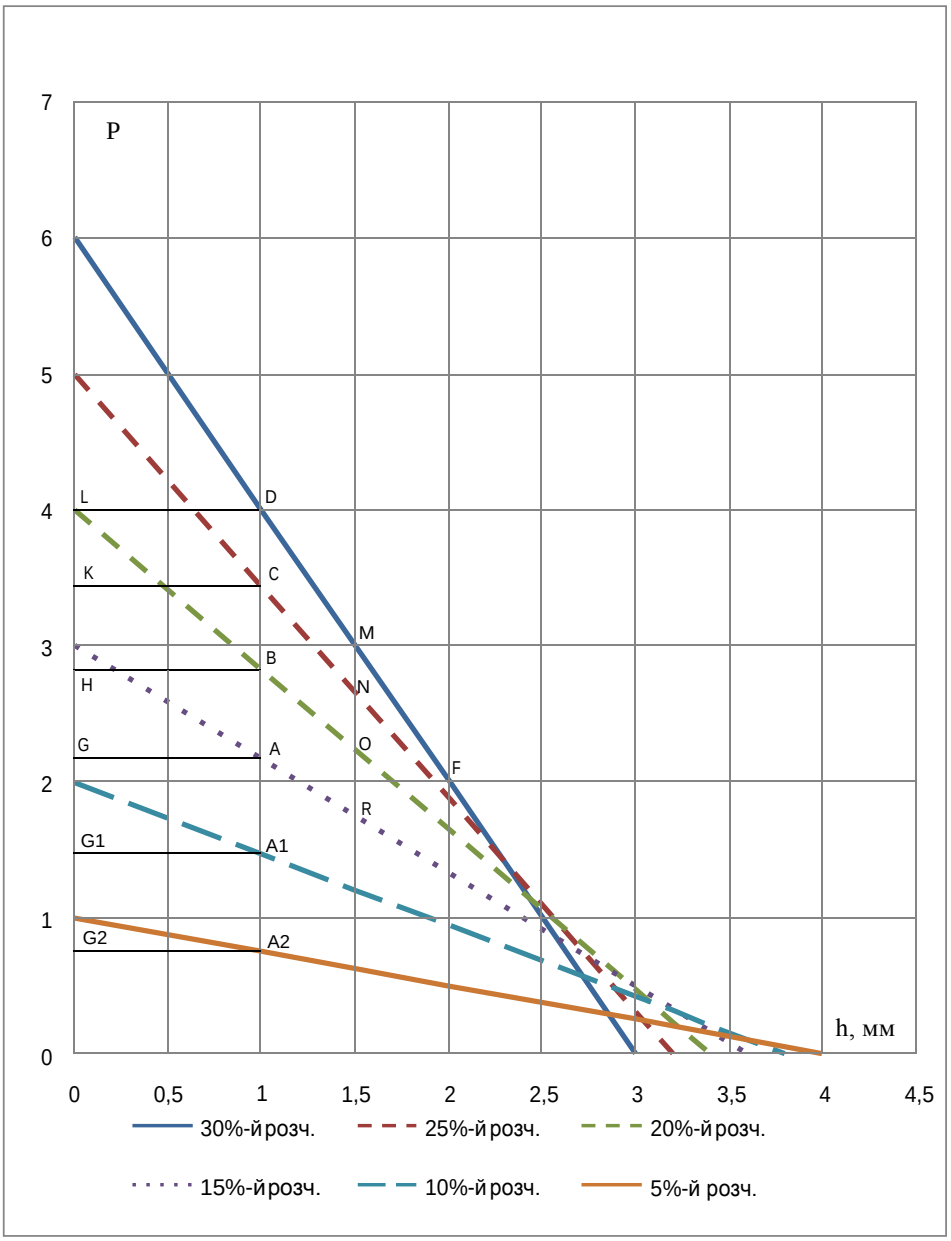


Рисунок 2.1 – Графічне представлення феноменологічної моделі процесу просочення водним розчином антипірену перпендикулярно площині поверхні деревини

Етап 2. Побудова математичної моделі, що описує розподіл концентрації антипіренів вглибину деревини. Експериментальні дослідження еталонних зразків вогнезахищеної деревини дозволяють стверджувати, що найбільш

ймовірною математичною моделлю, що описує розподіл концентрації антипіренів вглибину деревини, є нелінійна залежність, яка близька до експоненційного закону.

$$P(C, h) = a(C) \cdot \exp(-b(C) \cdot h), \qquad (2.13)$$

де $P(C, h)$ - функція розподілу концентрації антипіренів в глибині дерева;

C - початкова концентрація антипіренів в просочувальному розчині;

h - глибина просочування (відстань вглибину перпендикулярно поверхні деревини).

Один із прикладів експериментально встановленого процесу просочення (для випадку, що відповідає 30 %-му розчину антипірену зі складу ВВБЗР ДСА-2М) приведений на рисунку 2.2.

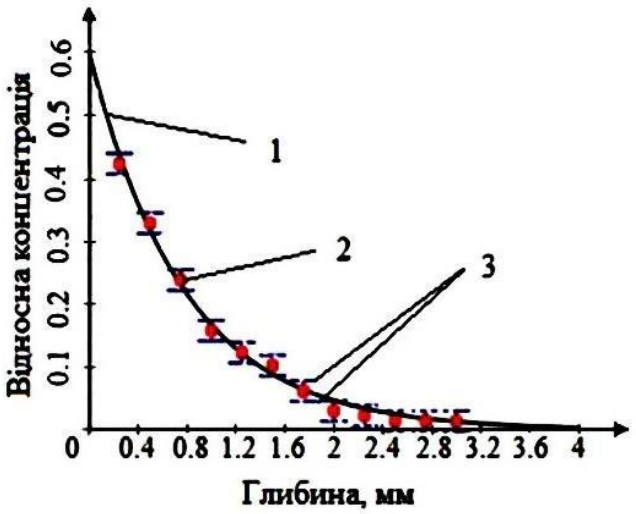


Рисунок 2.2 - Залежність відносної концентрації антипіренів від глибини проникнення у зразок деревини. Криві: 1 – апроксимаційна функція, 2 – вихідні експериментальні дані, 3 – межі відхилень при вимірюванні відносної концентрації

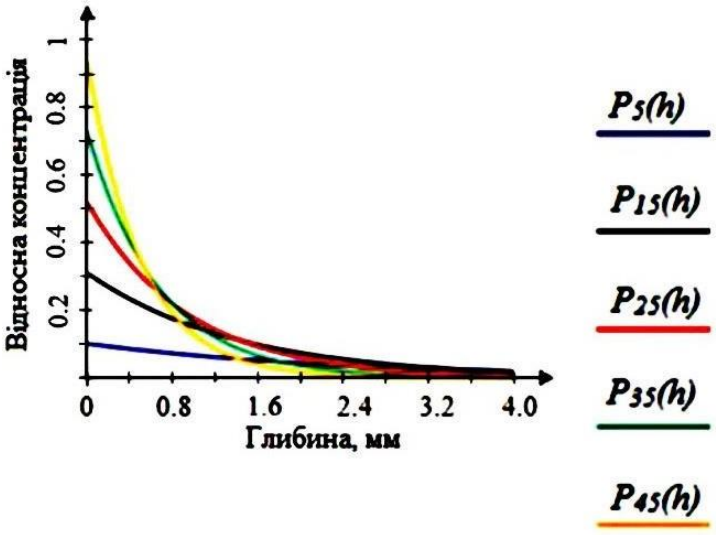


Рисунок 2.3 – Апроксимовані залежності концентрації антипіренів в глибину просоченої деревини для різних значень початкової концентрації антипіренів в просочувальному розчині. Індекс при позначенні функції відповідає концентрації просочувального розчину (%)

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 рисунку 2.3.

Етап 3. Здійснення розрахунків значень апроксимуючих функцій. На основі попередніх вхідних даних шукаємо апроксимацію функцій $a(C)$ и $b(C)$ у вигляді функцій :

$$a(C) = a_0 + a_1 \cdot C \,, \tag{2.14}$$

$$b(C) = b_0 + b_1 \cdot C + b_2 \cdot C^2 \,. \tag{2.15}$$

Результати апроксимації показані на рисунках 2.4 та 2.5.

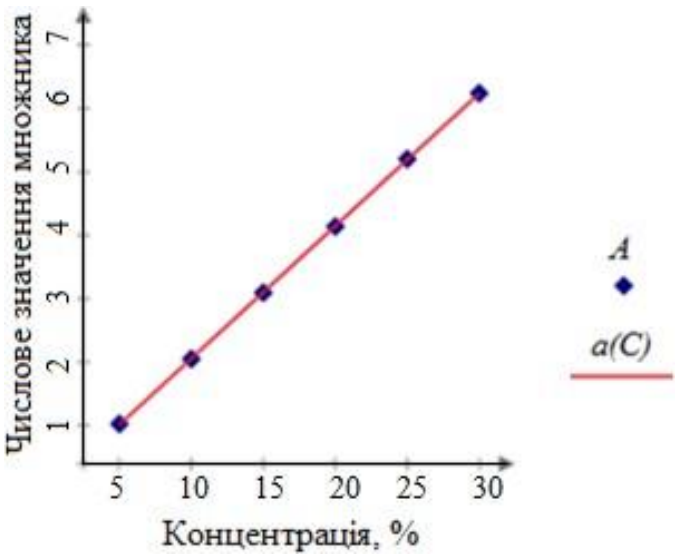
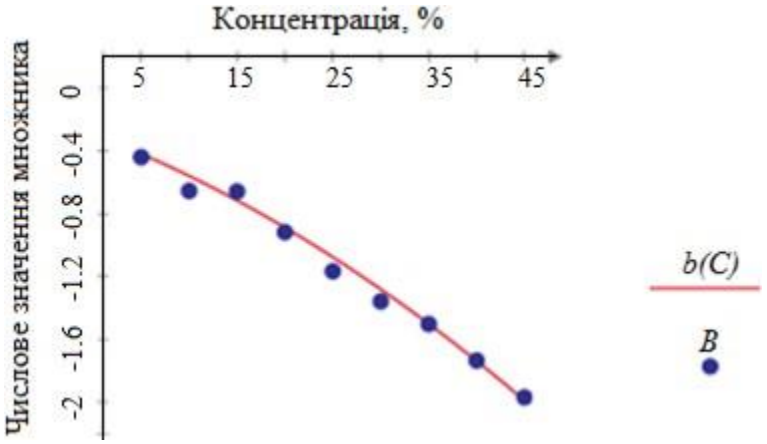


Рисунок 2.4 – Залежність множника *a(C)*від концентрації просочувальної суміші. *A* – початкові емпіричні дані, *a(C)* – знайдена апроксимуюча функція



Рисок 2.5 - Залежність множника *b(C)*від концентрації просочувальної суміші. *B* – початкові емпіричні дані

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 рисунку 2.6.

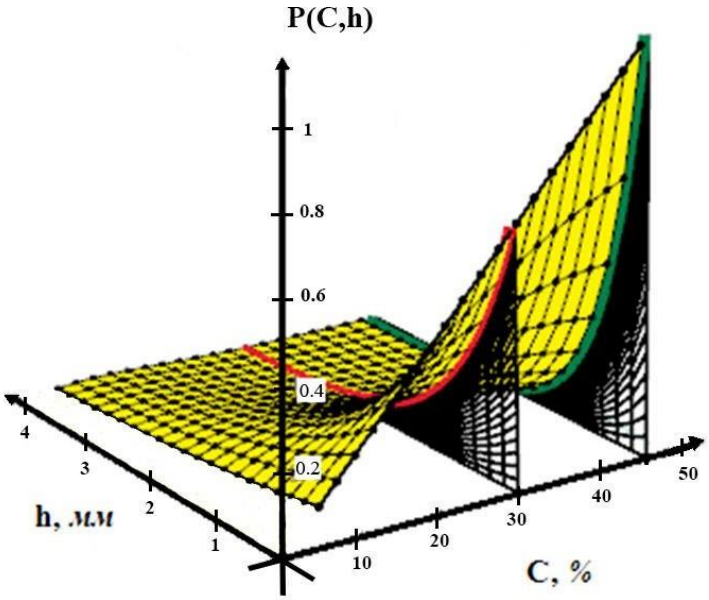


Рисунок 2.6 - Залежність відносної концентрації антипіренів $P(C,h)$ від глибини h (відстані від поверхні деревини) та процентної концентрації C просочувального розчину

Етап 4. Знаходження функціональної залежності сумарної відносної кількості антипіренів, що утримуються просоченою деревиною, в залежності від концентрації просочувального розчину за формулою:

$$M(C) = \int_0^{\infty} a(C) \cdot \exp(-b(C) \cdot h) dh = \\ = \frac{a(C)}{b(C)} \cdot \exp(-b(C) \cdot h)\Big|_0^{\infty} = \frac{a(C)}{b(C)}. \quad (2.16)$$

Етап 5. Знаходження оптимального значення концентрації антипіренів у розчині для просочування, при якому забезпечується максимальне насичення антипіренами поверхневих шарів деревини. Для цього вирішується рівняння виду:

$$\frac{d}{dC}(M(C)) = 0. \quad (2.17)$$

Підставивши значення відповідних многочленів та змінних згідно (2.14), (2.15) та (2.16) отримуємо рішення цього рівняння:

$$C_{opt} = -\frac{\sqrt{b_2 \cdot \left(b_2 \cdot a_0^2 - b_1 \cdot a_0 a_1 + b_0 a_1^2\right)} - b_2 a_0}{b_2 \cdot a_1} \qquad (2.18)$$

Розроблена методика має ряд переваг над існуючими способами оскільки дозволяє забезпечити контроль над процесами переведення деревини у важкогорючий стан, враховує властивості розчинів, що використовуються для просочування та їх концентрацію.

Методика дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині для вогнебіозахисних засобів, що використовуються при поверхневому вогнезахисті дерев'яних елементів горищних покриттів будівель та споруд на об'єктах різного призначення.

Впровадження розробленої методики дозволить створити еталонну базу даних з оцінювання необхідної кількості антипіренів, які утримуються в поверхневих шарах деревини після її просочення різними вогнезахисними речовинами [99]. Зазначені дані можуть використовуватись для контролю якості проведення вогнезахисних робіт, що суттєво вплине на підвищення ефективності вогнезахисту об'єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ.

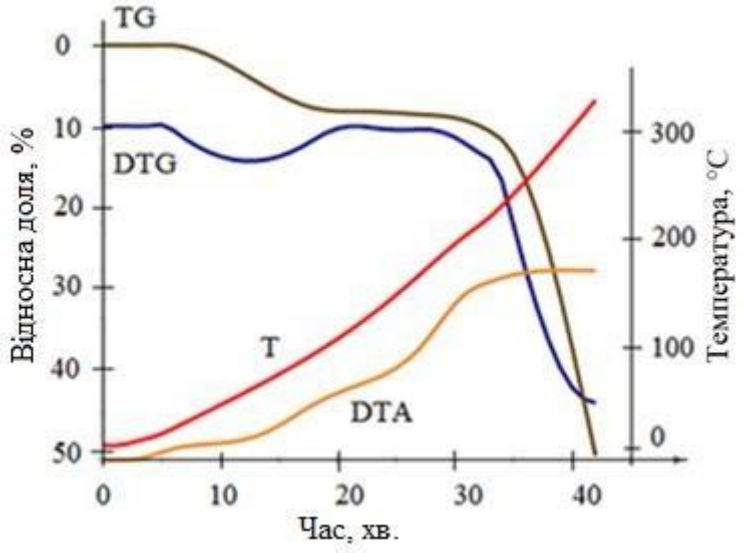
2.4 Математична модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння

Для розроблення відповідних заходів і засобів вогнезахисту потрібно мати уявлення про складний хіміко-фізичний процес розвитку пожежі та характер її дії на різні об'єкти. В загальному випадку ці процеси описуються повною системою рівнянь Навьє-Стокса [156]: рівнянням енергії (що включає в себе перенос енергії за рахунок конвективних процесів, теплопровідності, випромінювання, дифузії, хімічних реакцій горіння пожежного навантаження), рівнянням нерозривності, дифузії, стану та теплообміну. У зв'язку з

невизначеністю ряду граничних умов процесу розвитку пожежі та трудністю врахування всіх значущих факторів, в тому числі із складністю опису та врахування складової хімічних перетворень продуктів горіння, точне рішення зазначеної системи рівнянь є складнішою науковою проблемою, особливо в контексті вирішення практичних задач.

Отже постає задача математичного моделювання енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині при її нагріві до настання фази полум'яного горіння, що дасть можливість визначити вплив введення антипіренів в поверхневі шари дерев’яних будівельних конструкції на гальмування процесу займання деревини. Для цього пропонується методика, що складається з наступних етапів [273].

Етап 1. Використовуючи експериментальні дані про розвиток в часі хіміко-фізичних процесів, що відбуваються при нагріванні деревини до моменту її займання, знаходимо формули апроксимацій, що описують залежності відносних кількостей речовин, що виділяються в процесі термолізу від часу [93]. Дана ділянка термогравіграм показана рисунку 2.7.



Рисунку 2.7 – Дериватограма нагріву зразка невогнезахищеної деревини (заболонь сосни, щільність – 400-550 кг/м^3) [93]: T – крива термоаналізу, DTA – крива диференціально-термічного аналізу, TG – крива термогравіметричного аналізу, DTG - крива диференціально-гравіметричного аналізу.

Використовуючи результати вимірів виходу летких речовин [93], отримаємо формули апроксимацій залежностей накопиченої маси речовин від часу нагріву. Зважаючи на специфічний характер досліджуваних функціональних залежностей, особливістю яких є різкі скачки похідних у близько розташованих точках, видається дуже незручною апроксимація з використанням поліноміальної або іншими видами регресії. Тому обрано метод кубічної сплайн-інтерполяції, що генерує криві сплайна, які наближаються до прямої лінії в граничній точці, як метод, що має хороші апроксимаційні властивості та найточніше, для даного випадку, відбиває реальні залежності [206]. Результати апроксимації представлені на рисунку 2.8.

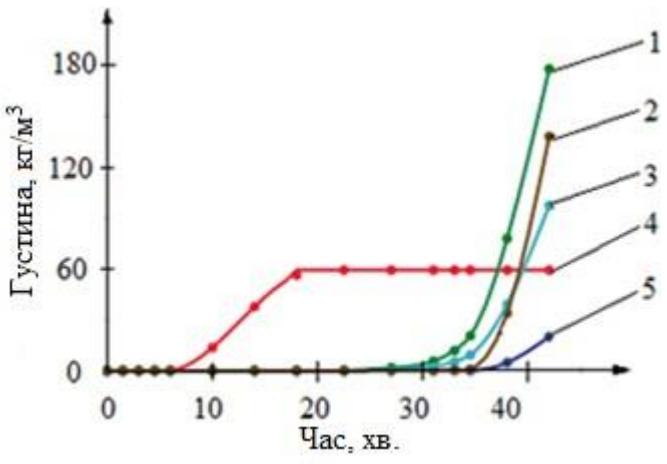


Рисунок 2.8 - Залежність накопиченої кількості речовини, що виділилася з одиничного об’єму зразка незахищеної деревини від часу нагрівання. Крива 1 – Оксид вуглецю (IV). 2 – Метан. 3 – Оксид вуглецю (II). 4 – Водяна пара. 5 – Водень.

Етап 2. Поєднавши термогравіграми (залежність втрати ваги зразка TG, що відповідає цьому моменту температурі T, див. рисунок 2.7) і результати апроксимації (див. рисунок 2.8) знаходимо залежності накопиченої маси летких речовин від температури нагріву (рисунок 2.9).

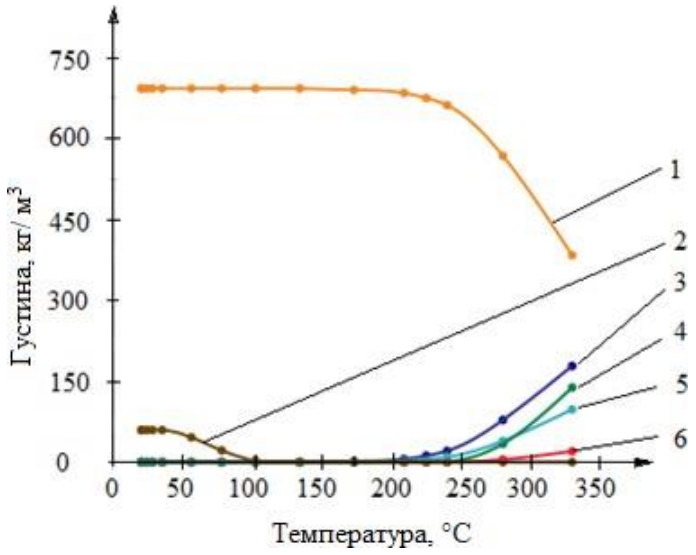


Рисунок 2.9 - Залежність накопиченої кількості речовини, що виділилася з одиничного об’єму зразка деревини, від температури. Крива 1 – Целюлоза. 2 – Водяна пара. 3 – Оксид вуглецю (IV). 4 – Метан. 5 – Оксид вуглецю (II). 6 - Водень

Етап 3. Використовуючи знайдені залежності кількостей різних речовин від температури в умовах процесу ізобаричного нагрівання, визначаємо з урахуванням ентальпії утворення кожної з цих речовин [259], залежності накопиченої питомої енергії, що виділяється при утворенні кожної речовини, яка утворюється внаслідок нагрівання зразка деревини, від температури (2.19) та загальну (2.20) виділену накопичену питому енергію згідно формул:

$$\Delta A_i(T) = \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T) \text{ , (Дж/м}^3\text{)}, \qquad (2.19)$$

де v- елементарний об’єм зразка деревини, з якого виділяються леткі речовини розкладу деревини при нагріванні, м^3

ΔH_i - ентальпія утворення i – го компоненту, Дж/моль;

mol_i – молярна маса i – го компоненту, кг/моль;

$m_i(T)$ – маса i – ої речовини, що утворилась в елементарному об’ємі зразка деревини в результаті нагрівання на інтервалі температур ($T, T+\Delta T$), кг;

T - температура процесу, К.

Тоді:

$$\sum_{i=1}^{i+k(T)} \frac{1}{v} \frac{\Delta H}{mol_i}, \text{ (Дж/м)}. \qquad (2.20)$$

де *k(T)* - максимальна кількість компонентів (залежить від температури) *T*.

Результати обчислень графічно проілюстровані на рисунку 2.10 (криві 1-3 згідно формули (2.19), крива 4 згідно формули (2.20)).

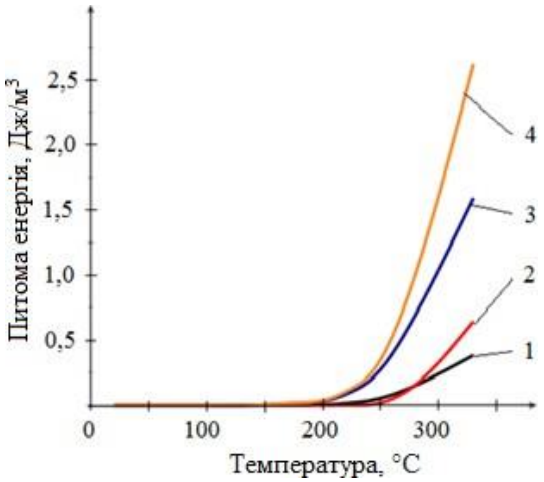


Рисунок 2.10 - Залежність накопиченої питомої енергії, що виділяється при утворенні летких компонентів розкладу деревини під час нагрівання. Крива 1 – Монооксид вуглецю. 2 – Метан. 3 – Діоксид вуглецю.4 - Сумарна величина питомої енергії.

Під час нагрівання має місце нагрівання всіх речовин розкладу деревини. Величина цієї накопиченої енергії в умовах ізобаричного нагрівання [32], обчислюється за формулами :

$$\Delta B_j(T) = \frac{1}{v} \cdot c_j \cdot m_j(T) \cdot \Delta T, \text{ (Дж/ м}^3\text{)}, \qquad (2.21)$$

де *v*- елеемнтарний об’єм зразка деревини, з якого виділяються леткі речовини розкладу деревини при нагріванні, м^3

c_i - питома теплоємність *i* – го компоненту, Дж/кг·К;

$m_i(T)$ – маса i – го компоненту (в одиниці об'єму), що існувала, або вже була утворена до температури T у елементарному об'ємі зразка деревини, кг;

T- температура процесу, К.

Тоді:

$$\Delta B(T) = \sum_{j=1}^{j=k(T)} \Delta B_j(T) \text{ , (Дж/ м}^3\text{)}, \quad (2.22)$$

де $k(T)$ - загальна кількість компонентів (залежить від температури) T.

Результати обчислень графічно проілюстровані на рисунку 2.11 (криві 1-6 згідно формули (2.21), крива 7 згідно формули (2.22)).

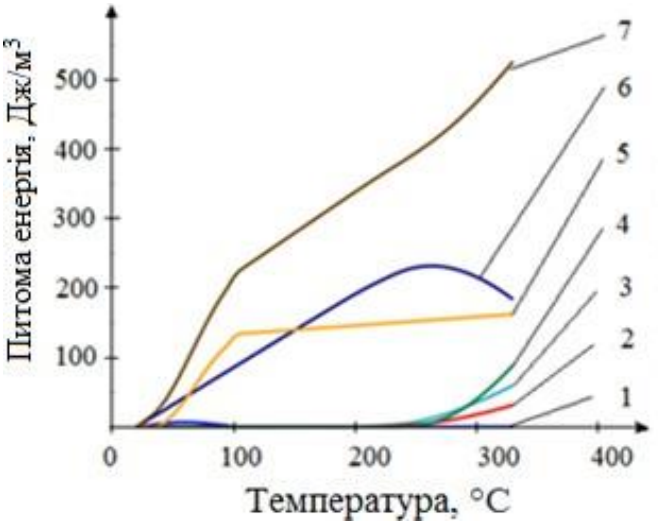


Рисунок 2.11 - Залежність накопиченої питомої енергії, що поглинається при утворенні летких компонентів розкладу деревини під час нагрівання. Крива 1 – Вода. 2 – Монооксид вуглецю. 3 – Діоксид вуглецю. 4 – Водень. 5 – Водяна пара. 6 – Целюлоза. 7 – Сумарна питома енергія усіх речовин.

Етап 4. В подальшому визначається накопичена питома енергія усіх компонентів та їх перетворень, з урахуванням поглинання та виділення енергії, що має місце при нагріванні зразка деревини, від температури. Обчислення ведеться за формулою:

$$\Delta E_w(T) = -\Delta A(T) + \Delta B(T) =$$
$$= -\sum_{i=1}^{i=k(T)} \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T) + \sum_{j=1}^{j=n(T)} \frac{1}{v} \cdot c_j \cdot m_j(T) \cdot \Delta T \text{, (Дж/м}^3\text{).} \quad (2.23)$$

де: $m_i(T)$ – маса i –ої речовини (на одиницю маси), що утворилась в результаті нагрівання на інтервалі температур ($T, T+\Delta T$) в елементарному об'ємі зразка деревини, кг;

$m_j(T)$ – маса j – ої речовини (на одиницю маси), що існувала, або вже була утворена до температури T в елементарному об'ємі зразка деревини, К.

Графічно ця залежність має вигляд кривої 1 на рис. 2.12. Введемо поняття ефективної (або сумарної) питомої теплоємності процесу перетворень зразка деревини (в температурних межах даного дослідження), з урахуванням усіх разом узятих компонентів та їх структурних перетворень, що мають місце при нагріванні. Ця величина, з достатньою для даної поставленої задачі точністю, є аналогом питомої теплоємності досліджуваного матеріалу (зразка деревини). Вона враховує виділення та поглинання енергії зразка деревини при відповідних температурах процесу. Визначаємо ефективну теплоємність процесу як похідну від $E_w(T)$:

$$c_{p\_wood}(T) = \frac{d}{dT} E_w(T) \text{, (Дж/К·м}^3\text{),} \quad (2.24)$$

де $E_w(T)$ - накопичена питома енергія, згідно формули (2.23),

T - температура процесу.

Поведінка цієї функції проілюстрована на рисунок 2.12 (крива 2).

Етап 5. Знаходимо математичний опис енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що мають місце у зразку деревини при його нагріванні до настання фази полум'яного горіння. Для цього вирішується одновимірна задача поширення тепла в твердому тілі, що має змінну, залежну від температури ефективну теплоємність, яку ми знайшли згідно з формулою (2.24), що проілюстрованою на рисунку 2.12 (крива 2).

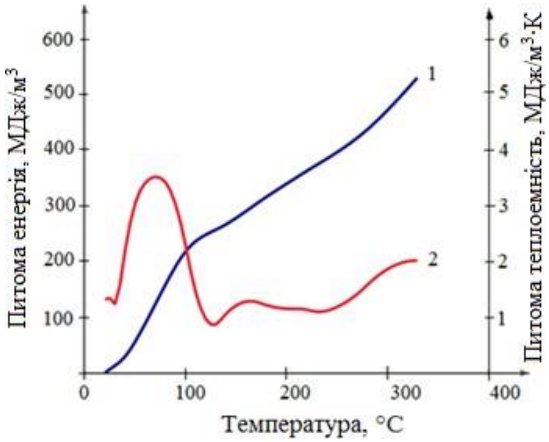


Рисунок 2.12 - Залежність питомих енергетичних характеристик процесу нагрівання зразка деревини від температури. Криві: 1- залежність сумарної накопиченої поглинутої питомої енергії від температури; 2 – залежність ефективної теплоємності усіх компонентів та їх перетворень, що мають місце при нагріванні зразка деревини, від температури.

Рівняння теплопровідності, згідно [18], для нашого випадку буде мати вигляд:

$$c_{p\_wood}(x,T(x,t))\cdot\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}=\chi(T)\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}\,, \qquad (2.25)$$

де $c_{p\_wood}(x,T(x,t))$ - ефективна питома (на об'ємну одиницю) теплоємність зразка деревини, згідно (2.24), Дж/К·м^3;

T(x,t) – поточна температура процесу, К;

$\chi(T)$ - коефіцієнт теплопровідності деревини, Вт/м·К [256].

Для випадку, коли волокна деревини орієнтовані поперек тепловому потоку (та вздовж поверхні деревини), коефіцієнт теплопровідності визначається:

$$\chi_{ac}(T)=\left(\chi_{n\_ac}+\frac{\chi_{b\_ac}}{T_b-T_n}\cdot(T-T_n)\right)\cdot H(T_b-T)+\chi_{d\_ac}\cdot H(T-T_b)\,, \text{(Вт/м·К)}, \qquad (2.26)$$

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°С);

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

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:

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

де h - зовнішній потік тепла (Вт/м^2), b – товщина зразка (м).

Враховуючи вигляд функції $c_{p\_wood}(T)$, ефективної теплоємності деревини (див. рисунок 2.12, крива 2), для вирішення поставленої задачі використовуємо метод наближеної чисельної ітерації по схемі кінцевих різниць першого порядку, згідно [149]. Розрахунок ведеться у двовимірному просторі дискретних координат часу з індексом i та лінійної просторової координати з індексом j. Критерієм достовірності розрахункових результатів вважається відносна помилка при порівнянні двох результатів обчислень при зменшенні елементарного прирощення часу та лінійної координати. Діаграма ітераційних формул представлена на рисунку 2.13.

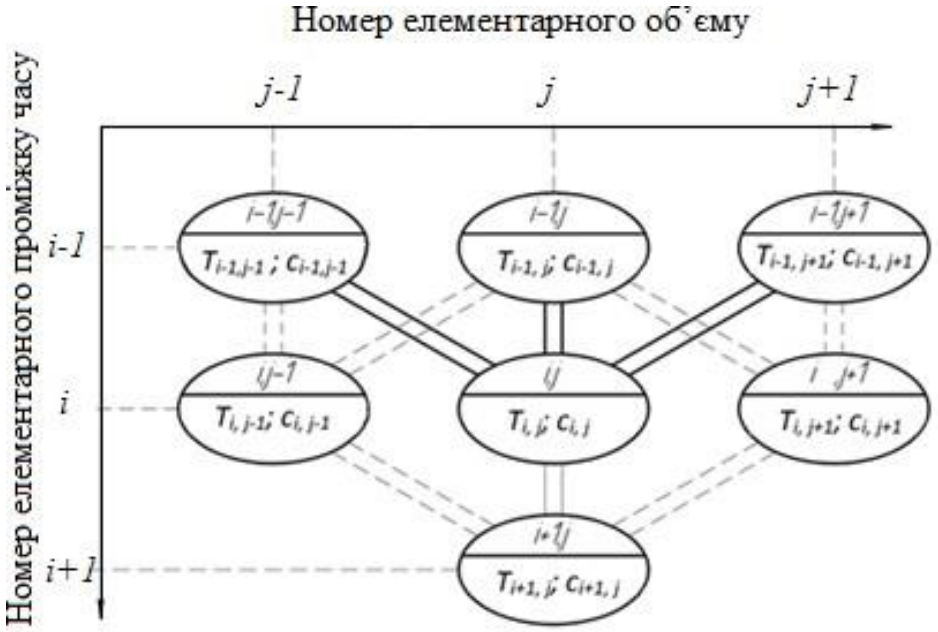


Рисунок 2.13 - Діаграма розрахунку по ітераційним формулам

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:

$$T_{i,1} = T_{i-1,1} + \omega \cdot \Delta t - \frac{\chi \cdot (T_{i-1,1} - T_{i-1,2})}{c_{p\_wood}(T_{i-1,1}) \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta t \qquad (2.27)$$

де ω – енергетична характеристика теплового опромінення елементарного об’єму, що обчислюється за формулою:

$$\omega = \frac{\square h}{c_{p\_wood}(T_{i-1,1}) \cdot \Delta x}, \text{ К/с} \qquad (2.28)$$

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

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + \frac{\chi \cdot \left(T_{i-1,j-1} - 2 \cdot T_{i-1,j} + T_{i-1,j+1}\right)}{c_{p\_wood}(T_{i-1,j}) \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta t \qquad (2.29)$$

В якості ілюстрацію цієї моделі на рисунку 2.14 наводяться ключові залежності, отримані за допомогою розробленої математичної моделі. На рисунку показані два сімейства кривих.

На рисунку 2.14 представлені залежності виходячи з того, що температура займання невогнезахищеної деревини дорівнює приблизно 235 ^{0}C (дані отримані експериментально за методикою стандарту [52]).

Алгоритм моделі дозволяє визначити проміжок часу до досягнення встановленої температури займання. Таким чином, математична модель дозволяє оцінити ресурс часу для ліквідації осередку займання пожежного навантаження із незахищеної деревини.

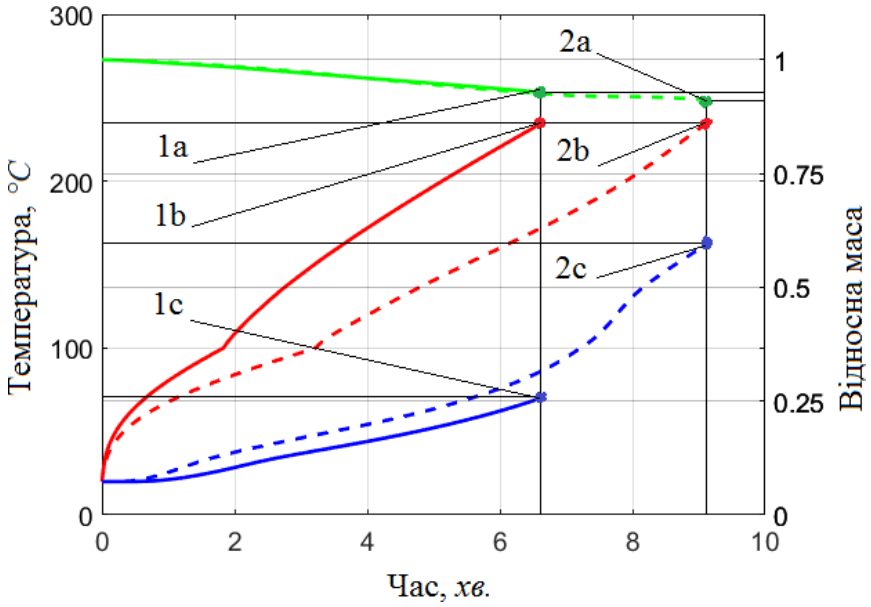


Рисунок 2.14 - Результати обчислень основних характеристик процесів, що мають місце при нагріванні зразка невогнезахищеної деревини (заболонь сосни товщиною 10 мм) до моменту займання за інтенсивності опромінення в 40 кВт/м^2:

- Сімейство кривих 1 для випадку опромінення поперек волокон. Крива 1a - залежність твердої відносної маси зразка від часу, крива 1b - залежність температури зовнішньої поверхні зразка, яка опромінюється, крива 1c- температура задньої поверхні зразка, яка не перебуває під дією теплового опромінення.
- Сімейство кривих 2 для випадку опромінення вздовж волокон. Крива 2a - залежність твердої відносної маси зразка від часу, крива 2b - залежність температури зовнішньої поверхні зразка, яка опромінюється, крива 2c- температура задньої поверхні зразка, яка не перебуває під дією теплового опромінення

2.5 Математична модель охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого водною вогнебіозахисною речовиною

Як зазначалось вище, використання ВВБЗР дає можливість ефективно реалізовувати охолоджуючий, інгібуючий, флегматизуючий та ізолюючий ефекти для руйнування класичного трикутника горіння. При цьому кількісний

вклад зазначених ефектів буде залежати від компонентного складу ВВБЗР, технології їх використання, характеристик пожежного навантаження, об'єкта тощо.

Однак на етапах розроблення складів ВВБЗР корисним є визначення охолоджувального ефекту від введення антипіренів в поверхневі шари дерев'яних будівельних конструкцій. Для цього пропонується методика, що складається з наступних етапів [262].

Етап 1. Визначення розподілу маси антипіренів в результаті просочення поверхневих шарів деревини.

Розподіл маси антипіренів в залежності від глибини від поверхні зразка дерева приймається згідно [263] у вигляді емпіричної залежності щільності антипіренів від глибини:

$$\gamma_{fr}(x) = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot x), \text{ кг/м}^3, \tag{2.30}$$

де x - відстань від поверхні дерева до точки, що розглядається, м,

k_1, k_2 - коефіцієнти, (кг/м^3), (1/м).

При розробці математичної моделі будуть використані чисельні методи, тому зразок деревини буде розбитий на дискретні елементи Δx в глибину зразка. Тоді, визначаємо відносну елементарну щільність антипіренів, що знаходяться на глибині x:

$$\Delta m_{FR}(x, \Delta x) = \frac{\int_{x}^{x+\Delta x} \gamma_{fr}(x) \cdot dx}{\gamma \cdot \Delta x}, . \tag{2.31}$$

де γ – питома щільність використаної суміші антипіренів, кг/м^3.

Етап 2. Визначення енергетики перетворень компонентів вогнезахисного засобу при нагріванні.

При нагріванні з кожним з компонентів відбувається ряд послідовних перетворень [272], ряд стадій розпаду. Для прикладу розглянемо модель енергетики перетворень в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого антипіренами згідно положень [248], до моменту займання. При створенні даної математичної моделі враховується енергетика тільки двох компонентів, що

входять до складу вогнезахисного просочувального засобу, а саме, компонент №1 - діамонійфосфат і компонент №2 - сульфат амонію.

Для отримання якомога об’єктивної числової оцінки протипожежної дії антипіренів загальні принципи отримання математичних рівнянь, що описують залежність ефективної питомої теплоємності вогнезахисного просочення на основі діамонійфосфату та сульфату амонія від температури повністю співпадають з принципами створення моделі енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, що відбуваються в деревині (без проведення просочення її антпипіренами) при її нагріві до настання фази полум'яного горіння.

Загальна формула сумарної накопиченої енергії (на об’ємну одиницю) для кожного компоненту (діамонійфосфату та сульфату амонія):

$$\Delta E_{fr}(T) = -\sum_{i=1}^{k(T)} \frac{1}{v} \cdot \frac{\Delta H_i}{mol_i} \cdot m_i(T) + \sum_{j=1}^{n(T)} \frac{1}{v} \cdot c_j \cdot m_j(T) \cdot \Delta T \text{ , (Дж/м}^3\text{).} \qquad (2.32)$$

де: $m_i(T)$ – маса i –ої речовини в елементарному об’ємі зразка деревини, що утворилась в результаті нагрівання антипірену на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$, кг;

$m_j(T)$ – маса j – ої речовини компоненту, що існувала, або вже була утворена до температури T в елементарному об’ємі зразка деревини, К.

v- елементарний об’єм зразка деревини, з якого виділяються леткі речовини розкладу деревини при нагріванні, м^3

ΔH_i - ентальпія утворення i – го компоненту, Дж/моль;

mol_i – молекулярна маса i – го компоненту, кг/моль;

c_j – питома теплоємність речовини, що існувала, або вже була утворена до температури T, Дж/кг·К;

$k(T)$ – кількість речовин, що утворилась в результаті нагрівання на інтервалі температур $(T, T+\Delta T)$;

$n(T)$ – кількість речовин, що існувала, або вже була утворена до температури T.

Для знаходження питомих енергетичних характеристик та їх залежності від температури (на температурному інтервалі від початкової до температури займання) на протязі усіх перетворень певного компоненту розбиваємо увесь процес нагрівання зразка (від початкової температури до температури займання) на три стадії. Кількість стадій та температурні межі кожної стадії обрані таким чином, щоб у кожному інтервалі температур мало місце тільки одне хімічне перетворення, що має свої енергетичні характеристики. Для діамонійфосфату це такі інтервали: №1 T = 20℃ … 110℃, №2 T = 110℃ … 284℃, №3 T = 284℃ … 420℃.

Кожна стадія проходить через три послідовні інтервали температур:

- перший інтервал, під час якого має місце нагрівання зразку до початку хімічних перетворень (під дією температури з утворенням нових хімічних речовин),
- другий інтервал, під час якого проходить хімічне перетворення (під дією температури з утворенням нових хімічних речовин), та на протязі якого для спрощення вважається, що повна реалізація теплового ефекту цієї реакції (згідно закону Гесса) відповідає лінійному закону на інтервалі від температури початку перетворення до температури його закінчення.
- третій інтервал, під час якого має місце продовження нагрівання зразку без змін його хімічного складу та фізичного стану, до температури початку наступної стадії розвитку загального процесу перетворення компоненту.

Енергетика перетворень компоненту №1(діамонійфосфату)

На першій стадії перетворення компоненту №1(від 70℃ до 110℃) має місце реакція термічного розкладу:

$$(NH_4)_2HPO_4 = NH_3+NH_4H_2PO_4\ . \qquad (2.33)$$

Тепловий коефіцієнт реакції:

$$\Delta H_1 = \Delta H_{NH3} + \Delta H_{NH4H2PO4} - \Delta H_{NH4HPO4} = 75{,}64\cdot10^3 \text{ Дж/моль}, \qquad (2.34)$$

де: ΔH_{NH3}, $\Delta H_{NH4H2PO4}$, $\Delta H_{NH4HPO4}$ – ентальпії утворення, відповідно, аміаку, діамонийфосфату та моноамонійфосфату [285].

Тоді, вважаючи, що залежність поглинання енергії на інтервалі температур (від 70℃ до 110℃) має лінійний характер, рівняння поглинання питомої енергії для даної стадії матиме вигляд :

$$E_{dp\_1\ c}(T) = \frac{\Delta m_{dp}(x)}{\mu_{NH42HPO4}} \cdot \left\{ \left[c_{p\_NH42HPO4} \cdot (T_c - T_1) + \Delta H_1 \right] \cdot \left[\frac{T_c - 70°C}{110°C - 70°C} \cdot H(T_c - 70°C) \cdot H(110°C - T_c) + H(T_c - 110°C) \right] \right\}, \quad (2.35)$$

Дж/м^3

де $c_{p\_NH42HPO4}$ - питома теплоємність діамонійфосфату [152], Дж/кг·К,

$\mu_{NH42HPO4}$ - молекулярна маса діамонійфосфату [285], кг/моль,

$\Delta m_{dp}(x) = p_{dp} \cdot \Delta m_{FR}(x)$ - елементарна щільність діамонійфосфату на глибині *x,* див. ф. (2.31), кг/м^3,

p_{dp} - відносна доля діамонійфосфата в складі антипірену [248],

T_c - поточна температура процесу, ℃,

T_1 - початкова температура процесу, ℃,

ΔH_1 - ентальпія по 1 стадії, (Дж/моль),

H(T) - функція Хевісайда [149].

Тут і надалі розрахунки проводились за припущення, що теплоємність та тепловий ефект визначеного етапу розкладання є константами.

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.15.

Одночасно з процесом поглинання енергії, відбувається вихід леткої речовини (аміаку) згідно рівняння хімічної реакції (2.33). Цей процес можна описати рівнянням для відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення:

$$m_{dp\_1}(T_c)=\left[1-\frac{\mu_{NH3}}{\mu_{NH42HPO4}}\cdot\frac{T_c-70°C}{110°C-70°C}\cdot H(T_c-70°C)\right]\cdot H(110°C-T_c)+$$
$$+\left(1-\frac{\mu_{NH3}}{\mu_{NH42HPO4}}\right)\cdot H(T_c-110°C). \quad (2.36)$$

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.16.

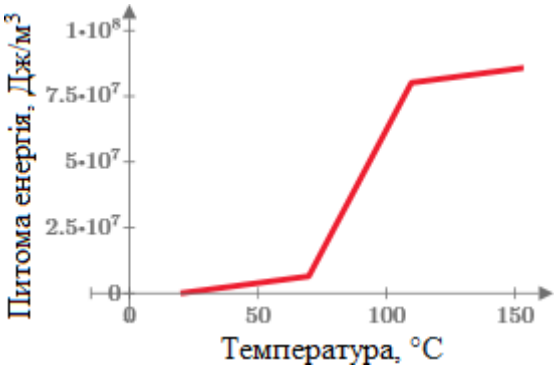


Рисунок 2.15 - Залежність питомої енергії поглинання від температури на стадії 1.

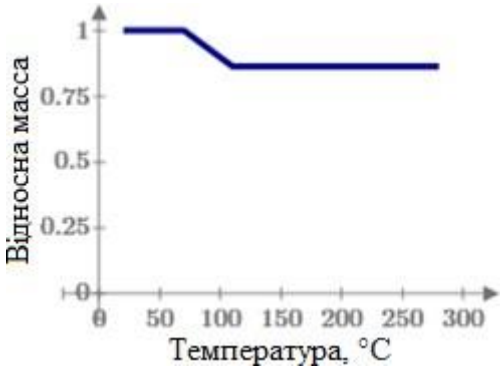


Рисунок 2.16 - Залежність відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення від температури на стадії 1.

На другій стадії перетворень компонента №1 (від 110 ℃ до 284 ℃) має місце реакція термічного розкладання моноаммонійфосфату:

$$NH_4H_2PO_4 = NH_3+H_3PO_4, \quad (2.37)$$

тепловий ефект реакції:

$$\Delta H_2 = \Delta H_{NH3} + \Delta H_{H3PO4} - \Delta H_{NH4HPO4} = 110{,}87\cdot10^3 \text{ Дж/моль}, \quad (2.38)$$

де: ΔH_{NH3}, ΔH_{H3PO4}, $\Delta H_{NH4HPO4}$ – ентальпії утворення, відповідно, аміаку, ортофосфорної кислоти та моноамонійфосфату [285].

Тоді, припустивши лінійну залежність поглинання енергії на інтервалі температур проходження реакції (2.37) (від 110℃ до 192℃), рівняння поглинання питомої енергії від початку першої стадії до кінця другої стадії (з урахуванням першої) матиме вигляд:

$$E_{dp\_1\_2}(T_c) = E_{dp\_1}(T_c) + \\ + \frac{\Delta m_{dp}(h)}{\mu_{NH\,42HPO4}} \cdot \Delta H_2 \cdot \left[\frac{T_c - 110°C}{192°C - 110°C} \cdot H(T_c - 110°C) \cdot H(192°C - T_c) + H(T_c - 192°C) \right], \quad (2.39)$$

Дж/м^3

де, $E_{dp\_1}(T_c)$ - поглинання питимої енергії для 1-ї стадії,

ΔH_2 - ентальпія реакції по 2-й стадії (ф.(2.38)).

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.17.

Одночасно з процесом поглинання енергії, відбувається вихід леткої речовини (аміаку) відповідно до рівняння хімічної реакції (2.37). Цей процес можна описати рівнянням для відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення:

$$m_{dp\_1\_2}(T_c) = m_{dp\_1}(T_c) \cdot \left[1 - \frac{\mu_{NH3}}{\mu_{NH\,42HPO4}} \cdot \frac{T_c - 120°C}{192°C - 120°C} \cdot H(T_c - 120°C) \right] \cdot H(192°C - T_c) + \\ + \left(1 - \frac{\mu_{NH3}}{\mu_{NH\,42HPO\,4}} \right) \cdot H(T_c - 192°C), \quad (2.40)$$

де $m_{dp\_1}(T_c)$ - відносна маса залишку компонента №1 вогнезахисного просочення. Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.18.

На третій стадії перетворень компонента №1 (від 284 ℃ до 420 ℃) має місце реакція термічного розкладання ортофосфорної кислоти в два етапи [287]:

$$H_3PO_4 = 1/2H_2O + 1/2H_4P_2O_7, \quad (2.41)$$

та

$$1/2H_4P_2O_7 = H_2O + 1/2P_2O_5, \quad (2.42)$$

котрі можна об’єднати в один:

$$H_3PO_4 = 3/2H_2O + 1/2P_2O_5. \quad (2.43)$$

Тепловий ефект реакції:

$$\Delta H_3 = 3/2 \cdot \Delta H_{H2O} + 1/2 \cdot \Delta H_{P2O5} - \Delta H_{H3PO4} = 280{,}02 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}, \quad (2.44)$$

де: ΔH_{H2O}, ΔH_{H3PO4}, ΔH_{P2O5} – ентальпії утворення, відповідно, води, ортофосфорної кислоти та пентаоксиду фосфору [285].

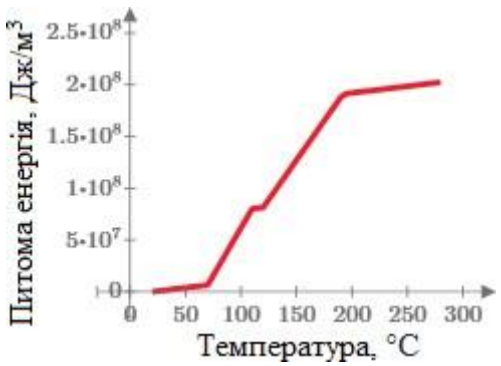


Рисунок 2.17- Залежність питомої енергії поглинання від температури в стадії 1-2.

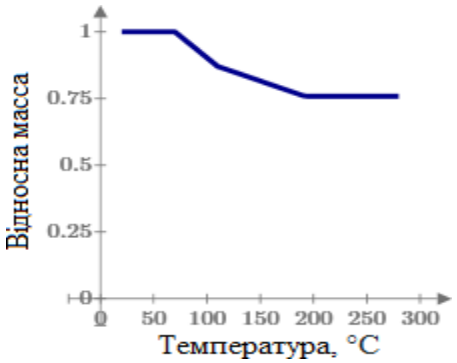


Рисунок 2.18 - Залежність відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення в стадії 1-2 від температури.

Тоді, припустивши лінійну залежність поглинання енергії на розглянутому інтервалі температур (від 284℃ до 420℃), рівняння поглинання питомої енергії від початку першої стадії до кінця третьої стадії (з урахуванням першої та другої) матиме вигляд:

$$E_{dp}(T_c) = E_{dp\_1\_2}(T_c) + \frac{\Delta m_{dp}(h)}{\mu_{NH4)2HPO4}} \cdot \Delta H_3 \cdot \left[\frac{T_c - 284°C}{420°C - 284°C} \cdot H(T_c - 284°C) \cdot H(420°C - T_c) + H(T_c - 420°C) \right], \text{ Дж/м}^3 \quad (2.45)$$

де, $E_{dp\_1\_2}(T_c)$ - поглинання питомої енергії від початку 1-ї стадії до кінця2-ї,

ΔH_3 - ентальпія реакції по 3-й стадії (ф.(2.44)).

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.19.

Одночасно з процесом поглинання енергії, відбувається вихід леткої речовини (пари аміаку) відповідно до рівняння хімічної реакції (2.43). Цей процес можна описати рівнянням для відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення:

$$m_{dp}(T_c) = m_{dp\_1\_2}(T_c) \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \mu_{H2O}}{\mu_{NH42HPO4}} \cdot \frac{T_c - 284°C}{420°C - 284°C} \cdot H(T_c - 284°C)\right] \cdot H(420°C - T_c) + \left(1 - \frac{2 \cdot \mu_{H2O}}{\mu_{NH42HPO4}}\right) \cdot H(T_c - 420°C), \quad (2.46)$$

де $m_{dp\_1\_2}(T_c)$ - відносна маса залишку компонента №1 вогнезахисного просочення.

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.20.

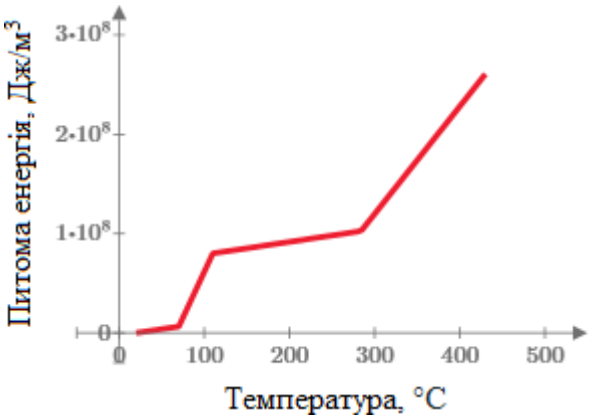


Рисунок 2.19 - Залежність питомої енергії поглинання від температури в стадії 1-2-3.

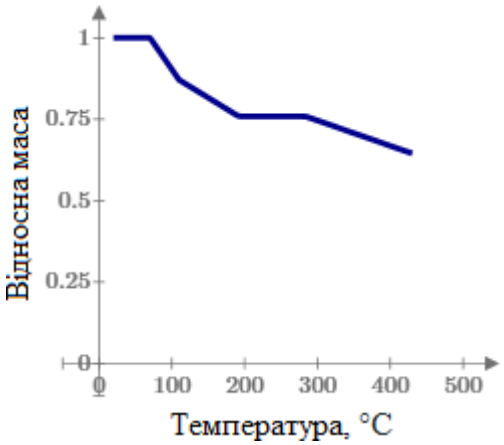


Рисунок 2.20 - Залежність відносної маси залишку компонента №1 вогнезахисного просочення від температури в стадії 1-2-3.

Енергетика перетворень компоненту №2 (сульфата амонію)

При температурних перетвореннях компонента №2 має місце реакція термічного розкладання сульфату амонію в два етапи [272]:

$$(NH_4)_2SO_4 = NH_3 + NH_4HSO_4, \text{ (від 147℃ до 218℃)} \quad (2.47)$$

та

$$NH_4HSO_4 = NH_3 + H_2SO_4, \text{ (від 218℃ до 357℃)}, \quad (2.48)$$

котрі можна об’єднати в один:

$$(NH_4)_2SO_4 = 2NH_3 + H_2SO_4. \quad (2.49)$$

Тепловий ефект реакції:

$$\Delta H = 2 \cdot \Delta H_{NH3} + \Delta H_{H2SO4} - \Delta H_{NH42SO4} = 273{,}6 \cdot 10^3 \text{Дж/моль}, \quad (2.50)$$

де: ΔH_{NH3}, ΔH_{H2SO4}, $\Delta H_{NH42SO4}$ – ентальпії утворення, відповідно, аміаку, сірчаної кислоти та сульфату амонію [285].

Тоді, припустивши лінійну залежність поглинання енергії на розглянутому інтервалі температур (від 147 °С до 357 °С), рівняння поглинання питомої енергії матиме вигляд:

$$E_{ds}(T_c) = \frac{c_{p\_NH42SO4}}{\mu_{NH42SO4}} \cdot \Delta m_{ds}(x) \cdot (T_c - T_1) + \frac{\Delta m_{ds}(x)}{\mu_{NH42SO4}} \cdot \Delta H \cdot \left[\frac{T_c - 147°C}{357°C - 147°C} \cdot H(T_c - 357°C) \cdot H(357°C - T_c) + H(T_c - 357°C) \right], \quad (2.51)$$

Дж/м^3,

де $c_{p\_NH42SO4}$ - питома теплоємність сульфата амонія [152], Дж/кг·К,

$\mu_{NH42SO4}$ - молекулярна маса сульфата амонію [285], кг/моль,

$\Delta m_{ds}(x) = p_{ds} \cdot \Delta m_{FR}(x)$ - елементарна щільність сульфата амонію на глибині x, див. ф.(2.31), кг/м^3,

p_{ds} - відносна доля сульфата амонію в складі антипірена, [248],

T_c - поточна температура процесу, °С,

T_1 - початкова температура процесу, °С,

ΔH - ентальпія реакції (ф. (2.50)),

$H(T)$ - функція Хевісайда, [149].

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.21.

Одночасно з процесом поглинання енергії, відбувається вихід леткої речовини (аміаку) відповідно до рівняння хімічної реакції (2.49). Цей процес можна описати рівнянням для відносної маси залишку компонента №2 вогнезахисного просочення:

$$m_{ds}(T_c) = m_{ds\_1\_2}(T_c) \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot \mu_{H2O}}{\mu_{NH42SO4}} \cdot \frac{T_c - 284°C}{420°C - 284°C} \cdot H(T_c - 284°C) \right] \cdot H(420°C - T_c) + \left(1 - \frac{2 \cdot \mu_{H2O}}{\mu_{NH42SO4}} \right) \cdot H(T_c - 420°C), \quad (2.52)$$

де $m_{ds\_1\_2}(T_c)$ - відносна маса залишку компонента №2 вогнезахисного просочення.

Отримана залежність проілюстрована на рисунку 2.22.

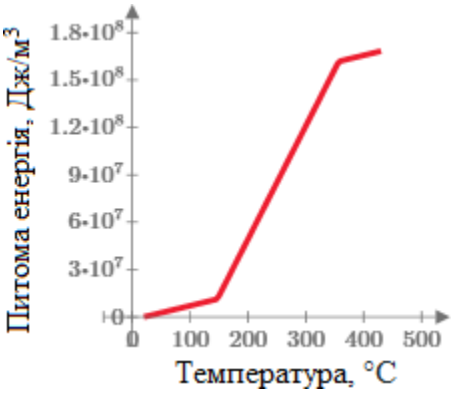


Рисунок 2.21 - Залежність питомої енергії поглинання компонента №2 від температури.

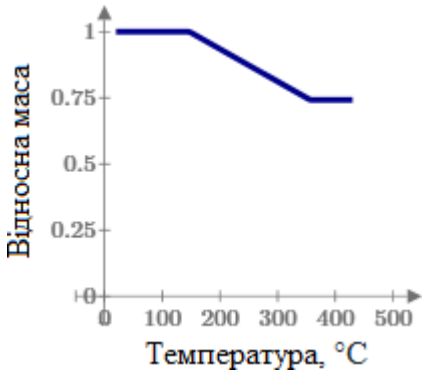


Рисунок 2.22 - Залежність відносної маси залишку компонента №2 вогнезахисного просочення від температури.

Енергетика перетворень компонентів №1 і №2 спільно

Величина питомої енергії поглинання вогнезахисного просочення визначається як сума питомої енергії поглинання обох компонентів:

$$E_{fr}(T_c) = E_{dp}(T_c) + E_{ds}(T_c). \quad (2.53)$$

Етап 3. Визначення ефективної питомої теплоємності.

Для подальших розрахунків зручно використати поняття ефективної питомої теплоємності, яке введене в п. 2.4 ([273]), яка для запропонованого прикладу буде виражатися такою формулою:

$$c_{p\_fr}(x,T) = \rho_{fr}(x) \cdot \frac{d}{dT} E_{fr}(T), \text{ Дж/м}^3\cdot\text{К} \quad (2.54)$$

де $\rho_{fr}(x)$ - відносна щільність розподілу вогнезахисного просочення в глибину зразка, безрозмірна величина (нормована від ф. 2.30);

$E_{fr}(T)$ - величина питомої (на одиницю об'єму) енергії поглинання вогнезахисного просочення, Дж/м^3.

Вид отриманої залежності ефективної питомої теплоємності від температури для випадку максимальної щільності антипіренів в поверхневому шарі зразка деревини, апроксимований методом кубічної сплайн-інтерполяції, показаний на рисунку 2.23.

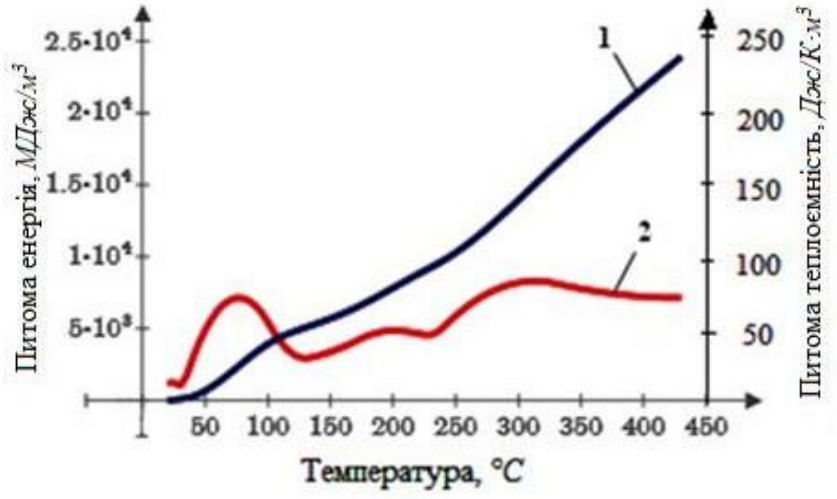


Рис. 2.23 - Залежність питомих енергетичних характеристик процесу нагрівання вогнезахисного просочення на основі діамонійфосфату та сульфату амонія від температури. Криві: 1- залежність сумарної накопиченої поглинутої питомої енергії від температури; 2 – залежність ефективної теплоємності усіх компонентів та їх перетворень, що мають місце при нагріванні, від температури

Етап 4. Математичне моделювання термічних перетворень зразка деревини, обробленого вогнезахисним просоченням.

Для математичного опису енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, які відбуваються в просоченому антипіренами зразку деревини при його нагріванні до настання фази полум'яного горіння, доцільно скористатися вирішенням одновимірної задачі поширення тепла в ізотропному твердому тілі, що має змінну, яка залежить від температури ефективну питому теплоємність непросоченого зразка деревини, а також визначенням ефективної питомої теплоємності антипіренів, розподілених в просоченому зразку деревини, що залежить від температури і глибини залягання (згідно з формулою (2.54)).

Рівняння теплопровідності (згідно [18]) для нашого випадку буде мати вигляд:

$$\left\{c_{p\_wood}\left[x,T(x,t)\right]+c_{p\_fr}\left[x,T(x,t)\right]\right\}\cdot\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}=\chi(T)\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2}, \qquad (2.55)$$

де $c_{p\_wood}(x,T(x,t))$ - ефективна питома (на одиницю об'єму) теплоємність зразка деревини (згідно [273]), Дж/м^3·К,

$c_{p\_fr}(x,T(x,t))$ - ефективна питома (на одиницю об'єму) теплоємність зразка деревини, просоченого антипіренами (згідно (2.53)), Дж/м^3 К,

$T(x)$ - температура на глибині *x*, просоченого антипіренами зразка деревини, ℃,

$\chi(T)$ - теплопровідність зразка деревини, Вт/м·К,

t - поточний час, с.

Початкові та граничні умови для нашого випадку:

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

де *h* - зовнішній потік тепла (Вт/м^2), *b* – товщина зразка (м).

Враховуючи поведінку функцій $c_{p\_wood}(T(x,t))$ (ефективної теплоємності деревини) та $c_{p\_fr}(x,T(x,t))$ (ефективної питимої теплоємності вогнезахисного просочення (див. рисунок 2.23, ф. (2.53)), для вирішення задачі застосуємо метод наближеної чисельної ітерації за схемою кінцевих різниць першого порядку згідно [149]. Розрахунок ведеться в двомірному просторі дискретних координат часу з індексом *i* і лінійної просторової координати з індексом *j*. Критерієм достовірності розрахункових результатів вважається відносна похибка при порівнянні двох результатів розрахунків при зменшенні елементарного приросту часу і лінійної координати. Діаграма ітераційних формул наведена на рисунку 2.24. У вузлах діаграми, кожний з яких являє собою визначений елементарний об'єм *j* зразка деревини, що взято у визначений момент часу *i*. Вказані наступні параметри елементарного об'єму: *i,*

j – номер вузла; $T_{i,j}$ – температура j – об’єму в i – інтервал часу, ρ_j – щільність вогнезахисного просочення в j – об’ємі, $c^{w}_{i,j}$– ефективна питома теплоємність деревини j – об’єму в i – інтервал часу, $c^{fr}_{i,j}$ - ефективна питома теплоємність вогнезахисного просочення j – об’єму в i – інтервал часу.

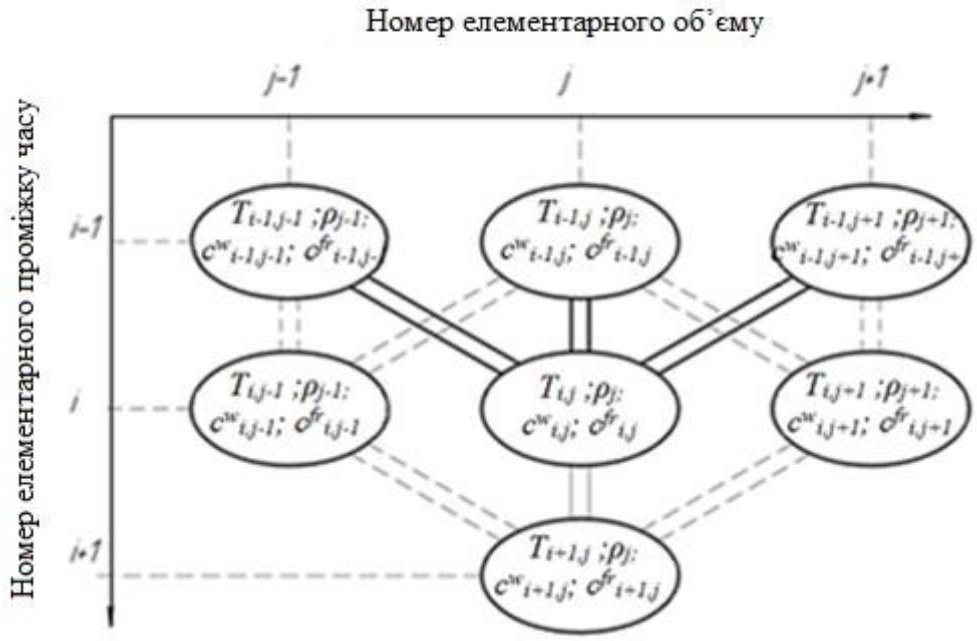


Рис. 2.24 - Діаграма розрахунку по ітераційним формулам

Таким чином, згідно з прийнятим алгоритму розрахунку, отримуємо такі формули для елементарного об'єму, розміщеного безпосередньо на поверхні зразка деревини (j = 1), обробленого вогнезахисним просоченням:

$$T_{i,1} = T_{i-1,1} + \frac{h \cdot \Delta t - \chi \cdot (T_{i-1,1} - T_{i-1,2}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x}}{c_{p\_wood}(T_{i-1,1}) \cdot \Delta x + \Delta m_{FR}(x = 0, \Delta x) \cdot c_{p\_fr}\left(x = 0, T_{i-1,1}\right) \cdot \Delta x}, \qquad (2.56)$$

де h - зовнішній потік тепла (Вт/м^2),

χ - теплопровідність зразка деревини, Вт/м·К,

Δt, - елементарні прирощення по часовій координаті, с;

Δx - елементарні прирощення по просторовій координаті, м;

$c_{p\_wood}(T)$ - ефективна питома (на одиницю об’єму) теплоємкість деревини, Дж/м^3·К.

$\Delta m_{FR}(x,\Delta x)$ - відносна щільність антипіренів, що знаходяться на глибині *x* для елементу просторової координати *Δx,* див. формулу (2.31), безрозмірна величина.

$c_{p\_fr}(x,T)$ - ефективна питома (на одиницю об'єму) теплоємність вогнезахисного просочення (ф.(2.54)), Дж/м^3·К.

Для проміжних значень температури елементарних об'ємів, які розміщені всередині масиву матеріалу:

$$T_{i,j} = T_{i-1,j} + \frac{\chi \cdot \left(T_{i-1,j-1} - 2 \cdot T_{i-1,j} + T_{i-1,j+1}\right) \cdot \Delta t}{c_{p\_wood}(T_{i-1,j}) \cdot \Delta x + \Delta m_{FR}(x_j, \Delta x) \cdot c_{p\_fr}\left(x_j, T_{i-1,j}\right)) \cdot \Delta x^2} \quad (2.57)$$

Прийняті позначення - див. позначення до формули (2.56)).

Для зворотного боку зразка деревини, який не нагрівається зовнішнім джерелом тепла:

$$T_{i,j\_\lim} = T_{i-1,j\_\lim} + \frac{\chi \cdot \left(\frac{T_{i-1,j\_\lim-1} - T_{i-1,j\_\lim}}{\Delta x}\right) \cdot \Delta t}{c_{p\_wood}(T_{i-1,j\_\lim}) \cdot \Delta x + \Delta m_{FR}(x_{j\_\lim}, \Delta x) \cdot c_{p\_fr}\left(x_{j\_\lim}, T_{i-1,j\_\lim}\right) \cdot \Delta x} \quad (2.58)$$

(Прийняті позначення - див. позначення до формули (2.56)).

Використовуючи представлену методику, була побудована математична модель енергетичної складової хіміко-фізичних процесів, які мають місце в зразку вогнезахищеної деревини (заболонь сосни товщиною 10 мм, щільністю 400-550 кг/м^3, просоченої вогнезахисним засобом ДСА-1М в перерахунку на суху речовину 168,2 г/м^2, відповідно до [248]) при нагріванні поверхні зразка потоком енергії 40 кВт/м^2 до настання фази полум'яного горіння (при 410 ℃), результати представлені на рисунку 2.25.

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 вогнезахищеної деревини (обробленої

ВВБЗР на основі фосфатів та сульфатів амонію) більше ніж в два рази більший порівняно з таким інтервалом для невогнезахищеної деревини.

Отже, оскільки представлена методика пов’язує охолоджувальний ефект від використання ВВБЗР для вогнезахисту деревини з вкладом у прогнозне подовження часу від початку термічного впливу до займання деревини (тобто, з подовженням ПСРП), її доцільно використовувати при розробленні компонентного складу ВВБЗР.

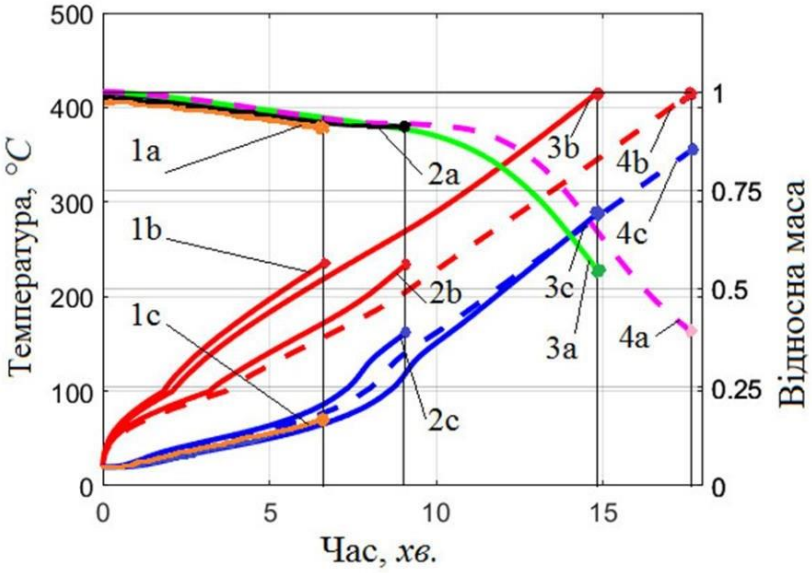


Рисунок 2.25 - Порівняння результатів математичного моделювання хіміко-фізичних процесів в невогнезахищеній деревини (поперек волокон сімейство кривих 1a, 1b, 1c, та вздовж сімейство кривих 2a, 2b, 3c) та вогнезахищеній (поперек волокон - сімейство кривих 3a, 3b, 3c; та вздовж волокон - 4a, 4b, 4c) за інтенсивності опромінення в 40 кВт/м^2. Криві, позначені літерою «a», описують залежність твердої відносної маси зразка від часу, літерою «b» - залежність температури зовнішньої поверхні зразка, яка опромінюється, літерою «c» - залежність температури задньої поверхні зразка, яка не перебуває під дією теплового опромінення

2.6 Удосконалення феноменологічної моделі процесу висолювання антипірену з деревини при наявності плівки полімерного антисептика на її поверхні

В розділі 1 зазначалось, що короткий термін ефективної експлуатації деревини, вогнезахищеної просочувальними засобами, які широко використовувались наприкінці ХХ століття (ББ-11, БС-13, ВАНН-1, ДМФ та інш.), пов'язаний безпосередньо з процесом висолювання антипіренів з вогнезахищеної деревини. Розрахунки показують, що термін зберігання необхідного рівня вогнезахисту такої деревини не перевищує одного року [13, 93]. Такий термін також підтверджується й натурними випробуваннями.

Для підвищення вогнезахисної ефективності, так і для подовження строку експлуатації вогнебіозахищеної деревини були розроблені ВВБЗР нового покоління [73, 193, 194, 247-249]: ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М. Однією з особливостей цих ВВБЗР є використання водорозчинного полімерного антисептика – полігексаметиленгуанідингідрофосфата (гідрохлорида), який на поверхні ЦВМ утворює полімерну плівку. Полімерна плівка служить бар'єром для дифузійного процесу висолювання антипіренів з матеріалу (рис.2.26). Як видно з рисунку, на зразку деревини, що оброблений ВВБЗР ДСА-1М висолів не спостерігається на відміну від зразка, що оброблений ВВБЗР БС-13 (H_3BO_3 + Na_2CO_3).

Для того, щоб винайти технічне рішення щодо втримання достатнього рівня вогнезахисту деревини впродовж терміну експлуатації дерев'яних конструкцій, потрібно дослідити процеси, що призводять до зниження рівня вогнезахисту. Вважається, що основним процесом, що найбільш суттєво впливає на зниження рівня вогнезахисту, є процес висолювання антипіренів з вогнебіозахищеної деревини на її поверхню (див. розділ 1). Цей процес частково досліджувався в роботах [13, 93], але вони не дають повного уявлення про особливості протікання процесу висолювання в реальних умовах експлуатації вогнебіозахищених дерев'яних конструкцій.

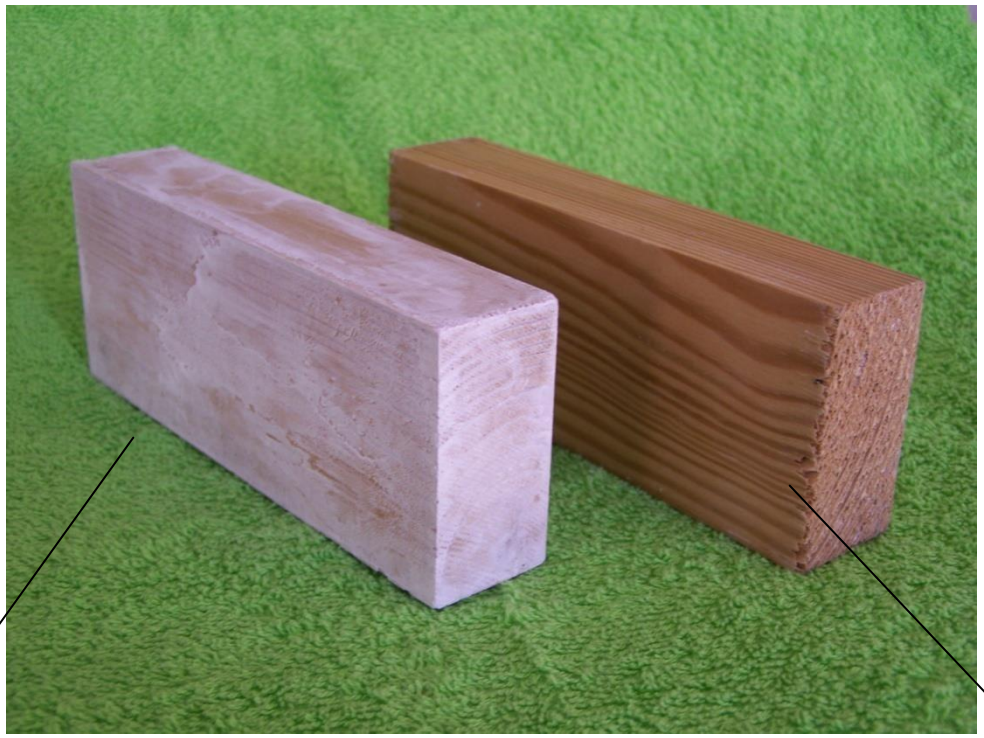


Рисунок 2.26 - Зовнішній вигляд зразків деревини, оброблених ВВБЗР: а) БС-13; б) ДСА-1М.

В роботі [93] наведена математична модель вимивання антипіренів з вогнебіозахищеної деревини, поверхня якої безпосередньо контактує з водою, тобто розглядається лише випадок, коли дерев'яні конструкції конструктивно не захищені від впливу атмосферних опадів. В роботі [230], навпаки, зовсім не розглядається процес можливого зволоження поверхні деревини: зволоження антипіренів розглядається тільки за рахунок води, що утримується самою деревиною. Цей випадок реалізується в практиці на об'єктах, коли вогнебіозахищена деревина експлуатується всередині опалювальних приміщень, тобто в умовах низької вологості повітря (і при незначних її коливаннях). Але більшість дерев'яних конструкцій експлуатуються в неопалювальних приміщеннях, де відбувається коливання вологості від 60% до 100%. Як правило, це конструкції дахів та горищ будівель самого різного призначення. Тобто це умови, коли плівка полімерного антисептика (в складі засобів вогнезахисту нового покоління) може контактувати з максимально зволоженим повітрям.

Полімерна плівка полігексаметиленгуанідингідрофосфату, як і всі водорозчинні полімери, під час розчинення у воді проходить стадію гелеутворення [176, 235]. Отже полімер, що знаходиться на поверхні ЦВМ, при надходженні молекул води перетворюється на гідрогель. Гідрогель буде постачати воду до твердих антипіренів в поверхневому шарі ЦВМ. Тоді феноменологічна модель процесу висолювання антипіренів може бути представлене таким чином (рисунок 2.27 [162]).

Дифузія відбувається в області, де вогнезахисна речовина перебуває у розчиненому вигляді:

$$D\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2} = -\frac{\partial C_2}{\partial \tau} \quad \text{або} \quad \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{1}{D_2}\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = 0, \tag{2.59}$$

де C_2 - концентрація речовини в області 2, кг/м^3;

D_2 - коефіцієнт дифузії в області 2, м^2/с.

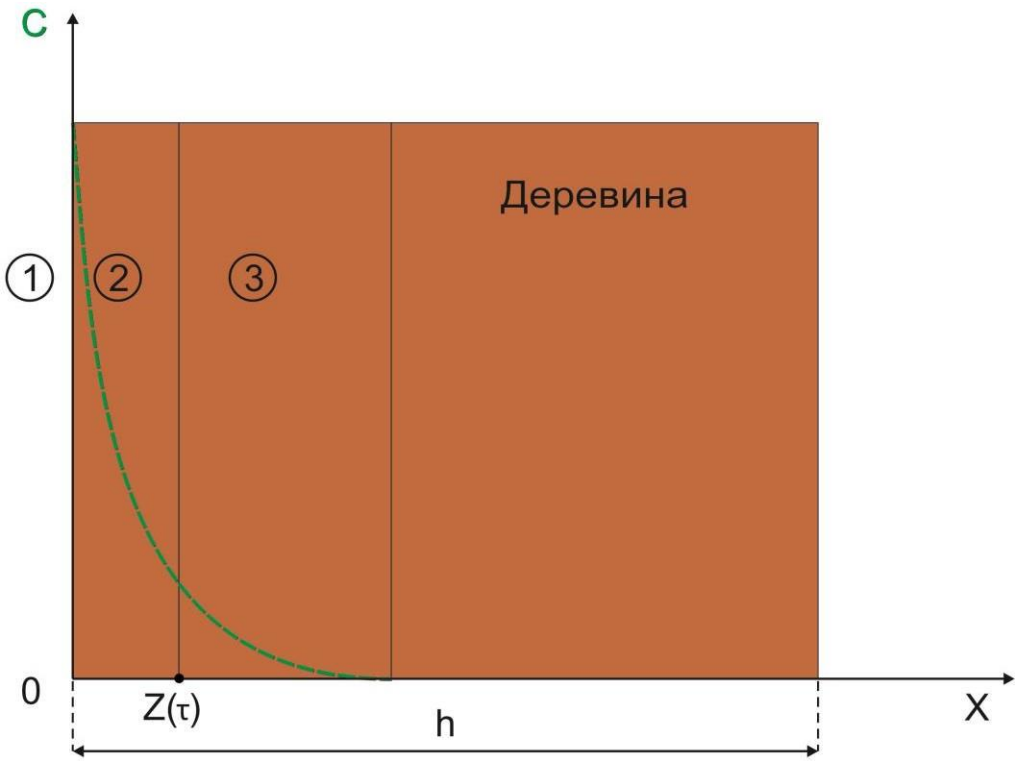


Рисунок 2.27 – Графічне представлення феноменологічної моделі процесу висолювання антипірену з вогнебіозахищеної деревини.

На рисунку 2.27: *Z (τ)* - координата фронту фазового перетворення в момент часу *τ*;

1 – зовнішнє середовище;

2 – зона з речовиною, що розчинюється;

3 – зона з твердою речовиною (антипіреном);

h – товщина зразка вогнезахищеної деревини.

Речовина виноситься проти осі *OX*, вода проходить в речовину в напрямку осі *OX*. При контакті води з плівкою полімерного антисептика ПГМГФ утворюється гель.

Можна вважати, що дифузія відбувається тоді, коли концентрація починає перевищувати деяке граничне значення. Подальше надходження води з навколишнього середовища призводить до збільшення її концентрації, гель стає більш насиченим водою, швидкість дифузії зростає.

Оскільки вода йде вздовж осі *OX*, то її концентрація буде зменшуватись при зростанні координати *x*.

Нехай *η(x,τ)*- концентрація води в точці *x* в момент часу *τ*. Будемо вважати, що $D_2=a\cdot\eta(x,\tau)$, де *a* - коефіцієнт пропорційності.

Тоді рівняння дифузії вогнезахисної речовини в області 2 набуває вигляду:

$$a\cdot\eta(x,\tau)\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}=-\frac{\partial C_2}{\partial \tau}. \qquad (2.60)$$

Найбільш вірогідним розподілом концентрації є експоненційний:

$$\eta(x,\tau)=\eta_0 e^{-b\cdot x}. \qquad (2.61)$$

Параметр η_0 - визначає значення концентрації вологи безпосередньо біля поверхні зразка, параметр *b(τ)* відповідає за величину спадання концентрації вглиб зразка.

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

$$a\eta_0 e^{-b\cdot x}\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}=-\frac{\partial C_2}{\partial \tau}. \qquad (2.62)$$

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

$$C_1(x,0)=C_{min};\ C_3(x,0)=C_{max}\ ;\ Z(0)=0. \tag{2.63}$$

Дані умови означають, що в момент $\tau=0$ вся речовина майже рівномірно розподілена у деревині у просоченому шарі.

Відповідно до закону збереження потоку мас, кількість речовини, що виходить на поверхню із області розчиненості дорівнює кількості речовини, що збирається на зовнішній поверхні деревини:

$$\beta_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big/ _{x=0} = \beta_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \Big/ _{x=0}, \tag{2.64}$$

де β_1, β_2 - коефіцієнти інтенсивності масопереносу, м/с.

Розподіл концентрації речовини неперервний, тому

$$C_1(0,\tau)=C_2(0,\tau). \tag{2.65}$$

На межі області з розчиненою речовиною (2) та твердої речовини (3) потоку немає, тому є лише рівність концентрацій:

$$C_2(Z=x,\tau)=C_3\ (x=Z,\tau). \tag{2.66}$$

Між областями 2 та 3 відбувається розчинення вогнезахисної речовини у воді, тому з'являється у розчиненому вигляді захисна речовина з інтенсивністю $q = \theta \frac{\partial Z}{\partial \tau}$, де θ - коефіцієнт пропорційності.

Межова умова між областями 2 і 3 набуває вигляду:

$$\beta_2 = \frac{\partial C_2}{\partial x} = q + \beta_3 \frac{\partial C_3}{\partial x} = \theta \frac{\partial Z}{\partial \tau} + \beta_3 \frac{\partial C_3}{\partial x}. \tag{2.67}$$

В рамках запропонованої моделі необхідно ввести значення межових параметрів для концентрацій, при яких можлива дифузія:

$$\eta(x,\tau) > \hat{\eta}. \tag{2.68}$$

Область 2 можна розбити на N відліків по координаті та аналізувати концентрацію $C_2(x_n,\tau)$, де x_n - точка всередині області 2, $n=1, 2, \ldots, N$):

$$x_N=Z;\ \Delta x=x_{n+1}-x_n.$$

Тоді

$$\left.\frac{\partial C_2}{\partial x}\right|_{x_n} = \frac{C_2(x_n+\Delta x)-C_2(x_n)}{\Delta x};$$

$$\left.\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}\right|_{x_n} = \frac{\left.\frac{\partial C_2}{\partial x}\right|_{x_{n+1}} - \left.\frac{\partial C_2}{\partial x}\right|_{x_n}}{\Delta x} \text{ або } \left.\frac{\partial^2 C_2}{\partial x^2}\right|_{x_n} = \frac{\left.\frac{\partial C_2}{\partial x}\right|_{x_{n+1}} - \left.\frac{\partial C_2}{\partial x}\right|_{x_{n-1}}}{2\Delta x}. \quad (2.69)$$

Праву ж частину рівняння (2.66) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial C_2}{\partial \tau} = \frac{C_2(\tau+\Delta\tau)-C_2(\tau)}{\Delta\tau}. \quad (2.70)$$

Якщо ввести дискретизацію в часі - τ_k, де $k=1, 2, \ldots, T$, то $\Delta\tau = \tau_{k+1} - \tau_k$, і тоді

$$\left.\frac{\partial C_2}{\partial \tau}\right|_{\tau_k} = \frac{C_2(\tau_k+\Delta\tau)-C_2(\tau_k)}{\Delta\tau}. \quad (2.71)$$

Використання дискретизованих виразів для похідних (2.69) та (2.71) дозволяє чисельно розв’язувати задачу про розподіл концентрацій вогнезахисної речовини (антипірену) в деревині (2.62). Обробляючи результати експериментальних вимірювань, значення η_0 та b приводять у відповідність до властивостей матеріалу та навколишніх умов.

Проведені експериментальні та аналітичні дослідження за наведеною схемою феноменологічної моделі довели, що використання гелеутворюючих антисептиків значно уповільнює дифузійні процеси у вогнебіозахищеній деревині. Коефіцієнт дифузії зменшується на п’ять порядків: з $D_{еф} = 10^{-5}$ м^2/с – для деревини, захищеної традиційними сольовими антипіренами, до $D_{еф} = 10^{-10}$ м^2/с – для деревини, захищеної сольовими антипіренами в композиції з нанесенням плівки полімерного антисептика. Тобто гідрогелі полімерних антисептиків можуть служити ефективним бар’єром для процесу висолювання антипіренів з вогнебіозахищеної деревини.

ВИСНОВКИ

1. Визначено поняття системи протипожежного захисту об’єкта, в якій реалізуються методи пасивного і активного протипожежного захисту. Пасивний захист визначається застосуванням заходів, що виконані заздалегідь і не потребують додаткової мобілізації підчас ліквідації пожежі. Активний захист визначається застосуванням речовин, техніки, засобів, що придатні в любий час бути мобілізованими для ліквідації пожеж.

2. Аналітичними дослідженнями встановлено пріоритетність в системі протипожежного захисту об’єкта засобів пасивного захисту, що дозволяє збільшити час початкової стадії пожежі на об’єкті з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів.

3. Вперше обгрунтовано доцільність створення єдиної системи пасивного і активного протипожежного захисту об’єкта з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів із використанням водних вогнебіозахисних речовин, що дозволяє локалізувати або ліквідувати пожежу на початковій стадії її розвитку.

4. Методологічною основою створення високоефективних водних вогнебіозахисних речовин є системний підхід до отримання нових та поглиблених знань щодо умов реалізації комплексу вогнезахисних та вогнегасних факторів впливу водних вогнебіозахисних речовин (охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання) на процеси займання, поширення полум’я поверхнею та припинення горіння різних матеріалів.

5. На основі методу квантово-хімічного розрахунку енергетичних параметрів іон-радикальних та іон-молекулярних комплексів активних центрів горіння продуктів термодеструкції ЦВМ з продуктами термічного розкладу водних вогнебіозахисних речовин встановлена вибірковість тяжіння кисневмісних та водневмісних активних центрів горіння під час формування фосфоровмісних та азотовмісних комплексів, що дає можливість направленого підбору синергетичних компонентів в складі водних вогнебіозахисних речовин для посилення їх інгібувального впливу.

6. Запропоновано математичну модель розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини, що дозволяє визначати оптимальну концентрацію антипіренів у водному робочому розчині для вогнебіозахисних засобів, що використовуються при поверхневому вогнезахисті дерев'яних елементів горищних покриттів будівель та споруд на об'єктах різного призначення. Впровадження розробленої моделі дозволить створити еталонну базу даних з оцінювання необхідної кількості антипіренів, які утримуються в поверхневих шарах деревини після її просочення різними вогнезахисними речовинами. Зазначені дані доцільно використовувати для контролю якості проведення вогнезахисних робіт, що суттєво вплине на підвищення ефективності вогнезахисту об'єктів.

7. 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.

8. 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 просочувальних речовин.

9. Обґрунтована перспективність застосування водних вогнебіозахисних речовин для активного захисту об'єктів шляхом феноменологічного моделювання процесів взаємодії цих речовин з полум'ям в мікрооб'ємі зони горіння. Запропонована науково-технічна ідея щодо доцільності розроблення складу водної вогнебіозахисної речовини на основі полімерної водорозчинної сполуки із специфічними властивостями: а) з пониженим (порівняно з водою)

поверхневим натягом для покращення розпилення; б) з вмістом сольового інгібітора полум’яного горіння; в) з гелеутворюючою здатністю.

10. Удосконалено феноменологічну модель процеса висолювання водорозчинних антипіренів з поверхні вогнебіозахищеної деревини, на поверхню якої нанесена плівка полімерного антисептика, що здатна утворювати гідрогель. Полімерний антисептик запропоновано використовувати в якості ефективного дифузійного бар’єру для процесу висолювання водних вогнебіозахисних речовин під час експлуатації вогнебіозахищеної деревини.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ПАСИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН

3.1. Загальні вимоги щодо розроблення і застосування водних вогнебіозахисних речовин для протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із деревини

Як зазначено в розділі 1, необхідних вимог щодо розроблення і застосування ВВБЗР для СЗОП з пожежним навантаженням із деревини на теперішній час не існує. В існуючій нормативно-технічній документації (стандартах, технічних умовах, рекомендаціях, правилах і т.п.) щодо вогнезахищеної деревини майже не має взаємозв'язку з провідним стандартом ГОСТ 12.1.004 [197], що визначає суть СППЗО та її складових. В нормативній документації, зокрема в ГОСТ 16363 [53], ГОСТ 12.1.044 [52], ГОСТ 30219 [64], ДБН В.1.1-7 [71] та інших, не містяться вимоги до основного функціонального завдання пасивного ППЗО, а саме щодо забезпечення нормативного часу протидії виникнення пожежі, або її затримання на початковій стадії розвитку пожежі, до прибуття спецпідрозділів.

Найбільшу проблему для забезпечення ефективного пасивного ППЗО складає якість і ефективність вогнезахисту дерев'яних елементів горищних приміщень будівель (крокви, лати тощо). Для подолання цієї проблеми в ДБН В.1.1-7 [71] внесено вимогу про те, що зазначені дерев'яні елементи повинні оброблятися засобами вогнезахисту, що забезпечують І групу вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363 [53].

Захист дерев'яних будівельних конструкцій від вогню шляхом просочення їх водними розчинами антипіренів відомий спеціалістам вже майже століття. Широкого застосування цей спосіб набув за часів Другої Світової Війни - дахи будинків обробляли водними розчинами фосфатів амонію. І це було дієвим заходом щодо захисту будівель від підпалу авіаційними бомбами.

У післявоєнні роки загально технічною проблемою в Радянському Союзі був захист дерев'яних конструкцій від біоруйнування, оскільки деревина була одним з основних будівельних матеріалів під час відбудови держави. Тому й перші нормативні документи (у вигляді стандартів) регулювали саме питання біозахисту деревини. Наприклад, ГОСТ 20022.0 має відповідну назву: „Защита древесины. Параметры защищенности" [55]. Цей стандарт поширюється на деревину і встановлює параметри захищеності об'єктів від біологічного руйнування. Лише пізніше починають врегульовуватись і параметри вогнезахисту деревини. Наступні стандарти ГОСТ 20022.1 *Защита древесины. Термины и определения* [56] та ГОСТ 20022.2 *Защита древесины. Классификация* [57] містять визначення щодо вогнезахисту. Але основна проблематика все ж таки залишалась в площині захисту деревини від біоруйнування. Ця ж тенденція спостерігається і в наступних стандартах, таких як ГОСТ 20022.6 *Защита древесины. Способы пропитки* [58] та інші.

Для вирішення проблеми захисту деревини від біологічного руйнування були запропоновані відверто шкідливі речовини, що належать за ГОСТ 12.1.007-76 *Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности* [51] до першого класу небезпеки (отруйні речовини) та до другого класу небезпеки (токсичні шкідливі речовини). І тому й не дивно, що в ГОСТ 288815 *Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия* [63] наведено захисні засоби, з яких більше 95% належить до першої та другої групи небезпеки. Лише засоби ББ-11, ББ-32, БС-13 містять сполуки бору, що відноситься до третього класу небезпеки (помірно токсичні).

Такий стан речей пояснюється тим, що тривалий час домінувала технічна думка про те, що захисні засоби просочуються в структуру деревини, залишаються там протягом тривалого часу, і тому не несуть шкоди навколишньому середовищу (включаючи людей і тварин). Але ця думка хибна, оскільки добре відомо, що після просочення коливання вологості повітря викачує, як „насосом", сольові антипірени разом з антисептиками на поверхню деревини. І це підтверджується діючим на той час вимогами будівельних норм, що

передбачали вимоги проведення щорічного повторного просочення дерев'яних конструкцій. В результаті на горищах будинків накопичувались тони шкідливих речовин.

В подальшому з великої кількості засобів проти біоруйнування почали виділяти комбіновані засоби, які б додатково мали й вогнезахисті властивості. На допомогу розробникам вогнезахисних засобів у 1976 році було прийнято першу редакцію ГОСТ 16363 *Средства защитные для древесины. Метод определения огнезащитных свойств*. З виходом цього стандарту акцент захисту деревини змістився в бік саме вогнезахисту, хоча із збереженням біоцидних функцій, тобто із додаванням антисептиків. Нажаль в якості антисептиків продовжували використовувати речовини другого класу небезпеки. В цей час з'явились такі засоби як МС, ДМФ, ФБС [63].

Наведений аналіз стандартів засвідчує наявну невідповідність засобів вогнезахисту деревини безпечним, з точки зору екології, умовам експлуатації об'єктів критичної інфраструктури.

Стосовно стандарту ГОСТ 16363-76 слід зазначити, що під час використання він зазнав велику кількість змін і доповнень, що спонукало до його суттєвого доопрацювання. Замість нього в 1998 році введено міждержавний стандарт ГОСТ 16363-98 *Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств* [53]. В галузі застосування цього стандарту наголошується, що він розповсюджується на засоби вогнезахисту для деревини і встановлює класифікаційний метод і метод прискорених випробувань для визначення вогнезахисних властивостей. Сутність методу полягає у визначені втрати маси деревини, що оброблена вогнезахисними покриттями або просочувальними засобами, під час вогневого випробування в умовах, що сприяють акумуляції тепла. Класифікаційний метод застосовують для визначення групи вогнезахисної ефективності і при проведенні сертифікаційних випробувань. Метод прискорених випробувань застосовують для контролю вогнезахисної ефективності засобів вогнезахисту, що пройшли класифікаційні випробування.

За результатами випробувань встановлюють групу вогнезахисної ефективності покриття або просочувального засобу, що випробовується, при певному способі його застосування. Якщо втрата маси зразка не більше 9% для засобу захисту деревини встановлюють I групу вогнезахисної ефективності, а при втраті маси зразка більше 9%, але не більше 25%, для засобу вогнезахисту деревини встановлюють II групу вогнезахисної ефективності.

Зразки для випробувань виготовляють з прямошарової повітряно-сухої деревини сосни густиною від 400 до 550 кг/м^3. Зразки повинні бути без наявних пороків за ГОСТ 2140 [60]. Бокова поверхня зразків повинна бути струганою, торці обпилені і оброблені наждаком. Для випробування просочувальних засобів зразки виготовляють із заболоні. Просочення зразків деревини водними засобами здійснюють шляхом їх занурення у розчин. Допускається нанесення просочувального засобу пензлем або з пульверизатора.

Витрата захисного засобу, умови і час сушіння повинні відповідати нормативному документу на засіб вогнезахисту, що випробовується. Витрату вогнезахисного засобу визначають в г/м^2.

Застосування методу випробування для порівняльної класифікації вогнезахисних засобів щодо їх ефективності не визиває нарікань. Але цей стандарт став підґрунтям для інших стандартів, які повинні регулювати питання визначення якості продукції (вогнезахищеної деревини) і навіть визначення якості виконання вогнезахисних робіт на різних об’єктах. Необхідно зазначити про невідповідність положень цього стандарту вимогам ДСТУ ГОСТ 15.001 [86] щодо умов експлуатації продукції та умов випробування [9].

Спочатку розглянемо вимоги щодо просочення дерев’яних зразків для випробування за ГОСТ 16363 [53] та умови просочення дерев’яних конструкцій на реальних об’єктах. У зразків для випробування 12% площі поверхні складає площа поверхні торців, яка під час просочення поглинає значно більшу кількість захисного засобу в порівнянні з такою ж площею бокових поверхонь зразка [96, 97]. На реальних об’єктах дерев’яні конструкції практично не мають відкритих торцевих поверхонь, тобто деревина експлуатується поверхнями зразків вздовж

волокон деревини (як у бокових поверхонь зразка для вогневих випробувань). До того ж для виготовлення дерев'яних конструкцій використовують деревину різних порід, а не тільки заболонь сосни. Особливо це стосується обрешітки дахів, яка складає основну площу поверхні дерев'яних конструкцій дахів. Також необхідно відзначити, що випробування зразків вогнезахищеної деревини відбувається безпосередньо з поверхні одного з торців.

Наведене говорить про те, що умови випробування вогнезахисної ефективності засобів на зразках просоченої деревини за ГОСТ 16363-98 [53] не імітують реальні умови експлуатації (споживання) продукції (вогнезахищеної деревини), що не відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 15.001 [86]. Без сумнів такий стан речей безпосередньо впливає на якість документації з вогнезахисту деревини просочувальними засобами.

Дуже важливим стандартом для пожежної безпеки є ГОСТ 12.1.044-89 *Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения* [52]. У ньому зазначено, що пожежовибухонебезпека речовин і матеріалів визначається показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовин (матеріалів) і умов їх застосування, що співпадає з вимогами стандарту [52].

Розглянемо тільки два показника, що стосуються визначення якості вогнезахисту деревини і виробів з неї, та методи їх визначення, а саме: визначення температури займання та групи горючості.

Температура займання – найменша температура речовини, коли в умовах спеціальних випробувань, речовина виділяє пари і гази з такою інтенсивністю, що при дії на них джерела вогню спостерігається їх полум'яне горіння. Зауважень щодо методу експериментального визначення температури займання твердих речовин і матеріалів не має.

Група горючості – класифікаційна характеристика щодо здатності речовини або матеріалу до горіння. Хоча в стандарті декларується, що визначення пожежовибухонебезпечних параметрів матеріалу (речовини) повинно співпадати з умовами застосування, на нашу думку, це не відповідає дійсності стосовно

методу визначення групи горючості. За основу зазначеного методу покладено метод і обладнання, що наведено і в ГОСТ 16363-76. Недоліки цього стандарту відносно випробування деревини наведені вище.

Незрозумілим є визначення придатності установки до роботи. В п.4.3.2.5 зазначено, що придатність установки до роботи перевіряється за випробуваннями стандартного зразку деревини глибокого просочення, втрата маси якого після випробування повинна бути (20,6±1,4) % (стандартний зразок виготовляють за ГОСТ 16363 (п.2)). По-перше, невідомо який вогнезахисний засіб необхідно застосувати для виготовлення зазначеного зразка, а, по-друге, невідомо якої низької вогнезахисної ефективності цей засіб повинен бути, щоб при глибокому просоченні отримати таку втрату маси.

Необхідно зазначити, що стандарт [52] був створений та введений в дію більше 20 років тому. Змінено базовий стандарт ГОСТ 16363-76 на ГОСТ 16363-98. А тому ГОСТ 12.1.044 стосовно методу експериментального визначення групи важкогорючих і горючих речовин і матеріалів потребує значного корегування і доопрацювання хоча б на рівні процедури проведення випробувань.

Розглянемо міждержавний стандарт ГОСТ 30219-95 *Деревина вогнезахищена. Загальні технічні вимоги. Методи випробування. Транспортування і збереження* [64]. В галузі застосування наголошується, що цей стандарт розповсюджується на вогнезахищену деревину із застосуванням засобів просочення і встановлює загально технічні вимоги до деревини, що підлягає вогнезахисному просоченню, вогнезахищеної деревини, способів і засобів вогнезахисту деревини, а також регламентує вимоги безпеки, методи контролю і випробувань, правил маркування, транспортування та збереження.

Даний стандарт без сумніву є прогресивним кроком до вирішення проблеми вогнезахисту деревини і протипожежного захисту об’єктів. Але в методологічному плані він має ті ж недоліки, що й ГОСТ 16363 [53], оскільки він на нього спирається. Деякі питання не доопрацьовані, а в деяких питаннях зазначений стандарт заводить користувачів в тупик, оскільки містить посилання на неіснуючі норми чи стандарти.

Треба відзначити намагання поліпшити класифікацію вогнезахищеної деревини, наблизити її до умов реальної пожежі на об’єктах. Тому вогнезахищена деревина І групи поділяється на три підгрупи:

- ІА – трудногорюча деревина, що не здатна до самостійного горіння довгий час в умовах розвинутої пожежі. При випробуванні за ГОСТ 16363 середня втрата маси десяти зразків після двохвилинної дії джерела вогню повинна бути не більше 5%, максимальна температура димових газів – не більше 220^0С, самостійне горіння і тління відсутні;
- ІБ - трудногорюча деревина, що не здатна до самостійного горіння довгий час в умовах пожежі, що розвивається. При випробуванні за ГОСТ 16363 [53] середня втрата маси десяти зразків після двохвилинної дії джерела вогню повинна бути не більше 7%, максимальна температура димових газів – не більше 250^0С, час самостійного горіння і тління – не більше 1 хвилини;
- ІВ - трудногорюча деревина, що не здатна до самостійного горіння довгий час в початковій стадії пожежі. При випробуванні за ГОСТ 16363 [53] середня втрата маси десяти зразків після двохвилинної дії джерела вогню повинна бути не більше 9%, максимальна температура димових газів – не більше 350^0С, час самостійного горіння і тління – не більше 1 хвилини.

Вогнезахищена деревина ІІ групи – важко займиста деревина, що не здатна до горіння від малокалорійного джерела займання. При випробуваннях за [53] середня втрата маси 10 зразків повинна бути не більше 25%.

Збільшується коло вимог до матеріалу, зокрема за [52] встановлюється вимога до розповсюдження полум’я поверхнею: для підгрупи ІА та ІБ індекс розповсюдження полум’я становить від 0 до 10 включно; для підгрупи ІВ він повинен бути не більше 20, а для ІІ групи – не більше 25. Є вимоги за [52] до токсичності продуктів згорання вогнезахищеної деревини. Вогнезахищена деревина під час експлуатації не повинна визивати корозію металів (втрата металу не повинна перевищувати 0,1 г/м^2 год). Зазначений стандарт містить також вимоги до вимивання захисних засобів, хоча мова йде про умови , що призводять

до висолювання захисних засобів в залежності від вологості повітря. Відсутні вимоги щодо димоутворювальної здатності, хоча існує відповідний метод її вимірювання за [52], як одного з параметрів пожежовибухонебезпечності матеріалів. Це можна вважати невідповідністю характеристики вогнезахищеної деревини умовам експлуатації тому, що цей параметр є дуже важливим [94].

У методах випробування наводяться параметри, які можуть дати характеристику якості вогнезахищеної деревини. Зокрема пропонується визначати утримання захисного засобу, що проводиться для капілярного просочення способом нанесення на поверхню деревини за [58]. Для способів вимочування і автоклавного просочення пропонується визначати поглинання розчину захисного засобу та глибини просочення за [58]. Тут слід зауважити, що наведені параметри є неоднозначними з точки зору їх використання для визначення якості вогнезахисту, а інколи навіть і хибними. При значній глибині просочення (великій кількості засобу), але при недостатній концентрації засобу в поверхневому шарі деревини, такий матеріал може бути займистим і навіть горючим.

У цьому стандарті зазначається, що для поверхневих способів просочення якість виконаного вогнезахисту, а також рівень вогнезахисту під час експлуатації, визначають експрес-методом. При наявності неоднозначних результатів можуть проводитися випробування за [53]. Але як застосувати метод за [53] до вогнезахищеної деревини, яка експлуатується, в стандарті не зазначається. І взагалі, неможливо вирізати стандартний зразок розмірами 150х60х30 мм з дошок горищних латів, які , як правило, мають товщину в 25 мм.

Сутність експрес-методу полягає в тому, що стружку вогнезахищеної деревини (пробу) товщиною до 1 мм поміщають в полум’я сірника і витримують 15 секунд. Після чого визначають час самостійного горіння і тління стружки.

При всій простоті експрес-методу, розглядаючи предмет (пробу і її товщину) та процес (вплив полум’я) досягнення температури вищої за температуру займання, його сутність відображає умови екстремального впливу. Якщо стружка вогнезахищеної деревини під дією полум’я сірника (температура такого впливу може досягати 600 ^{0}C) не утворює полум’яного горіння, то

продукти пролізу деревини (горючі гази) зафлегматизовані продуктами термічного розкладу захисного засобу [106]. Така вогнезахищена деревина буде мати високу температуру займання, а може і не мати її. І це вказує на ефективно проведений вогнезахист.

Далі в стандарті зазначається, що поверхневе вогнезахисне оброблення вважається якісним і вогнезахищена деревина відповідає ІІ групі, коли після видалення джерела вогню не менше як 90% проб не буде підтримувати самостійного горіння і тління. Вогнезахищена деревина при місцевій дії на неї любого джерела вогню може обвуглюватись, але полум’я, що при цьому виникає, не повинно розповсюджуватись по її поверхні, а обвуглення і руйнування повинні обмежуватись місцем дії джерела вогню. Необхідно відзначити неоднозначність останнього твердження стосовно якості вогнезахисту.

У п.5.8 зазначається, що визначення якості вогнезахищеної деревини І групи проводять в лабораторних умовах за методами випробувань, які встановлені стандартами. Але, нажаль, в п.2 („Нормативні посилання”) таких стандартів не наведено. Тобто стандарт посилається на невідомі джерела.

Приведений аналіз методів і умов випробування вогнезахищеної деревини за ГОСТ 30219-95 [64] дозволяє стверджувати про існування низки невідповідностей між умовами стандартних випробувань та реальними умовами експлуатації вогнезахищеної деревини, як це вимагає стандарт [86]. Основною причиною цих невідповідностей є те, що зазначений стандарт базується на [53], який присвячено класифікаційним випробуванням вогнезахисних засобів для деревини, а не для визначення якості вогнезахищеної деревини або якості вогнезахисного оброблення.

Оскільки не має обґрунтованості за [64] щодо застосування експрес-метода „горіння стружки” для визначення цим випробуванням деревини І групи (лише ІІ групи), то з урахуванням реальних умов експлуатації вогнезахищеної деревини, можна запропонувати наступний алгоритм визначення ефективності вогнезахисного оброблення дерев’яних конструкцій на об’єктах. До розроблення і внесення змін в стандарт [53], визначати за ним лише ефективність

просочувальних вогнезахисних засобів і проводити відповідну класифікацію. За стандартом [64] проводити подальшу класифікацію ефективності вогнезахищеної деревини за підгрупами. Визначати якість вогнезахисного оброблення дерев'яних конструкцій на реальних об'єктах за експрес-методом. Стружку деревини (пробу) поміщати в полум'я сірника і витримувати на протязі 15 с для визначення відповідності якості вогнезахисту на рівні II групи та витримувати 20-25 с (точний час треба визначити після певних досліджень) для визначення I групи. При наявності протиріч за результатами випробувань по експрес-методу додатково проводити випробування зразків вогнезахищеної деревини, знятих безпосередньо з об'єкта, на визначення температури займання за відповідним методом ГОСТ 12.1.044 [52]. І вже за показником цього параметру та технічною характеристикою такої температури займання з нормативної документації (технічних умов, регламент робіт з вогнезахисту) визначати відповідність якості проведеного оброблення.

В [64] зазначається, що здатність вогнезахищеної деревини поширювати полум'я поверхнею оцінюється індексом поширення полум'я за [52]. Вогнезахищена деервина підгруп ІА та ІБ повинні мати індекс поширення полум'я в межах від) до 10 включно, а підгрупи ІВ - не більше 20. Вогнезахищена деревина II групи повинна мати індекс поширення полум'я поверхнею не більше 25.

Для вогнезахищеної деревини значущим процесом є висолювання вогнезахисного засобу. За [56] під терміном "висолювання" розуміють утворення на поверхні просоченої деревини кристалів солі в результаті видалення із деревини захисного засобу під час випаровування з нього розчинника. Але вимог щодо контролю такого показника в [64] не міститься.

Під час визначення галузі застосування вогнезахищеної деревини за [64] є вимога щодо визначення токсичності продуктів горіння її та вогнезахисних засобів. Показник токсичності продуктів горіння визначають за [52]. Вогнезахищена деревина під час експлуатації також не повинна визивати корозію металів. Показник корозії (за зменшенням маси металу, що контактує з

вогнезахищеною деревиною, в часі) не повинен перевищувати 0,1 г/м^2·годину [64].

Науково-технічний напрямок щодо вогнебіозахисту деревини просочувальними засобами із застосуванням сольових антипіренів і полімерного антисептика було розпочато в 1998 році. У 1999 році були розроблені технічні умови [247] "Суміші просочувальні для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини". Було створено ВВБЗР ДСА-1 такого якісного складу: антипірен (діамонійфосфат, сульфат амонію, змочувач та вода) та антисептик (водний розчин полігексаметиленгуанідинхлориду (1% "Гембар" - технічний продукт, або 1% "Акватон" - хімічно чистий продукт)). Проведені сертифікаційні випробування продукції на відповідність вимогам [64]. В процесі експлуатації на реальних об’єктах встановлена необхідність модифікації ВВБЗР ДСА-1 (тобто видозміни цього продукту, що характеризується появою у нього нових ознак, властивостей при збереженні сутності). Для обробляння дерев’яних конструкцій, виготовлених з пиляних матеріалів (а не з струганих), необхідно було збільшити кількість полімерного антисептика до 2%. Отже, розроблено ВВБЗР з технічною назвою ДСА-2, що відображено в зміні №1 до технічних умов [247]. У 2003 році були розроблені технічні умови ТУ У 24.6-32536450.001 "Суміші просочувальні для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини" з двома марками ВВБЗР ДСА-1 та ДСА-2. П’ятирічний досвід промислового виробництва ВВБЗР ДСА-1 та ДСА-2 був втілений у деклараційному патенті України №8963 від 15.08.2005 р. [73] "Композиція для вогнебіозахисту деревини" у такому складі (% мас.): антипірен - діамонійфосфат (3-50), сульфат амонію (3-50), змочувач (0,1-6), вода (решта); антисептик - полігексаметиленгуанідинфосфат (хлорид) (0,1-30), вода (решта). Нові модифікації отримали технічні назви: ДСА-1М та ДСА-2М. Модифікування продукції виконувалось відповідно до технічної реалізації результатів розвитку наукових основ створення високоефективних ВВБЗР для деревини.

У відповідності до [199] вогнезахисні речовини віднесено до виду продукції протипожежного призначення, що підлягає обов’язковій сертифікації. Тому кожні

два роки проводились сертифікаційні випробування ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М. Під час промислового виробництва та сертифікаційних випробувань виявлено відсутність науково обґрунтованих технічних вимог до ВВБЗР для деревини.

Зазвичай технічні вимоги містяться в нормативно-технічній документації, але для їх наукового обгрунтування доцільно скористатись методологічним підходом, запропонованим в розділі 2, який ґрунтується на створенні умов щодо реалізації вогнезахисних факторів впливу ВВБЗР на процеси займання, поширення полум'я по поверхні деревини та припинення її горіння. Тоді загальні вимоги до ВВБЗР для деревини повинні бути такими:

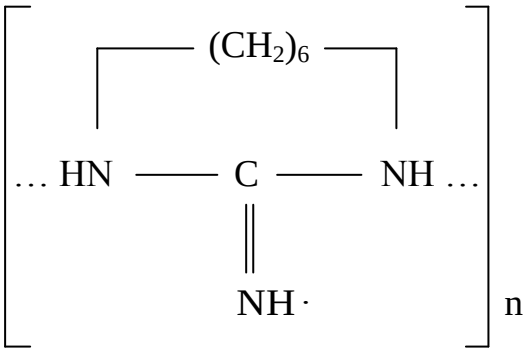
1. ВВБЗР повинні характеризуватись здатністю до реалізації ефектів: охолодження, інгібування, ізолювання, флегматизування.
2. ВВБЗР у своєму складі повинні мати антипірени (сполуки з атомами азоту і фосфору) та ізолюючий полімерний антисептик.
3. ВВБЗР за своєю ефективністю вогнезахисту деревини повинні відповідати першій групі (за ГОСТ 16363).
4. ВВБЗР повинні характеризуватись здатністю до зменшення поширення полум'я поверхнею.
5. ВВБЗР повинні характеризуватись здатністю до зменшення димоутворення.
6. ВВБЗР повинні характеризуватись здатністю до зменшення токсичності продуктів горіння.
7. Деревина, що оброблена ВВБЗР, повинна відповідати вимогам щодо корозійної дії на чорні метали.

3.2. Обгрунтування складу водної вогнебіозахисної речовини нового покоління для протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням із деревини

3.2.1. Реалізація ефектів ізолювання і біозахисту при використанні полімерного антисептика у складі водної вогнебіозахисної речовини

Відомі природі гуанідинові полімери, які виділяють плодові дерева і які виявляють антисептичні властивості. Але в природі вони присутні в лужній

водонерозчинній формі [48, 110]. На теперішній час налагоджено промислове виробництво водорозчинних полімерів гуанідинового ряду кислих форм, які виявляють високу біоцидність і тому широко використовуються у фармакології. Представляє певну цікавість гідрофосфатна форма – полігексаметиленгуанідингідрофосфат (ПГМГФ) з молекулярною масою від 5000 до 10000 а.о.м., яка виробляється в Україні. ПГМГФ має структурну формулу [194]:



Звертають на себе увагу певні фізико-хімічні властивості, які можуть бути використані для цілей захисту об'єкта від пожежі: а) ПГМГФ має виражені поверхнево-активні властивості; б) завдяки дифільності макромолекул ПГМГФ має високу адгезію як до гідрофільних, так і до гідрофобних поверхонь; в) завдяки присутності в структурі атомів азоту і фосфору ПГМГФ не має температури займання (звуглюється при температурах 390÷400 ^{0}C).

Плівка полімерного антисептика ПГМГФ, нанесена на поверхню деревини, ізолює поверхню деревини від безпосереднього контакту з киснем повітря, що має велике значення в контексті вогнезахисту. По-перше, чим більша насиченість пор і капілярів киснем повітря, тим менша температура потрібна для початку деструкції макромолекул целюлози. Аналітично цей ефект можна оцінити порівнявши ефективні коефіцієнти дифузії кисню в капілярах і порах деревини, що оцінюється відповідно до літературних даних на рівні $D_{еф} \sim 10^{-4}$ м^2/с, та в полімерах, що оцінюється на рівні $D_{еф} \sim 10^{-10}$ м^2/с [176]. Тобто вони відрізняються на шість порядків. По-друге, термодеструкція в мікроб'ємі поверхневого шару проходитиме в умовах недостатності кисню, що приведе до зміни якісного та

кількісного складу продуктів термодеструкції деревини. Більш детально цей процес буде розглянуто в п. 3.2.3.

Плівка полімерного антисептика ПГМГФ ізолює поверхню деревини й від доступу води в капіляри і пори, що дозволяє ефективно долати процес висолювання антипіренів на поверхню вогнебіозахищеної деревини, як це показано в розділі 2. Кількісна оцінка цього ефекту наведена в п. 3.4.

Захисний шар антисептика є бар'єром і для проникнення мікроорганізмів в поверхневий шар деревини повітряно-крапельним способом. Кількісно біоцидні властивості полімерного препарату ПГМГФ по відношенню до деревини визначались в біологічних лабораторіях Українського науково-дослідного інституту механічної обробки деревини (УкрНДІМОД) та Державного науково-технічного центру консервації та реставрації пам'яток (ДНТУ „Конрест") [162]. Випробування проводились на тест-культурах бактерій, грибів, нижчих рослин, що добуті з флори „біопошкодженої" деревини. Ефективність ПГМГФ порівнювалась з антисептиками-дезінфекаторами, що традиційно використовуються у практиці реставрації „Катаміном-А" і „Катапіном бактерицидним". Були використані однопроцентні водні розчини антисептиків. Експозиція вирощування грибів складала 24 години при 28°С.

Фунгіцидна дія препаратів визначалась відповідно до ГОСТ 9.048–89 [65] за ступенем обростання тест-зразків деревини в процесі вирощування грибів у вологій камері. Результати випробувань наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Результати тестування фунгіцидної активності біопрепаратів

Назва антисептика	Концентрація водного розчину, %	Зона враження деревини, см	Тривалість ефективної дії, діб	Примітка
Катамін	1	2,0	30	Еталон
Катапін	1	1,9	7	Контроль
ПГМГФ	1	2,1	20	Ефективний бактерицид

Аналіз результатів випробувань показав, наступне: – бактерицидна активність однопроцентного водного розчину ПГМГФ лише трохи поступається

еталону „Катаміну” та перевищує активність контрольного препарату „Катапіну”.

Подальші дослідження проводили щодо оцінювання динаміки біообростання плісеневими грибами (за ГОСТ 9.048) [65] дерев’яних брусків трьох серій. Зразки першої серії оброблялись послідовно 2 рази тільки водним розчином зазначеного антипірена. Зразки другої серії оброблялись послідовно два рази водним розчином антипірена, після чого на зразки наносився шар однопроцентного розчину антисептика (ДСА-1М). Зразки третьої серії оброблялись послідовно два рази водним розчином антипірена, після чого на зразки наносився шар двопроцентного розчину антисептика (ДСА-2М). Оброблені та висушені до постійної маси бруски деревини обприскували суспензією спор основних видів грибів, закладали у вологу камеру й витримували за температури 25°С. Зростання біообростання фіксували кожну 5–7 добу. Результати динаміки біообростання дерев’яних брусків, оброблених антипіреном і антисептиком ПГМГФ наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Динаміка біообростання дерев’яних брусків, оброблених антипіреном та антипіреном з антисептиком 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; „+” – слабке біообростання; „++” – середнє біообростання; „+++” – сильне біообростання.								

Як видно із таблиці 3.2 зразки деревини серії , що оброблені тільки одним антипіреном, через 46 діб сильно обростали плісеневими грибами. Зразки деревини серій, що оброблені ДСА-1М, показали достатню стійкість до обростання плісеневими грибами [65], а зразки деревини, що оброблені ДСА-2М, показали дуже високу стійкість до обростання плісеневими грибами.

Таким чином, результати досліджень динаміки біообростання дерев'яних брусків, що оброблені антипіреном на основі суміші фосфатів і сульфатів амонію та антисептиком ПГМГФ показали, що за допомогою такого поверхневого оброблення можна досягнути високої ефективності біозахисту деревини [158, 162].

3.2.2. Реалізація ефекту інгібування активних центрів горіння продуктів термічного розкладу деревини при використанні суміші фосфатів та сульфатів амонію у складі водної вогнебіозахисної речовини

Аналіз літературних джерел в розділі 1 та теоретичні дослідження розділу 2 показали, що фізико-хімічні властивості сольових антипіренів повинні відповідати таким вимогам: температура плавління повинна бути нижчою за температуру займання незахищеної деревини (235-240 ^{0}C); під дією теплоти антипірен повинен розкладатись з утворенням газоподібних продуктів, які не підтримують горіння (і цей процес повинен починатися також іще до досягнення температури 235 ^{0}C). До уваги необхідно взяти теоретичні дослідження розділу 2, стосовно передбачення синергитичної дію фосфоровмісних та азотовмісних сполук, що доцільно використати для підвищення інгібувальної здатності антипіренів.

Зазначеним вимогам в певній мірі відповідають фосфати амонію (моно- та діамонійфосфат) та сульфат амонію. Приведемо деякі фізико-хімічні параметри цих сполук. Моноамонійфосфат ($(NH_4)H_2PO_4$) – безбарвна кристалічна речовина з температурою плавлення 190 ^{0}C, розчинністю у воді – 22,6 г на 100 г води, не гігроскопічна. Діамонійфосфат ($(NH_4)_2HPO_4$) - безбарвна кристалічна речовина, починаючи з 75 ^{0}C розкладається з виділенням газоподібних речовин (N_2, NH_3, H_2O), гігроскопічна речовина, добре розчиняється у холодній воді (42,9 г на 100 г води). Сульфат амонію ($(NH_4)_2SO_4$) – безбарвна кристалічна речовина, після 150^{0}C плавиться з виділенням газоподібних речовин (N_2, NH_3, SO_3, H_2O), гігроскопічна речовина, добре розчиняється у холодній воді (70,1 г на 100 г води) [95, 231]. Із

наведених речовин кращими за фізико-хімічними параметрами є діамонійфосфат та сульфат амонію.

Теоретичним дослідженнями розділу 2 було показана можливість неадитивного (підвищеного) прояву інгібірувальної дії продуктів термічного розкладу сумішей фосфоровмісних та азотовмісних сполук на активні радикали ланцюгових реакцій горіння газоподібних органічних речовин (продуктів термічного розкладу деревини). Експериментально поведінку сумішей діамонійфосфата і сульфата амонію досліджено на установці по вивченню інгібувальних властивостей твердих, рідких та газоподібних речовин [243]. В якості горючої речовини використовувалась пара н-гептану, одержана способом карбюрації. Досліджуваний розчин розпилювався за допомогою пневматичної форсунки і подавався у полум'я співвісно з ним.

Випромінювання полум'я фіксувалось за допомогою спектрометра СДЛ-1 [244]. За міру інгібувальної дії приймалось зменшення інтенсивності випромінювання смуги 3064 Å, що належить ОН-радикалу, який відповідає за розповсюдження ланцюгової реакції горіння [242]. Температуру полум'я вимірювали методом обернення спектральних ліній по резонансних лініях натрію. На рисунку 3.1 наведено залежність інтенсивності випромінювання ОН- радикалів від концентрації розчинів солей та їх мольних співвідношень у сумішах діамонійфосфата та сульфата амонію. Криві завершуються знаком Х, що означає припинення горіння. Як видно з рисунку, найменший вплив на зменшення концентрації ОН-радикалів має розчин солі сульфата амонію (крива 4), більший вплив має розчин солі діамонійфосфата (крива 2). З додаванням розчину діамонійфосфата до розчину сульфата амонію (суміші з мольним співвідношеннями 1:1) інтенсивність випромінення ОН-радикалів в полум'ї н-гептана значно зменшується. Найбільший вплив на інтенсивність випромінення ОН-радикалів в полум'ї н-гептана спостерігається при подаванні суміші солей у мольному співвідношення діамонійфосфата і сульфата амонію 2:1, при чому витрата розчину на гасіння полум'я у такій суміші вдічі менша, що свідчить про більш високу інгібувальну і вогнегасну здатність [243].

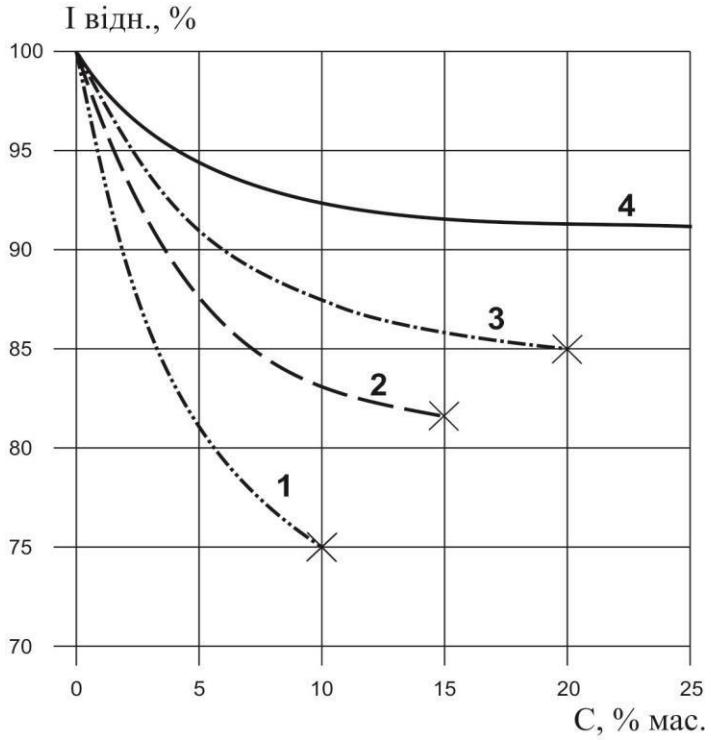


Рисунок 3.1 - Залежність відносної інтенсивності випромінювання ОН-радикалів від концентрації розчинів солей та їх мольних співвідношень у суміші, що подається в пальник: 1 - $(NH_4)_2HPO_4$ + $(NH_4)_2SO_4$ (2:1); 2 - $(NH_4)_2HPO_4$; 3 - $(NH_4)_2HPO_4$ + $(NH_4)_2SO_4$ (1:1), 4 - $(NH_4)_2SO_4$.

Таким чином, експериментальні дослідження інгібувальної здатності водних розчинів солей діамонійфосфата та сульфата амонію показали, що вони інгібують активні радикали полум’я н-гептана (ОН-радикали), а суміші цих солей при мольному співвідношенні діамонійфосфата та сульфата амонію 2:1 (у їх водному розчині) мають неадитивне збільшення інгібувальної здатності, тобто проявляють ефект синергізму. Ці експериментальні результати підтверджують прогнозні дані теоретичних розрахунків іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів продуктів термічного розкладу сумішей фосфоровмісних та азотовмісних сполук, що утворюються при взаємодії з активними радикалами ланцюгових реакцій горіння органічних речовин (див. розділ 2).

3.2.3. Реалізація ефектів охолодження та флегматизування зони термодеструкції деревини при використанні суміші сольових антипіренів та полімерного антисептика у складі водної вогнебіозахисної речовини

Рівень ефективності вогнезахисту деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М визначається фізико-хімічним розкладом компонентів під дією температури з поглинанням тепла та утворенням негорючих газів, зміною характеру процесу термічного розкладу матеріалів у напрямку утворення коксу, уповільненням процесів окиснення в газовій і конденсованій фазах. Визначення області температур, за яких відбуваються термічні перетворення вогнезахищеної деревини, проводили термогравіметричі дослідження процесів термічної деструкції в динамічному режимі із застосуванням дериватографа Q-1500 D [13, 98, 99, 162].

Досліджували подрібнені зразки необробленої соснової деревини та зразки деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М в атмосфері повітря нормального складу (вміст кисню – 21% об.). У всіх дослідах маса зразка становила 80±2 мг, швидкість нагрівання – 5 градусів на хвилину, зразок порівняння – порошок α-корунду, матеріал тиглів – алунд, чутливість гальванометрів: DTA – 250 мкВ, DTG – 500 мкВ. Результати аналізу досліджуваних матеріалів ілюструються (рис. 3.2–3.4).

Досліджено, що за температур до 100°С відбуваються ендотермічні процеси, що супроводжуються втратою їх маси. Такі процеси зумовлюються випаровуванням фізично адсорбованої води без деструкції матеріалу зразків. Органічні речовини втрачають структуровану воду.

За більш високих температур починається інтенсивна термічна деструкція, з швидкою втратою маси зразків. Цей процес відбувається в температурному режимі в 200–225°С. Характер і послідовність термогравіметричних ефектів для кожного зразка матеріалу особливі, що пов’язане з відмінностями їх хімічного складу.

У необробленої деревини окрім ендотермічних процесів термодеструкції відбуваються екзотермічні процеси окиснення, про що свідчить хід кривої DTA в

області першого піка кривої DTG (рис. 3.2). Більш помітний екзотермічний ефект починається з температури 230°С, також спостерігається менший за величиною ендоефект в області 335°С.

Спостерігається наявність двох суттєво відмінних стадій деструкції у процесі нагрівання досліджуваного зразку незахищеної деревини, а саме характерною є перша стадія інтенсивної втрати маси до температур 380–390°С, що може бути обумовлена полуменевим горінням газоподібних продуктів, та друга повільніша стадія (за більш високих температур – 390–585°С), що обумовлена здебільшого вигорянням карбонізованого залишку і характеризується великим екзотермічним ефектом [13, 162].

Необхідно відзначити значні відмінності результатів термогравіметричного аналізу зразків необробленої соснової деревини (рис. 3.2) та зразків деревини, що оброблені антипіреном на основі суміші фосфатів та сульфатів амонію (2:1) (рис. 3.3) та ВВБЗР ДСА-1М (рис. 3.4). На рисунках 3.3 та 3.4 спостерігається зовсім невеликий екзотермічний ефект в області температур 215–335°С у порівнянні з рисунком 3.2. Значно повільніше змінюється температура (крива TG) у високотемпературній області термограм, що пов’язано з формуванням модифікованого шару кокса.

Детального аналізу потребують відмінності результатів термогравіметричного аналізу зразків деревини (кривих DTG і DTA), що проявляються для деревини обробленої синергітичною сумішшю на основі фосфатів та сульфатів амонію (водним розчином антипірену (рис.3.3)) та за наявності полімерного антисептика ПГМГФ (ВВБЗР ДСА-1М (рис.3.4)). Криві рисунків 3.3 та 3.4 значно відрізняються від кривих рисунку 3.2, що засвідчує про відсутність екзотермічних процесів, що, в свою чергу, говорить про значний охолоджувальний ефект. Помітно, що практично не відрізняється температура початку термоокислювальної деструкції вогнебіозахищених зразків деревини (180–205°С) і температура, за якої спостерігається максимальна швидкість деструкції (210–335°С).

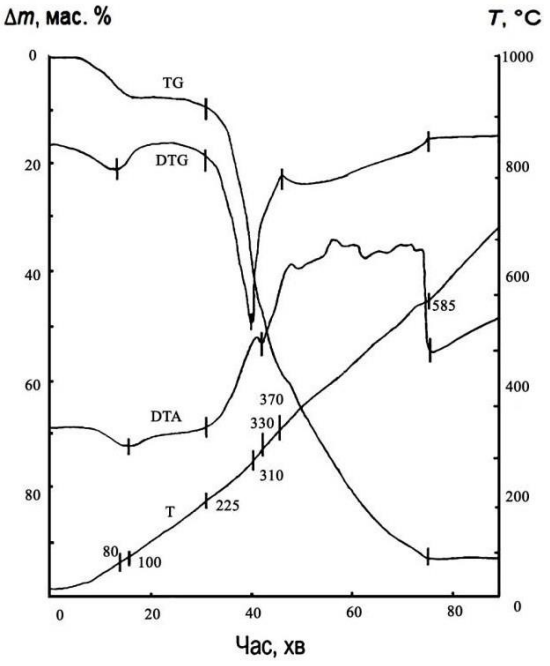


Рисунок 3.2 - Результати термогравіметричного аналізу зразків необробленої соснової деревини в нормальних умовах

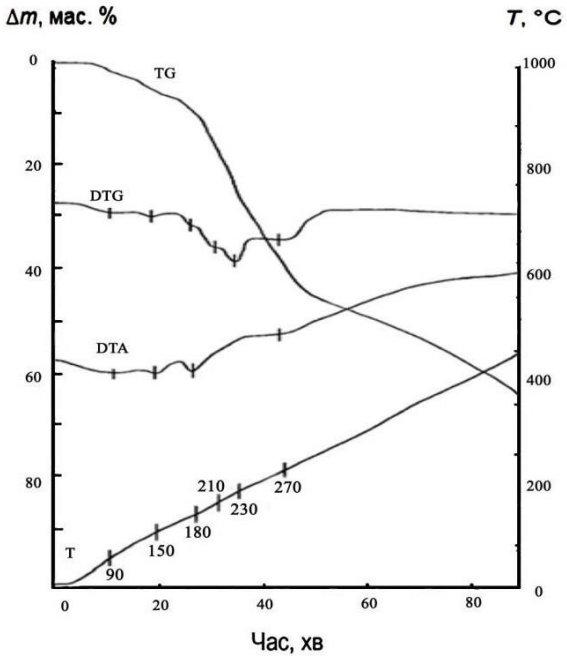


Рисунок 3.3 - Дериватограма зразка соснової деревини обробленої антипіреном на основі синергетичної суміші фосфатів та сульфатів амонію (2:1) в нормальних умовах

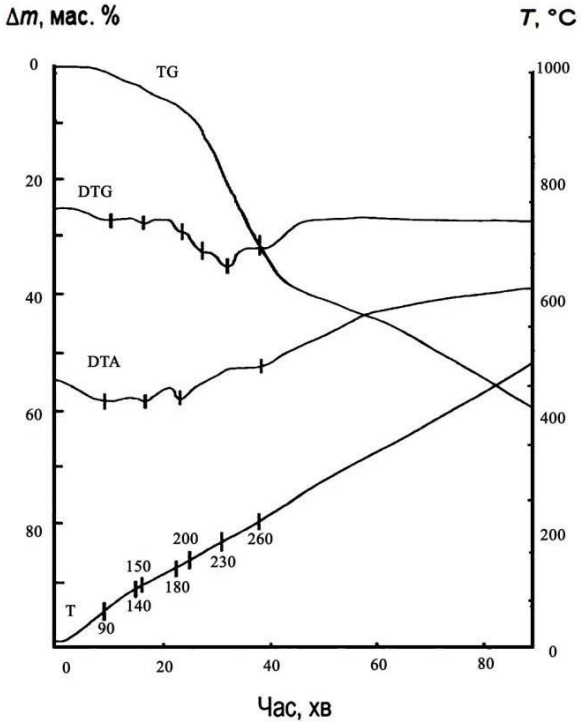


Рисунок 3.4 – Дериватограма зразка соснової деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-1М у нормальних умовах

В результаті порівняння термограм рисунків 3.3 та 3.4 не спостерігається суттєвих відмінностей. Імовірно відмінності спостерігатимуться при дослідженнях газоподібних продуктів термодеструкції і піролізу деревини.

Для одержання газоподібних продуктів термічної деструкції застосовували спеціальне обладнання на базі трубчатої електричної печі з терморегулятором, у якій можна підтримувати температуру до 800°С з точністю ±10°С. Таке обладнання дає змогу протягом одного досліду одержати і зібрати до 3 дм^3 газової суміші продуктів термодеструкції досліджуваного матеріалу [13, 162].

Склад продуктів термічної деструкції залежить від багатьох умов: виду горючого матеріалу, вологості, температурного впливу, динаміки надходження повітря тощо. Найвищий вміст горючих компонентів – у газоподібних продуктах, що утворюються внаслідок піролізу (термічного розкладу без доступу повітря).

Таблиця 3.3

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

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 – сумішшю 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	39,96	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
$C_2H_6+C_2H_4$	0,37	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
C_3H_8	0,21	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
C_3H_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

За наведеною в [13, 162] методикою були проведені дослідження та зібрані леткі продукти піролізу: незахищеної деревини; деревини, що оброблена ВВБЗР МС (антипірен – суміш фосфатів та сульфатів амонію, антисептик – фторид натрію); деревини, що оброблена антипіреном – сумішшю фосфатів та сульфатів амонію; деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-1М; деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-2М [95, 99, 162].

На зазначених пробах здійснено газохроматографічний аналіз. Результати аналізу наведено в таблиці 3.3.

Як видно з таблиці 3.3, після піролізу необробленої та обробленої деревини вогнезахисними засобами на основі фосфатів та сульфатів амонію, суміші продуктів термічної деструкції суттєво відрізняються за вмістом азоту та кількістю горючих газів. ВВБЗР МС, в складі якого є антисептик – фторид натрію, дає менше азоту та гірше впливає на зменшення горючих газів у порівнянні з простою сумішшю діамонійфосфату та сульфату амонію. Це відбувається внаслідок того, що фторид натрію є антагоністом до солей зазначених

антипіренів. А в ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М навпаки наявність полімерного антисептика призводить до зменшення кількості горючих газів, особливо водню та метану. Слід також зазначити, що із збільшенням кількості ПГМГФ (в ВВБЗР ДСА-2М порівняно із ДСА-1М) антипіренні властивості покращуються. Такі результати дозволяють стверджувати, що антисептик ПГМГФ є синергістом до сольових антипіренів ВВБЗР, а також бар'єром для дифузії кисню. Недостача кисню призводить до зменшення горючого газу CO, покращує процеси інгібування [238] та флегматизування горючих газів [95, 162]. Подібні результати були отримані в роботі [230].

3.2.4. Оптимальний склад компонентів водних вогнебіозахисних речовин для деревини

При визначенні оптимального складу ВВБЗР перш за все потрібно врахувати нормативні вимоги до засобів вогнезахисту, що наведені в підрозділі 3.1. До складу ВВБЗР повинні бути включені такі компоненти, які не наносять шкоду оточуючому середовищу, в тому числі й людині. Слід зазначити, що ці вимоги не враховувались при розробці традиційних ВВБЗР (див. розділ 1).

Оптимізаційний підхід передбачає використання компонентів в складі ВВБЗР в такій кількості і в такій комбінації, щоб реалізувались ефекти, розкриті в підрозділах 3.2.1-3.2.3, в тій мірі, щоб забезпечити нормативний рівень вогнебіозахисту захищеної деревини протягом максимального часу (бажано, протягом терміну експлуатації вогнебіозахищених дерев'яних конструкцій). При розробці складу ВВБЗР враховані переваги та недоліки складів традиційних ВВБЗР. В цьому контексті розглядали в якості прототипів кількісні та якісні співвідношення компонентів в складі антипіренів в засобах МС (15% діамонійфосфата + 15% сульфата амонію + 5% фторида натрію + 1% змочувача + 64% води) та МС (1:1) (10% діамонійфосфата + 10% сульфата амонію + 5% фторида натрію + 1% змочувача + 74% води), який використовувався тривалий час в технології глибокого просочення дерев'яних конструкції [208]. Відзначимо хибне використання в якості антисептика фторида натрію, оскільки він є

шкідливою сполукою для оточуючого середовища та людини (II клас небезпечності, високотоксична речовина [51]).

Як зазначено в розділі 1, під час експлуатації деревини, захищеної ВВБЗР МС, відбувається швидке висолювання антипіренів з деревини. В результаті достатній рівень вогнезахисту деревини втрачається вже через 1÷1,5 роки. На ефективність вогнезахисту засобом МС, без сумніву, впливає наявний ефект антагонізму при реалізації інгібуючого ефекту в умовах одночасної присутності в складі зазначеного засобу компонентів з вмістом атомів фосфору (в складі антипірена) та натрію (в складі антисептика) [244]. Це явище часто-густо не враховувалось і не враховується при розробці складів вогнезахисних та вогнегасних засобів. Наприклад, в роботі [128] пропонується використовувати водну вогнегасну речовину на основі суміші гідрофосфата та сульфата амонію в оптимізованому складі гелеутворюючої речовини. При цьому в роботі наведено дані, які свідчать, що при гасінні полум’я пожежі класу В запропонована вогнегасна речовина поступається вогнегасній ефективності водному розчину суміші гідрофосфата та сульфата амонію. Очевидно, що розробниками не врахований зазначений антагоністичний ефект, якій реалізується при одночасній присутності атомів фосфору та натрію. Наведений приклад підтверджує факт складності розробляння оптимізаційних алгоритмів, які б враховували різні за природою процеси.

Для використання синергетичного ефекту при реалізації інгібувального фактору доцільно використати в складі ВВБЗР в якості антипірену суміш діамонійфосфату та сульфату амонію у співвідношенні 2 : 1, як це показано в підрозділі 3.2.2.

Важливим кроком у створенні складу ВВБЗР є підбір полімерного антисептика. Доцільно використати розчин полімеру ПГМГФ, який є малотоксичною речовиною (III клас небезпечності за [250]). Як показано в підрозділі 3.2.1, нанесення плівки полімерного антисептика на поверхню деревини дозволяє реалізувати ефект ізолювання поверхню деревини від надлишкового доступу кисню та води в капілярно-пористу структуру деревини, а

також реалізувати біоцидні функції антисептика. Для струганої поверхні деревини достатній рівень досягається оброблянням поверхні деревини 1%-ним розчином ПГМГФ, а для пиляної поверхні знадобиться обробляння 2%-ним розчином ПГМГФ. В підрозділі 3.2.3 показано, що одночасне застосування антипірену з суміші діамонійфосфата та сульфата амонію в капілярах і порах поверхневого шару деревини та плівки полімерного антисептика, нанесеної на поверхню деревини, дає можливість реалізувати ефект охолодження та флегматизування горючих газів, що утворюються в процесі термодеструкції вогнебіозахищеної деревини.

При створенні оптимального складу ВВБЗР враховані фізико-хімічні властивості кожного компонента, зокрема його розчинність в воді та можливість утворенні істинних розчинів. Як показано в розділі 2 та підтверджено подальшими експериментальними дослідженнями, ефективність вогнезахисту верхнього шару деревини (3÷4 мм) досягається максимальним насиченням антипіренами. Скориставшись методикою, запропонованою в розділі 2.3, визначено оптимальну концентрацію антипіренів на основі фосфатів та сульфатів амонію із додаванням не менше 1% змочувача (піноутворювач повинен утворювати істинний розчин у водному розчині зазначеного антипірена). Результати представлено на рис. 3.5. Як видно з рисунку, оптимальне значення концентрації антипіренів дорівнює 30,398 %.

Таким чином, враховуючи можливості з реалізації всіх зазначених ефектів, що, при комплексній реалізації, забезпечують високий рівень вогнебіозахисту протягом максимального терміну, було розроблено оптимальний склад ВВБЗР для деревини, яка складається з двох частин. Перша частина - це водний розчин антипірену: 20% діамонійфосфату, 10% сульфату амонію, 1% змочувача (піноутворювача, що використовується для пожежогасіння [80]) та 69 % води. Друга частина – це водний розчин полігексаметиленгунідингідрофосфата відповідної концентрації: однопроцентний розчин для обробляння струганої поверхні деревини (ДСА-1М) та двухпроцентний розчин для обробляння пиленої поверхні деревини (ДСА-2М). Склади ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М запатентовані

в Україні, і для них розроблена необхідна нормативно-технічна документація [73, 247, 248].

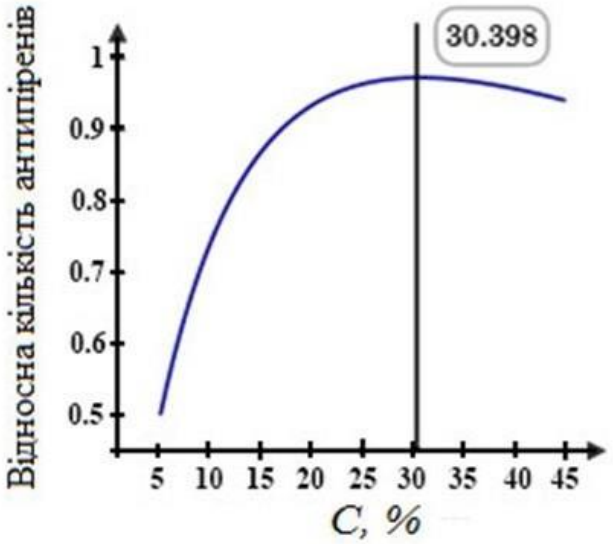


Рисунок 3.5 - Залежність сумарної відносної кількості антипіренів, що утримуються поверхневими шарами деревини в залежності від концентрації антипіренів на основі сульфатів та фосфатів амонію в просочувальному робочому розчині

3.3. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищеної деревини

3.3.1. Дослідження процесів займання та припинення горіння вогнебіозахищеної деревини

Вплив ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М на процеси займання та припинення горіння деревини, обробленої цими засобами, досліджували за методом і методикою, що наведено в [53]. Суть методу випробувань полягає у впливі полум’я пальника з заданими параметрами (початкова температура газоподібних продуктів горіння на виході з керамічної труби становить 200 ^{0}C $\pm$ 5 ^{0}C) на зразок вогнезахищеної деревини протягом 2 хвилин, який розташовано в керамічній трубі установки УВГВЕ, в умовах, що сприяють акумуляції тепла, та визначенні втрати маси зразка деревини після вогневих випробувань. Цей метод і

методика використовуються як для проведення наукових досліджень, так і для сертифікаційних випробувань ВВБЗР.

Наведемо результати сертифікаційних випробувань ВВБЗР ДСА-1М, що відбулися у 2017 р. (протокол №3/С-ЕВ-17). Зразки для випробувань являли собою прямокутні бруски з соснової деревини розміром (150 ± 1) мм × (60 ± 1) мм × (30 ± 1) мм, які були оброблені ВВБЗР ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини. Вологість зразків деревини перед просоченням становила 8 %, густина зразків – у межах (440-550) кг/м^3.

Вогнезахисне обробляння зразків ВВБЗР ДСА-1М проводилося способом поверхневого просочення в присутності представників ДЦС МНС України.

Витрата робочого розчину антипірену та робочого розчину антисептика при нанесені їх на зразки складає відповідно 548,6 г/м^2 та 200 г/м^2.Середнє поглинання маси ДСА-1М на зразках в перерахунку на суху речовину – 164,6 г/м^2.

Відбирання робочого розчину та зразків для випробувань проведено ДЦС МНС України.

Для випробувань використовували установку (УВГВЕ) для визначення групи вогнезахисної ефективності покриттів та просочувальних речовин для деревини. Установка метрологічно атестована, як і засоби вимірювальної техніки.

В залежності від величини втрати маси зразків ВВБЗР поділяють за ефективністю вогнезахисту на групи (табл. 3.4):

Таблиця 3.4

Групи вогнезахисної ефективності згідно з [53].

Втрата маси, %	Група вогнезахисної ефективності вогнезахисного засобу, що випробовується
Не більше 9 Більше 9, але не більше 25	I II

Якщо втрата маси зразків після випробувань становить більше 25 %, засіб не забезпечує вогнезахист деревини.

За результат випробування приймають середнє арифметичне десяти значень, округлене до 1 %.

Втрату маси зразка (Р) у відсотках розраховують за формулою:

$$P = (m_1 - m_2) \times 100/m_2, \quad (3.1)$$

де m_1 – маса зразка до випробувань, г; m_2 – маса зразка після випробувань, г.

Приріст маси покриття (R_1), г/м^2, визначають за формулою:

$$R_1 = (m_1 - m_0)/F, \quad (3.2)$$

де F – площа поверхні зразка, м^2; m_0 – маса зразка до нанесення засобу, г;

m_1 – маса зразка до випробувань, г.

Результати випробувань наведено у таблиці 3.5.

Середнє значення втрати маси зразків після вогневих випробувань, округлене до цілого числа, становить 6 %. Згідно з п. 6.1.1 ГОСТ 16363 [53] ВВБЗР ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини за умови її нанесення на зразки деревини з середньою витратою робочих розчинів антипірену і антисептика відповідно 548,4 г/м^2 та 200 г/м^2 (середнє поглинання маси сухих солей - 164,6 г/м^2) належить до I (першої) групи вогнезахисної ефективності.

Таблиця 3.5

Результати випробувань з визначення вогнезахисної ефективності ВВБЗР ДСА-1М згідно з [63].

№ зразка для випробувань	Маса зразка, г				Поглинання вогнезахисного засобу в перерахунку на суху речовину R_1, г/м^2	Втрата маси зразка після випробувань Δ m, %
	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

Додатково слід зазначити, що зразки вогнебіозахищеної деревини після заданого проміжку часу впливу висококалорійного джерела займання не загораються та не підтримують горіння. Отже, за зазначених умов застосування ВВБЗР ДСА-1М ефекти ізолювання, інгібування, охолодження та флегматизування реалізуються в такій мірі, що забезпечують ДСА-1М найвищу (відповідно до діючих нормативів) групу вогнезахисної ефективності.

3.3.2. Дослідження здатності до поширення полум'я поверхнею вогнебіозахищеної деревини

Здатність до поширення полум'я поверхнею горючих матеріалів є важливою характеристикою пожежовибухонебезпечності матеріалів за ГОСТ 12.1.044 [52] і визначається показником – індексом поширення полум'я. Його визначають як під час наукових досліджень, так і при сертифікаційних випробуваннях небезпечності речовин і матеріалів. Суть методу визначення індексу поширення полум'я згідно з п. 4.19 [52] полягає в оцінюванні здатності матеріалу займатися, виділяти тепло та поширювати полум'я по поверхні під дією теплового потоку. На зразок, що встановлений під кутом 30° до вертикалі, діє тепловий потік густиною від 12 кВт/м^2 до 32 кВт/м^2 від вертикально розташованої радіаційної панелі та полум'я газового пальника посередині нульової ділянки. За результатами випробувань визначають індекс поширення полум'я, як середнє арифметичне значень, одержаних для п'яти зразків за формулою (3.3):

$$I = \left\lceil \frac{0{,}0115 \cdot \beta}{\sqrt{\tau_0}} \cdot (t_{max} - t_0) \cdot (\tau_{max} - \tau_0) \cdot \left(1 + 0{,}2 \cdot L \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \tau_i \right) \right\rceil^2 \qquad (3.3)$$

де:

β - значення теплового коефіцієнта установки, β= 46,9 Вт/°С;

τ_o - тривалість проходження фронтом полум'я нульової ділянки, с;

t_{max} - максимальна температура димових газів у витяжному зонті, °С;

t_o - початкова температура у витяжному зонті, °С;

τ_{max} - проміжок часу від початку випробувань до досягнення максимальної температури, с;

L - відстань, на яку поширився фронт полум'я, мм;

τ_i - тривалість проходження фронтом полум'я і-ї ділянки поверхні зразка (i = 1,2,...9), с.

В залежності від одержаного значення індексу поширення полум'я матеріали класифікують як ті, що:

- не поширюють полум'я по поверхні (індекс поширення полум'я дорівнює 0);

- повільно поширюють полум'я по поверхні (індекс поширення полум'я становить більше 0 до 20 включно);

- швидко поширюють полум'я по поверхні (індекс поширення полум'я становить більше ніж 20).

За наведеним методом визначали здатність до поширення полум'я поверхнею деревини, вогнебіозахишеної ВВБЗР ДСА-1М ТА ДСА-2М. наведемо результати чергових сертифікаційних випробувань, які проводяться кожні два роки. відповідно до протоколу №243/1-2017 випробовувалась ввбзр дса-1м для поверхневої вогнебіозахисної обробки горищних покриттів (крокви, лати).

Випробуванням піддавали 5 (п'ять) зразків соснової деревини, які були оброблені ВВБЗР ДСА-1М. Вологість зразків деревини перед просоченням становила 8 %, густина зразків – у межах (440-550) кг/м^3. Розміри зразків 319 мм × 139 мм, середня товщина 20 мм. Вогнезахисне обробляння зразків ВВБЗР ДСА-1М проводили способом поверхневого просочення. Середні витрати робочого розчину антипірену та робочого розчину антисептика при нанесені їх на зразки склала відповідно 547,5 г/м^2 та 200 г/м^2. Середнє поглинання маси ДСА-1М на зразках в перерахунку на суху речовину – 164,3 г/м^2. Відбирання та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Кондиціювання зразків проводили за температури (20 ± 2) °С протягом 48 годин.

Таблиця 3.6

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

№ зразка	Температура димових газів, °С		Тривалість проходження фронтом полум'я нульової ділянки τ_o, с	Тривалість проходження фронтом полум'я і-ї ділянки τ_i, с									Проміжок часу до досягнення максимальної температури димових газів τ_{max}, с	Відстань, на яку поширився фронт полум'я, L, мм	Індекс поширення полум'я
	початкова t_0	максимальна t_{max}		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	33	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	582	14	0
2	32	56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	467	20	0
3	32	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	439	23	0
4	34	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	377	26	0
5	33	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	516	17	0
Середнє арифметичне значення індексу поширення полум'я по поверхні зразків															0

ПРИМІТКА: *Знак " - " у таблиці означає, що полум'я не поширювалось по поверхні зразка.*

Максимальна похибка результату вимірювання температури димових газів становить ± 2,8 °С.
Максимальна похибка результату вимірювання часу становить ± 0,7 с.
Максимальна похибка результату вимірювання довжини становить ± 1,4 мм.

Для випробувань використовували установку РП згідно з п. 4.19 [52] і засоби вимірювальної техніки, які метрологічно атестовані у встановленому порядку. Результати випробувань наведено у таблиці 3.6.

За результатами випробувань значення індексу поширення полум'я по поверхні випробуваних зразків становить 0. Згідно з п. 2.15.2 ГОСТ 12.1.044-89 [52] зразки середньою товщиною 20 мм деревини (сосна), що оброблені ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки горищних покриттів (крокви, лати) з середніми витратами робочого розчину антипірену та робочого розчину антисептика при нанесені їх на зразки відповідно 547,5 г/м^2 та 200 г/м^2 (середнє поглинання маси ДСА-1М в перерахунку на суху речовину – 164,3 г/м^2), належать до матеріалів, що не поширюють полум'я по поверхні.

3.3.3. Дослідження димоутворювальної здатності вогнебіозахищеної деревини та токсичності продуктів її горіння

Вогнебіозахищена деревина, що застосовується для пасивного ППЗО, може формувати пожежне навантаження внутрішніх і зовнішніх пожеж. За будівельними нормами і правилами [71] в закритих приміщеннях повинні застосовуватись матеріали з нормованими вимогами щодо димоутворювальної здатності. В приміщеннях з масовим перебуванням людей, наприклад, в пасажирських вагонах, повинні застосовуватись матеріали з помірною димоутворювальною здатністю [52]. Оскільки звичайна деревина є матеріалом з високою димоутворювальною здатністю (більше 500 м^2/кг), то без спеціального обробляння вона не може бути застосована на таких об'єктах.

Як показали дослідження [42], вогнебіозахисні матеріали на полімерній основі мають високу димоутворювальну здатність. Тому дослідження проводили з ВВБЗР ДСА-2М, бо в її складі міститься більший відсоток полімерного антисептика.

В якості результатів досліджень наведемо дані сертифікаційних випробувань з визначення коефіцієнта димоутворення зразків деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-2М згідно з п. 4.18 [52].

Випробуванням піддавалися 10 (десять) зразків матеріалу розміром 20 мм × 20 мм, середньою товщиною 10,0 мм. Відбір та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Просочення зразків деревини проводилося у спосіб гаряча-холодна ванна з середньою витратою робочого розчину антипірену 200,0 кг/м^3 (відповідно температура розчинів 55° С - 60° С та 20° С - 25° С з витримкою по дві години) та нанесення антисептика з витратою 400 г/м^2 на випробувальному полігоні УкрНДІПБ. Кондиціювання зразків проводилось при температурі 20 °С не менше 48 годин.

Для випробувань використовувалась установка визначення коефіцієнта димоутворення УД-1 згідно з 4.18 [52] і засоби вимірювальної техніки метрологічно атестовані.

Сутність методу експериментального визначення коефіцієнта димоутворення твердих речовин та матеріалів полягає у визначенні оптичної густини диму, який утворюється при полум'яному горінні або тлінні зразка твердого матеріалу певної кількості. Випробування зразків проводять у двох режимах. У режимі тління на зразок діє тільки тепловий потік густиною (35 ± 3,5) кВт/м^2, а у режимі полум'яного горіння – тепловий потік та полум'я газового пальника.

Коефіцієнт димоутворення (D_m) в м^2/кг визначається за формулою:

$$D_m = \frac{V}{L \times m} \ln \frac{T_0}{T_{min}}, \qquad (3.4)$$

де V - об'єм камери вимірювання, V =(0,664 ± 0,004) м^3;

L - шлях проходження променя світла у диму, L = (0,800 ± 0,002) м;

m - маса зразка, кг;

T_0, T_{min} - відповідно значення початкового та кінцевого світло-пропускання, %.

Для кожного з режимів випробувань визначають коефіцієнт димоутворення як середнє арифметичне результатів п'яти випробувань.

За коефіцієнт димоутворення матеріалу, що досліджується, приймають більше значення коефіцієнта димоутворення, яке обчислено для двох режимів випробування.

В залежності від одержаного коефіцієнта димоутворення розрізняють три групи матеріалів:

- з малою димоутворювальною здатністю – коефіцієнт димоутворення до 50 $м^2$/кг включно;

- з помірною димоутворювальною здатністю – коефіцієнт димоутворення більше 50 $м^2$/кг до 500 $м^2$/кг включно;

- з високою димоутворювальною здатністю – коефіцієнт димоутворення більше 500 $м^2$/кг.

Результати випробувань наведено в таблиці 3.7. Середнє значення коефіцієнта димоутворення в режимі тління складає 62,78 $м^2$/кг. Згідно з 2.14.2 [52] зразки деревини (сосни) середньою товщиною 10,0 мм, що просочені ВВБЗР ДСА-2М, класифікуються як матеріал з помірною димоутворювальною здатністю. Слід відзначити, що значення коефіцієнта димоутворення (62,78 $м^2$/кг) наближено до визначення першої групи матеріалів (з малою димоутворювальною здатністю), для якої цей коефіцієнт не повинен перевищувати значення в 50,0 $м^2$/кг. Отже, проведені дослідження засвідчують про позитивний вплив складу ВВБЗР ДСА-2М на процес димоутворення: вогнебіозахищена деревина класифікується як матеріал з помірною димоутворювальною здатністю, на відміну від незахищено деревини, яка класифікується як матеріал з високою димоутворювальною здатністю.

Під час виникнення пожежі вплив токсичних продуктів горіння може значно випереджувати дію інших небезпечних факторів пожежі (підвищену температуру оточуючого середовища та відкрите полум’я). Тому показник токсичності продуктів горіння увійшов як один з основних показників пожежної небезпеки будівельних матеріалів.

Статистичні дослідження [6] свідчать, що більше 70% загальної кількості загибелі людей на пожежах спричинено отруєнням продуктами горіння.

Потенційна небезпека на пожежах зростає у зв’язку з широким застосуванням у різні сфери праці та побуту людей горючих матеріалів. Одним з напрямків підвищення безпеки людей є застосування матеріалів, що мають низький рівень показників токсичності продуктів горіння.

Таблиця 3.7

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

Режим випробувань та густина тепло-вого 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**	

Примітка: Розміри зразків було визначено згідно з 4.18.3.5 ГОСТ 12.1.044-89 [52].
Похибка визначення маси зразків склала ± 0,010 г

Були проведені спеціальні дослідження з визначення токсичності продуктів горіння деревини, вогнезахищеної ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М.

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

В Україні та країнах Митного Союзу найбільше розповсюдження отримав метод визначення токсичності продуктів горіння матеріалів, регламентований згідно з [52].

Практична значимість показника потенційної токсичності матеріалів в Україні особливо зростає в останні роки у зв'язку з введенням Системи сертифікації матеріалів та виробів у галузі пожежної безпеки та виходом нових Державних будівельних норм, в яких нормується галузь застосування матеріалів.

З огляду на вищенаведене разом з відділом гігієни та токсикології ДП „УНДІ медицини транспорту" МОЗ України були проведені відповідні токсикологічні випробування дерев'яних зразків, що були оброблені ДСА-1М та ДСА-2М.

На першому етапі було проведено санітарно-хімічні випробування в режимі термоокислювальної деструкції (400°С) та полум'яного горіння за температури 750°С. Як зразок порівняння використовували деревину сосни сухої питомої густиною 0,443 г/см^3. Зразки кондиціювали в лабораторних умовах не менше 48 годин. Результати санітарно-хімічнних випробувань деревини, вогнезахищеної ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М приведено у таблиці 3.8.

Як видно з таблиці 3.8 при горінні матеріалу у повітрі запалювальної камери були визначені монооксид та діоксид вуглецю, у концентраціях, що можуть викликати гостре отруєння експериментальних тварин, а також інших у токсикологічно безпечних концентраціях (з позицій гострої токсичності).

На наступному етапі були проведені токсикологічні випробування, метою яких є визначення показника токсичності (H_{CL50}), що характеризується як відношення кількості матеріалу до одиниці об'єму замкнутого простору, продукти згоряння якого викликають загибель 50% піддослідних тварин. Експозиція становила 30 ±0,5 хв, концентрація кисню у камері перевищувала 18%. Під час випробувань використовували білих мишей вагою 20,0 ±2,0 г.

У кожному температурному режимі знаходили ряд значень залежності загибелі тварин від відношення маси зразку до об'єму експозиційної камери, який використовували для розрахунку показника токсичності H_{CL50} за допомогою пробіт-аналізу [52, 158, 162]. Результати представлені в таблицях 3.9, 3.10.

Таблиця 3.8

Міграція компонентів при моделюванні умов горіння деревини

Компонент	Визначені кількості продуктів горіння, мг/г			
	Деревина оброблена ДСА-1М		Деревина оброблена ДСА-2М	
	400°С	750°С	400°С	750°С
монооксид вуглецю	121,8	117,3	103,8	95,9
діоксид вуглецю	349,4	421,8	287,4	321
оксиди азоту	0,8	1,7	0,5	1,1
водень ціаністий	0,05	0,01	0,03	н.в.
фенол	0,81	0,13	0,84	0,19
оцтова кислота	6,1	3,4	5,1	1,6
формальдегід	0,05	0,008	0,08	0,11
вуглеводні C_1–C_{10}	3,8	2,2	2,1	0,8
бензол	0,5.	3,5	3,4	2,11
бутанол	0,5	0,1	0,2	0,1
метанол	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
ацетон	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
акрилонітрил	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
водень хлористий	0,7	3,4	0,64	0,96
акролеїн	0,04	0,2	0,22	0,29
аміак	1,45	0,3	1,13	0,1
втрата маси	63,1%	72,2%	62,1%	69,7%

Отже, в результаті випробувань токсичності продуктів горіння встановлено наступне: рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений головним чином дією монооксиду вуглецю. Мінімальне значення показника H_{CL50}, визначене за температури 400°С складає для деревини, обробленої ДСА-1М - 61,6 г/м^3 і для ДСА-2М – 72,8 г/м^3 відповідно, використали для встановлення величини показника токсичності продуктів горіння згідно з класифікацією за [52]. За цим показником досліджені матеріали відносяться до помірнонебезпечних матеріалів [52, 158, 162].

Таким чином, проведені дослідження свідчать про те, що за рахунок обробляння деревини ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М можливо суттєво знизити токсичність продуктів її горіння.

Таблиця 3.9

Результати розрахунків H_{CL50} для деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-1М

Наважка, г	Смертність, %	Місце концентрацій	Пробіти	Ваговий коефіцієнт
50,1	0	1,0	3,05	1,0
55,6	21	2,0	4,18	3,8
60,0	52	3,0	5,01	4,9
65,2	81	4,0	5,83	3,8
70,1	100	5,0	6,95	1,0

Таблиця 3.10

Результати розрахунків H_{CL50} для деревини, обробленої ВВБЗР ДСА-2М

Наважка, г	Смертність, %	Місце концентрацій	Пробіти	Ваговий коефіцієнт
65,2	0	1,0	3,03	1,0
70,1	32	2,0	4,41	4,3
75,6	51	3,0	5,05	5,1
80,6	82	4,0	5,81	3,8
85,0	100	5,0	6,98	1,0

Масова доля карбоксигемоглобіну в крові лабораторних тварин визначалась за спектрофотометричним методом. Результати токсикологічних випробувань наведено у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

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

400°С				750°С			
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

3.4. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на строки збереження вогнезахисних та експлуатаційних характеристик вогнебіозахищеної деревини на протязі її експлуатації

Показники (характеристики), яким повинна відповідати вогнебіозахищена деревина, визначається сферою її застосування. Найбільша сфера застосування вогнезахищеної деревини – це дерев’яні елементи горищних покриттів (крокви,

лати тощо). Відповідно до п. 4.21 [71] зазначені дерев'яні конструкції повинні бути оброблені вогнезахисним засобом, що забезпечує І групу ефективності за [53], яка визначається під час сертифікаційних досліджень, що розглянуто вище. Інші показники якості вогнезахищеної деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М досліджували під час проведення сертифікаційних випробувань за вимогами [64]: за п. 5.9 щодо визначення індексу поширення полум'я по поверхні, за п. 5.11 щодо визначення токсичності продуктів горіння вогнезахищеної деревини. Також було визначено коефіцієнт димоутворення вогнезахищених зразків деревини за п. 4.18 [64]. Для складання повного уявлення про характеристики вогнебіозахищеної деревини потрібно іще дослідити корозійну активність такої деревини по відношенню до чорних металів за п. 5.12 [64], що актуально для визначення можливого негативного впливу на міцність кріплення будівельних конструкцій. А також, потрібно дослідити термін збереження достатнього рівня вогнезахисту деревини на протязі її експлуатації.

Дослідження з визначення корозійної здатності вогнебіозахищеної деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-1М, проводили під час сертифікаційних випробувань. Основні параметри зразків з соснової деревини перед обробляннням, а саме: розміри, вологість, густина та маса, наведені в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Параметри зразків необробленої та обробленої деревини.

№ зразка для випробувань	Розміри зразка, мм	Вологість зразка перед просоченням, %	Густина зразка деревини, кг/м^3	Маса зразка, г		Витрата робочого розчину антипірену в перерахунку на суху речовину, г/м^2	Витрата робочого розчину антисептика в перерахунку на суху речовину, г/м^2
				до просочення	після просочення антипіреном та антисептиком (сухий стан)		
1	149,5 × 60,1 × 30,1	8	488,5	132,1	137,3	166,7	2,0
2	149,6 × 60,2 × 30,1	8	474,0	128,5	133,8	169,7	2,0
Середнє арифметичне значення						168,2	2,0

Обробляння зразків проводилось згідно з [58] .

Витрата робочого розчину антипірену та робочого розчину антисептика при нанесені їх на зразки складала відповідно 560,6 г/м^2 та 200,0 г/м^2 (в перерахунку на суху речовину відповідно 168,2 г/м^2 та 2 г/м^2).

Зразки перед випробуванням кондиціонували в ексикаторі з насиченим розчином азотнокислого цинку за температури (23 ± 2) °С до досягнення постійної маси (втрата маси через 24 години не більше 0,2 г).

Випробування з визначення корозійної дії зразків деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки горищних перекриттів (крокви, лати), проводили згідно з 5.12 - 5.15 [64]. До бокових поверхонь оброблених зразків (дерев'яних брусків) за допомогою гумових кілець прикріплювали по дві пластини, що виготовлені з листової сталі марки Ст3 та попередньо знежирені і зважені.

Зразки розташовували в ексикаторах над дистильованою водою (відносна вологість повітря 100 %) і витримували за кімнатної температури протягом 30 діб. Після закінчення цього терміну сталеві пластини відокремлювали від дерев'яних брусків і витримували протягом 15 хвилин у нагрітому до 70 °С 10 %-му розчині цитрату амонію (з додаванням аміаку до появи слабкого запаху) для розчинення продуктів корозії. Після цього пластини промивали дистильованою водою, висушували на повітрі і зважували.

Корозійну дію оцінювали за величиною швидкості корозії пластин (b), яку обчислювали за формулою:

$$b = \frac{m_1 - m_2}{s \cdot 720}, \qquad (3.5)$$

де m_1 - маса сталевої пластини до випробувань, г;

m_2 - маса сталевої пластини після випробувань, г;

s - площа поверхні сталевої пластини, м^2;

720 - тривалість випробувань, год.

Згідно з 3.5.10, 5.15 [64], вогнезахищену деревину вважають неагресивною, якщо швидкість корозії становить не більше, ніж 0,1 г/(м^2·год). Результати випробувань наведено в таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

Результати визначення корозійної дії зразків деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки горищних перекриттів (крокви, лати)

Маса пластини до випробу-вань m_1, г	Маса пластини після випробувань m_2,,г	Втрата маси пластини (m_1 - m_2), г	Ширина пластини, мм	Довжина пластини, мм	Площа пластини s, м^2	Корозійна дія (швидкість корозії), г/(м^2·год)	Норма згідно з ГОСТ 30219-95, г/(м^2·год)	Висновок про відповід-ність
21,3461	21,2821	0,0640	35,2	75,1	0,0026	0,0336		
21,8215	21,7496	0,0719	35,2	75,1	0,0026	0,0378		
21,2691	21,1986	0,0705	35,2	75,1	0,0026	0,0370		
21,4563	21,3814	0,0749	35,2	75,2	0,0026	0,0393		
Середнє значення						0,0369	не більше 0,1	відповідає

Похибка результату визначення втрати маси становить ± 0,0007 г

Похибка результату визначення площі становить ± 7·10^{-5} м^2

Похибка результату визначення швидкості корозії становить ± 2,3·10^{-3} г/(м^2 ·год)

За результатами випробувань згідно з пп. 5.12 - 5.15 [64] середнє значення корозійної дії зразків деревини, що були оброблені ВВБЗР ДСА-1М для поверхневої вогнебіозахисної обробки горищних перекриттів (крокви, лати), з середньою витратою робочих розчинів антипірену і антисептика відповідно 560,6 г/м^2 та 200,0 г/м^2 (в перерахунку на суху речовину відповідно 168,2 г/м^2 та 2,0 г/м^2), становить 0,0369 г/(м^2·год) і відповідають вимогам п. 3.5.10 [64] за показником корозійної дії вогнезахищеної деревини. Таким чином, якісний та кількісний склад ДСА-1М та ДСА-2М забезпечує відповідність властивостей деревини, вогнебіозахищеної цими засобами, нормативним вимогам щодо максимально допустимого рівня корозійної дії на чорні метали.

Як зазначалось в розділі 1, необхідний рівень вогнезахисту деревини на реальних об’єктах з плином часом швидко падає. Визначальною причиною цього є процес висолювання антипіренів. В розділі 2 представлено удосконалену феноменологічну модель процесу висолювання антипіренів з деревини при наявності плівки полімерного антисептика на її поверхні, що можливо реалізувати в ВВБЗР нового покоління. За результатами моделювання висунута гіпотеза про те, що гідрогель полімерного антисептика може служити ефективним бар’єром для висолювання антипіренів із вогнебіозахищеної деревини. На теперішній час провести дослідження дифузійного процесу за розглянутою моделлю при $D_{еф} = 10^{-10}$ м^2/с для неорганічних солей в гідрогелі полімерів не має технічної можливості. Тому скористаємось важливою для практики інтегральною характеристикою – збереженням вогнезахисної ефективності вогнебіозахищеної деревини під час експлуатації [8, 109], тобто на визначенні строку експлуатації вогнебіозахищеної деревини.

У науковій і технічній літературі зустрічаються різні назви строків експлуатації (служби) вогнезахисних виробів: «гарантійний строк служби», «строк служби», «встановлений строк служби», прогнозований строк служби» і т.п. Найбільш вдалим можна вважати тлумачення цих термінів в роботі [22]: «В технічній документації на засоби вогнезахисту доцільно надавати прогнозовані

строки служби та встановлені строки служби, які визначені за результатами випробувань з наявних умов експлуатації».

Для переважної більшості вогнезахищених виробів характерні наступні умови експлуатації (категорії розміщення) [22, 23, 69, 185]:

1) на відкритому майданчику;
2) під навісом, в приміщені, яке не опалюється;
3) в сухому приміщені, яке опалюється.

Вогнезахищені вироби з деревини, які оброблені сольовими просочувальними засобами, експлуатуються в приміщеннях другої та третьої категорії розміщення.

Були проведені дослідження щодо встановлення (спрогнозування) строку збереження ефективності вогнезахисту вогнезахищених виробів з деревини, які оброблені ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М та експлуатуються (зберігаються) в приміщеннях другої категорії розміщення.

В дослідженнях була використана методика натурних випробувань на зразках розміром 150 × 60 × 30 мм за визначенням групи ефективності вогнезахисту у відповідності до [53], а також методику натурних випробувань зразків вогнебіозахищеної деревини розміром 150 × 60 × 30 мм за визначенням групи горючості матеріалів відповідно до [52]. Це пов’язано з тим, що в деяких нормативних документах, наприклад у [179], внесені вимоги до вогнезахищених дерев’яних конструкцій як до важкогорючого матеріалу.

У 2007 році для дослідження довговічності збереження ефективного вогнезахисту були закладені на зберігання зразки вогнезахищеної деревини розміром 150 × 60 ×30 мм у натурних умовах (другої категорії розміщення) за [50] та [77].

Для просочення зазначених зразків було заготовлено 120 соснових брусків, з яких вибракувано зразки з пороками деревини та з невідповідністю вимогам стандартів щодо густини матеріалу. Залишили зразки з густиною в межах 400–550 кг/м^3. Було приготовлено дві серії зразків. Перша серія – це зразки деревини, які оброблені ВВБЗР ДСА-1М поверхневим способом за [58] із застосуванням

обприскувача, двічі обробили антипіреном та один раз антисептиком з інтервалом між обробками у 8 годин. Середня витрата сухих речовин складала від 10 г до 14 г на зразок, 300–400 г/м^2 або 37–49 кг/м^3. Друга серія – це зразки деревини, які оброблені ВВБЗР ДСА-2М із застосуванням способу «підігрів – холодна ванна» за тим же стандартом (відповідно температура розчину антипірена складала 55–60°С та 20–25°С) з витримкою по 2 години між зануреннями та кінцевим нанесенням водного розчину полімерного антисептика ПГМГФ через 8 годин. При цьому витрата сухих речовин складала від 16 г до 19 г на зразок, 370–583 г/м^2 або 53–73 кг/м^3.

У рамках випробувань десять вогнезахищених зразків, що оброблені ДСА-1М, випробували на ефективність вогнезахисту за [53].

Результати випробувань наведені в таблиці 3.14

Таблиця 3.14

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

№ зразка	Густина зразка, кг/м^3	Маса зразка, г				Поглинання маси сухих солей R_1, г/м^2	Температура димових газів t, °С	Втрата маси зразка після випробувань Δm, %
		до просочення m_0	після просочення антипіреном (сухий стан) m	після нанесення антисептика (сухий стан) m_1	після випробувань m_2			
1	539	145,5	155,5	155,6	141,9	303,1	257	8,8
2	546	147,5	158,7	158,8	147,2	369,3	214	7,3
3	535	144,6	155,5	155,7	142,4	362,7	213	8,5
4	547	147,7	158,7	158,9	146,8	366,0	229	7,6
5	530	143,2	153,4	153,6	141,0	339,9	189	8,2
6	546	147,4	161,8	161,9	151,1	473,8	193	6,7
7	539	145,5	156,8	156,9	145,8	372,5	188	7,1
8	547	147,6	158,8	158,9	147,4	369,3	180	7,2
9	544	146,9	158,3	158,5	147,1	379,1	218	7,2
10	541	146,2	157,5	157,7	145,5	375,8	252	7,7
Середнє арифметичне значення						373,8	213	8,0

Всі десять зразків показали втрату маси менше 9%, а тому висновок такий – ВВБЗР ДСА-1М відповідає І групі вогнезахисної ефективності. Звертає на себе увагу те, що, хоча всі зразки були калібровані за густиною матеріалу, вони поглинули різну кількість сухої речовини. Можна було спостерігати те, що

зразки, які мали більше смоляних кілець (спостерігалось візуально), поглинали менше антипірену. І такі зразки втрачали більшу масу під час випробувань.

Через рік, тобто в 2008 році, були проведені поточні випробування трьох зразків цієї серії за прискореною програмою за [53]. Результати випробувань засвідчують, що втрата маси зразків не перевищує 9 %. Тобто під час зберігання зразків на протязі 1 року вони не втратили ефективного вогнезахисту і тому ВВБЗР ДСА-1М забезпечує першу групу ефективності вогнезахисту деревини при зберіганні її в приміщеннях другої категорії розміщення.

У подальшому, на протязі 12 років, кожного року проводились аналогічні випробування. Динаміка зміни ефективності вогнезахисту зразків деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-1М, наведено на рисунку 3.6.

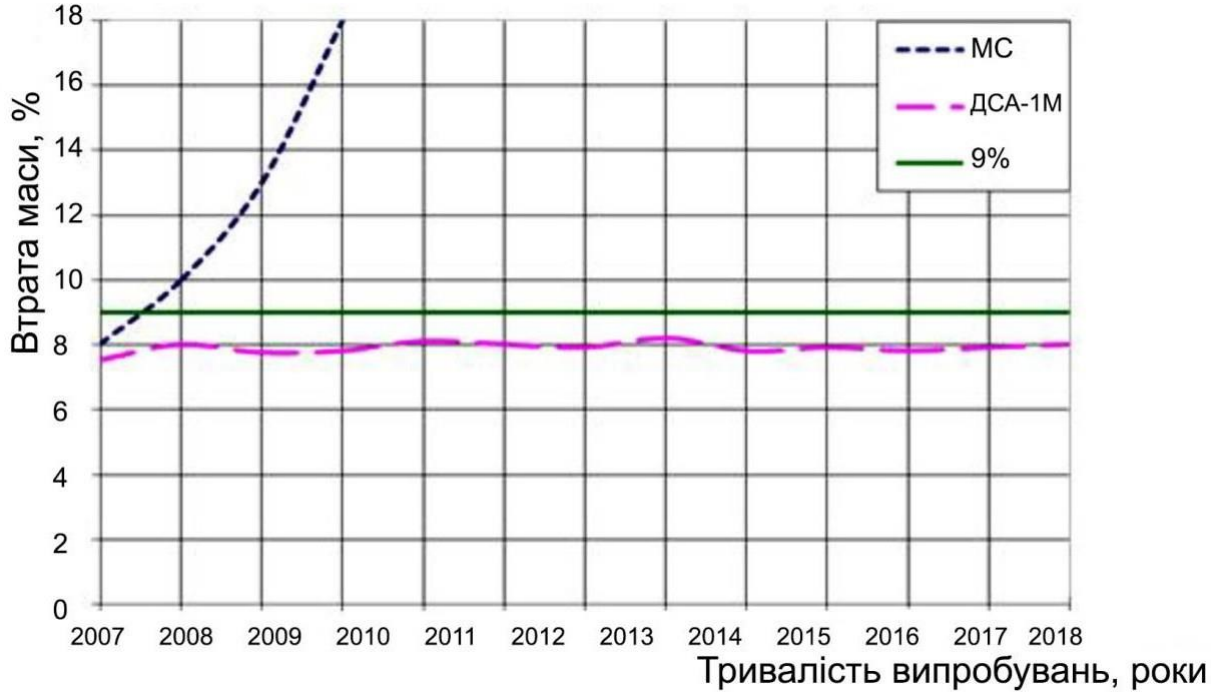


Рисунок 3.6 - Зміна вогнезахисної ефективності ВВБЗР ДСА-1М і МС (за показником втрати маси) залежно від тривалості натурних випробувань (II категорія розміщення)

З рисунку видно, що на протязі 12 років ефективність вогнезахисту не зменшилась, тобто протягом цього періоду зберігається перша група ефективності вогнезахисту для ВВБЗР ДСА-1М. Майже лінійна залежність зміни втрати маси зразків під час випробувань засвідчує стабільність цього засобу вогнезахисту.

На рисунку 3.6 також нанесені результати випробувань збереження ефективності вогнезахисту деревини ВВБЗР МС з роботи [20]. В цій роботі зазначено, що ефективність вогнезахисту деревини, що оброблена ВВБЗР МС, через пів року втрачає І групу ефективності і переходить до другої (за нормативною базою РФ). Автори [20] роблять загальний висновок, що ВВБЗР МС здатний до природного старіння під час експлуатації. З цим твердженням можна погодитись, але від загального пояснення можна перейти до більш конкретного пояснення, що ґрунтується на тлумаченні механізму вогнезахисної дії ВВБЗР МС.

До складу МС входять такі речовини як діамонійфосфат, сульфат амонію та фторид натрію. Хоча в ВВБЗР МС фторида натрію невелика кількість, всього 2 %, але ця сполука є сильним антагоністом до діамонійфосфату під час інгібування полум’яного горіння деревини [242, 244]. Прояв антагонізму особливо значуще відбувається в перші місяці зберігання вогнезахищених зразків деревини, що оброблені ВВБЗР МС [20].

Зовсім інша залежність спостерігається для вогнезахищених зразків деревини, що оброблені просочувальним ВВБЗР ДСА-1М. Як зазначалось вище, цим зразкам притаманна стабільність в зберіганні вогнезахисної ефективності, яка забезпечується декількома чинниками: в першу чергу синергізмом між діамонійфосфатом та сульфатом амонію під час інгібування полум’яного горіння деревини, а також підвищенням флегматизуючої дії антипіренів завдяки наявності полімерної плівки антисептика.

3.5. Дослідження впливу якісного і кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на подовження тривалості початкової стадії пожежі на об’єктах з пожежним навантаженням із деревини

В науковій і нормативно-технічній літературі з пожежної безпеки [26, 52] тривалість початкової стаді розповсюдження пожежі $\tau_{\text{псрп}}$ фіксують переходом від локальної до об’ємної пожежі, тобто моментом охоплення полум’ям всієї поверхні пожежного навантаження, і визначають рівнянням:

$$\tau_{\text{псрп}} = \left(\frac{\text{п}}{\frac{2}{\text{п}}}\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (3.6)$$

де $_{\text{п}}$ - площа пожежного навантаження, м^2;

$U_{\text{п}}$- швидкість поширення полум’я в ПСРП, м/с.

Як видно з рівняння (3.6), з точки зору протипожежного захисту, для подовження тривалості ПСРП потрібно шукати можливості зменшення швидкості поширення полум’я, оскільки площа пожежного навантаження визначається (обмежується) конструкційними параметрами. Отже, залишається можливість впливати на фізико-хімічні характеристики матеріалу пожежного навантаження. Це можливо зробити за рахунок використання водних вогнебіозахисних речовин шляхом реалізації комплексу протипожежних факторів: ізолювання, охолодження, інгібірування та флегматизування. Ступінь реалізації зазначених факторів можна оцінити інтегральною характеристикою матеріалу пожежно го навантаження – температурою займання.

Займання – полуменеве горіння речовини, що ініційоване джерелом запалення і продовжується після його видалення. Температура займання ($T_з$) – найменша температура речовини, за якої в умовах спеціальних випробувань речовина виділяє гарячу пару і гази з такою швидкістю, що при дії на них джерела запалювання спостерігається займання [52]. Значення $T_з$ визначають експериментальним методом за п.4.7 [52]. Сутність його полягає у нагріванні визначеної маси речовини із заданою швидкістю, періодичним підпалюванні парів і газів, що виділяються, і встановлення факту наявності або відсутності займання при фіксованій температурі.

Самозаймання – різке збільшення швидкостей екзотермічних об’ємних реакцій, що супроводжуються полуменевим горінням та/або вибухом. Температура самозаймання ($T_{сз}$) – найменша температура оточуючого середовища, при якій в умовах спеціальних випробувань спостерігається самозаймання речовини. Сутність метода визначення $T_{сз}$ полягає у введенні визначеної маси речовини в нагрітий об’єм і оцінюванні результатів випробування. Змінюючи

температуру випробування, знаходять її мінімальне значення, при якому відбувається самозаймання речовини (п.4.9 [52]).

В таблиці 3.15 наведено результати визначення $T_з$ та $T_{сз}$ зразків необробленої деревини та деревини різних порід, вогнезахищеної ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М [98, 99, 162].

Таблиця 3.15

Визначення температури займання та самозаймання необроблених зразків деревини різних порід та вогнебіозахищених зразків цих порід ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М.

Параметр	Необроблені зразки			Зразки, оброблені ВВБЗР ДСА-1М			Зразки, оброблені ВВБЗР ДСА-2М		
	сосна	вільха	береза	сосна	вільха	береза	сосна	вільха	береза
$T_з$, ^{0}C	232	233	233	372	378	378	410	400	415
$T_{сз}$, ^{0}C	438	446	446	462	462	465	490	485	485

Результати, наведені в таблиці 3.15, свідчать, що температура займання та самозаймання в ряду ”сосна – вільха – береза” відрізняється на незначну величину - 5÷10 ^{0}C. Для необробленої деревини різниця між температурою займання та температурою самозаймання складає 210 ^{0}C. Оброблення деревини засобом ВВБЗР ДСА-1М значно підвищує як температуру займання, так і температуру самозаймання до 375 ^{0}C та 460 ^{0}C, відповідно. Отже, вогнезахищена деревина має на 140^0 C вищу температуру займання по відношенню до необробленої та на 30^0 C вищу температуру самозаймання. Температура займання вогнезахищеної деревини, яка визначалась після обробляння вогнебіозахисним засобом ДСА-2М , значно відрізняється від температури займання необробленої деревини: вона підвищується на 175 ^{0}C. Температура самозаймання вогнезахищеної деревини (засобом ДСА-2М) відрізняється від температури самозаймання незахищеної деревини на 40^0 C. Для вогнезахищеної деревини різниця між температурою самозаймання та температурою займання складає 70÷85 ^{0}C. Порівнюючи засоби ДСА-1М та ДСА-2М, необхідно відзначити, що на 30÷40 ^{0}C температура займання і температура самозаймання вище у деревини, вогнезахищеної ВВБЗР ДСА-2М. Це вказує на те, що якісний та кількісний склад ВВБЗР впливає на

підвищення як температури займання, так і температури самозаймання вогнебіозахищеної деревини.

Нас буде більше цікавити температура займання деревини, оскільки більше 60% пожеж виникають в результаті необережного поводження з вогнем. Тобто спочатку стороннє джерело займання діє на пожежн е навантаження з деревини. Відповідно до літературних джерел через 5-8 хвилин від початку горіння завершується ПСРП, коли пожежне навантаження з деревини не вогнезахищена. Коли ж на об'єкті проведені роботи з вогнебіозахисту пожежного навантаження, потрібно витратити тепло та час для досягнення температури займання вогнебіозахищеної деревини, яка перевищує температуру займання необробленої деревини на 140÷170 ^{0}C.

Крім того, застосування водних вогнебіозахисних речовин нового покоління, таких як ДСА-1М та ДСА-2М, на стільки змінює фізико-хімічні властивості деревини, що вона майже не поширює полум'я по поверхні (індекс поширення полум'я по поверхні дорівнює нулю, див п.3.3). Отже, можливо створення передумов, коли ПСРП буде визначатись вигоранням джерела займання. В розділі 6 досліджено вплив джерела горіння матеріалу пожежі класу В (бензин марки А-76) на вогнестійкість фрагмента макета дерев'яного горища, який оброблено ВВБЗР ДСА-2М. Тривалість горіння джерела становило 900 ± 40 с. По завершенню експозиції вогнебіозахищена деревина не загорілась і не спостерігалось поширення полум'я поверхнею. Тривалість випробувань можна вважати за час ПСРП на об'єкті з пожежн им навантаженням із вогнебіозахищеної деревини. Отже, цей час перевищує нормативний час прибуття пожежно-рятувальних підрозділів в Україні (300 с - в містах, 720 с – в сільській місцевості [200]).

3.6. Феноменологічна модель вогнезахисту деревини, що оброблена екологічно безпечними водними вогнебіозахисними речовинами ДСА-1М, ДСА-2М

Процеси вогнезахисту, що розглянуті вище, визначаються різноманітністю, складним взаємозв'язком і послідовністю явищ, для більш повного розуміння яких доцільно дати їх феноменологічний опис (феноменологічну модель). До цього також спонукає наявність в літературних джерелах неоднозначних тлумачень щодо термінології при розкритті суті процесу вогнезахисту.

Отримані дані з проведених вище теоретичних та експериментальних досліджень хімічних, фізичних, фізико-хімічних, термічних та інших властивостей як ВВБЗР ДСА-1М і ДСА-2М, так і вогнебіозахищеної деревини, що оброблена цими засобами, а також дані встановлених закономірностей впливу якісного та кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на процеси займання розповсюдження та припинення горіння вогнезахищеної деревини, дозволяють представити феноменологічну модель вогнезахисту деревини, що оброблена зазначеними ВВБЗР. Враховуючи те, що більш широке застосування для пасивного ППЗО має ВВБЗР ДСА-2М, а також незначну відмінність між ДСА-1М та ДСА-2М, будемо розглядати феноменологічну модель для вогнезахищеної деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-2М.

ВВБЗР ДСА-2М складається з двох частин [247, 248]: водного розчину сольової суміші сульфатів та фосфатів амонію із змочувачем, водного розчину полімерного антисептика полігексаметиленгуанідингідрофосфата. Деревина спочатку просочується водним розчином антипірену. Після сушки в капілярах і порах деревини залишаються кристалогідрати антипірену. В подальшому деревину обробляють водним розчином полімерного антисептика. Після сушіння поверхня деревини вкривається тонким шаром плівки полімерного антисептика. Така деревина стає вогнебіозахищеною.

Між звичайними сольовими антипіренами, що традиційно використовувались протягом минулих десятиліть, та ДСА-2М існують значні відмінності. Наприклад, ВВБЗР МС, хоча також складається з антипірена та

антисептика, має принципово інший механізм вогнезахисту. Антипірен ВВБЗР МС складається з подібної суміші фосфатів та сульфатів амонію, а в якості антисептика використовується фтористий натрій. Після просочення деревини зазначеним вогнебіозахисним засобом та після подальшого сушіння в капілярах і порах залишаються кристали (кристалогідрати) солей антипірена та антисептика. В подальшому при позитивній температурі відбуваються наступні процеси. При збільшенні вологості повітря молекули води адсорбуються капілярами та порами поверхності деревини. У воді розчиняються солі антипірена та антисептика, а капілярні сили виносять розчин на поверхню деревини. При подальшому зниженні вологості атмосфери знову висолюються в процесі випаровування води. Отже розглянуті фізичні процеси призводять до поступового висолювання антипірена та антисептика на поверхні деревини. З часом за рахунок гравітаційних сил солі обсипаються з поверхні деревини і тому ефективність вогнезахисту деревини неуклінно знижується і через декілька років досягає неприпустимо низького рівня.

Зовсім інший механізм зберігання вогнебіозахисних властивостей має деревина, що оброблена ВВБЗР ДСА-2М [162, 166]. При позитивній температурі також відбувається рівноважний процес поглинання/випаровування парів води атмосфери. Але регулятором дифузійних процесів при цьому виступає полімерна плівка антисептика. Оскільки полімерна плівка має спорідненість до води, то вона утворює гідрогель і молекули води за рахунок прискореної дифузії можуть поступати в капіляри та пори деревини і там утворювати кристалогідрати та розчини солей антипірена. При знижені вологості повітря молекули води можуть дифундувати у гідрогель полімерного антисептика у зворотному напрямі, а от солі антипірена не можуть проникати через гідрогель полімеру, оскільки відсутня спорідненість молекул солей до молекул полімеру. В присутності солей молекули полімера змінюють свою конформацію [176, 235]. Тобто полімерна плівка стає бар’єром для процесу висолювання, що також підтверджується морфологічними спостереженнями за станом поверхні вогнебіозахищених зразків деревини розміром 150х60х30 мм на протязі 12 років. Полімерна плівка також служить

дифузійним бар'єром для молекул кисню в капіляри і пори вогнебіозахищеної деревини, що підтверджується газово-хромотографічним аналізом продуктів термічної деструкції зразків деревини сосни.

В процесі вогнебіозахисного обробляння деревини ВВБЗР ДСА-2М утворюється захищений поверхневий шар деревини, який морфологічно складається з двох частин. Нижня, більша його частина (капіляри і пори) в залежності від вологості оточуючого середовища заповнена кристалами або кристалогідратами суміші неорганічних солей антипірена. Верхня його частина являє собою полімерну плівку антисептика полігексаметиленгуанідингідрофосфата, що вкриває капіляри і пори поверхні деревини. Ця полімерна плівка відіграє велике значення в механізмі вогнезахисту, оскільки виконує роль бар'єра для зволоження деревини, служить бар'єром для висолювання антипірену на поверхню деревини, а також служить бар'єром для проникнення додаткового кисню в цей шар на початковій стадії впливу теплоти на вогнебіозахищену деревину (реалізується ефект ізолювання).

З підвищенням температури у вогнебіозахищеному шарі деревини до 75 ^{0}C в нижній його частині розпочинається прояв ефектів охолодження та флегматизування: плавлення кристалогідратів діамонійфосфата з утворенням моноамонійфосфата та газоподібних речовин (NH_3, H_2O, N_2). При досягненні температури значення 100 ^{0}C розпочинається випаровування води, вихід газів за механізмом прискореної дифузії через полімерну плівку антисептика. В той же час полімерна плівка є бар'єром для дифузії молекул кисню з повітря в капіляри і пори деревини, що позначається на процесі термодеструкції макромолекул целюлози і на якісному складі газів. В продуктах деструкції відсутній водень, а інші гази зафлегматизовані продуктами термічного розкладу фосфатів та сульфатів амонію. При температурі вище 175 ^{0}C в об'ємах капіляр і пор починаються ланцюгові реакції окиснення метану, етану та інших речовин, але в присутності продуктів термічного розкладу антипіренів будуть утворюватися іон-молекулярні та іон-радикальні комплекси між ними та активними центрами ланцюгових реакцій. Тобто відбуватимуться реакції гомогенного та гетерогенного

інгібування горючих газів. При чому при співвідношенні фосфатів і сульфатів амонію як 2:1 спостерігається синергетичний ефект в реалізації інгібувального фактору.

При температурах 190 – 250 ^{0}С відбувається прискорення деструкції деревини, що призводить до утворення модифікованого антипіренами шару коксу. Цей шар виконує функцію термічного бар'єру по відношенню до глибших шарів деревини (ненасичених антипіреном). Необхідно відзначити, що на поверхні модифікованого коксу не утворюється жар, тобто відсутнє конденсоване горіння коксу, що для звичайної деревини стає джерелом займання. При виході на поверхню шару модифікованого коксу газові продукти деструкції залишаються зафлегматизованими, полум'яне горіння відсутнє, що пояснюється реалізацією комплексу факторів: ізолювання, охолодження, флегматизування та інгібування.

Найбільша інтенсивність деструкції деревини відбувається в температурному діапазоні 230 – 350 ^{0}С. На поверхні модифікованого шару коксу з'являються тріщини, які з підвищенням температури збільшуються і їх глибина досягає шару незахищеної деревини. По тріщинам прискорюється теплопередача до деревини, що прискорює, в свою чергу, її деструкцію і концентрація горючих газів збільшується. Газове середовище над модифікованим коксом поступово переходить з області нижньої концентраційної межі займання до зони горіння. При температурі 400 ^{0}С полімерна плівка антисептика також перетворюється на кокс.

Коли джерелом займання є відкрите полум'я, то при температурі 410 ^{0}С концентрація горючих газів деструкції вогнезахищеної деревини досягає межі горіння, і тому спостерігається стійке горіння. Зазначена температура є температурою займання деревини, вогнезахищеної ВВБЗР ДСА-2М. Слід зазначити, що при цьому на поверхні модифікованого коксу не утворюється необхідного жару, який міг би забезпечити рівноважну фазу горіння. Тому при відстороненні полум'яного джерела займання горіння газів припиняється. Для утворення жару на поверхні необхідний певний час впливу джерела займання і підвищення температури вище температури самозаймання вонезахищеної

деревини, наприклад, до температурного діапазону 490 – 563 ^{0}C. Такий широкий температурний діапазон пов’язаний з тим, що для досягнення рівноважного процесу горіння необхідне певне вигорання модифікованого коксу, а цей процес є неоднорідним по поверхні вогнезахищеної деревини. Це підтверджується експериментальними дослідженнями: відсутністю поширення полум’я по поверхні вогнебіозахищеної деревини.

Отже, представлені тлумачення процесу вогнезахисту деревини розкривають причини подовження тривалості початкової стадії пожежі на об’єктах з пожежним навантаженням із вогнебіозахищеної деревини.

Таким чином, розроблена феноменологічна модель вогнезахисту деревини із застосуванням водної вогнебіозахисної речовини ДСА-2М формує уяву про процеси вогнезахисту деревини сольовими антипіренами, що підсилені синергітичною дією полімерного антисептика. Зазначена модель розкриває сутність механізму вогнезахисту деревини і може буди використана для вдосконалення існуючих та для розроблення нових ефективних засобів вогнебіозахисту деревини.

3.7. Загальні вимоги щодо розроблення і застосування водних вогнебіозахисних речовин для протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням із тканин, паперу, очерету

Зазвичай пожежне навантаження із тканин, паперу, очерету в кількісному плані поступається виробам із деревини, однак ці матеріали складають більшу небезпеку, оскільки здатні займатися від малокалорійного джерела запалювання. Під час пожежі ці матеріали сприяють швидкому поширенню полум’я в приміщеннях, блокуванню шляхів евакуації людей. Текстильні матеріали під час горіння мають високу димоутворювальну здатність, а газоподібні продукти їх термічного розкладу є високотоксичними [1, 74]. Отже, зазначені матеріали часто роблять вирішальний вклад у втрату функціональності об’єктів внаслідок пожеж та стають основною причиною загибелі людей. Серед цих матеріалів найбільш

широке застосування знайшли тканини, тому при подальших дослідженнях саме їм приділено найбільшу увагу.

Тканини використовуються для виготовлення штор, занавісок, спеціальних захисних драпіровок, декоративного оздоблення інтер'єру, меблів тощо. Їх розрізняють в основному за складом (натуральні, штучні, суміші), за способом виготовлення, структурою і будовою волокон (ниток), а також за густиною і товщиною полотен.

На теперішній час приблизно 50 % промислового випуску тканин складають штучні тканини, а серед них близько 80 % складають тканини із суто хімічно синтезованих волокон, причому 65 % випуску займає виробництво поліефірних волокон. Перспективу набувають тканини із сумішей натуральних і штучних волокон. Естетика оздоблення приміщень висуває особливі вимоги до тканин.

За показниками пожежної небезпеки тканини значно відрізняються від деревини, хоча й відносяться до целюлозовмісних матеріалів [42, 151, 184, 200, 205].

Текстильні матеріали, як і деревина, є анізотропними матеріалами, тобто в різних направленнях ці матеріали мають неоднакову структуру, тому коефіцієнт теплопровідності для одного і того ж матеріалу не є постійною величиною і залежить від направлення теплового потоку відносно волокон, їх питомої ваги, пористості, густини, температури, вологості, повітряпроникності матеріалу [172].

Питома теплоємність характеризує властивість матеріалу поглинати тепло при збільшенні температури. Для текстильних матеріалів теплоємність змінюється в межах від 2150 до 1130 Дж/(кг·К) [172].

Незважаючи на існуючи розходження між текстильними матеріалами за складом і зовнішнім виглядом, вони виявляють ряд однакових властивостей. Всі вони при нагрівання розкладаються, з плавленням або без нього.

До загальних властивостей текстильних матеріалів необхідно віднести їх здатність при термічному розкладанні виділяти легкозаймисті гази та пару і залишати (у звичайних умовах) твердий залишок (кокс).

На характер протікання термічного розкладу матеріалів впливає ряд фізичних і фізико-хімічних процесів [161]. Найважливішими серед них є:

- переміщення горючих речовин і продуктів реакції горіння (процес дифузії);
- виділення і поширення тепла (процес теплопередачі);
- аеродинамічні умови, що забезпечують перенос тепла і речовин (процес конвекції).

Загоряння текстильних матеріалів у більшості випадків супроводжується появою полум’я, в якому відбувається екзотермічна реакція взаємодії газоподібних продуктів матеріалу з киснем [7, 147]. Якщо при розкладанні матеріалу виділяється недостатня кількість парів або газів (характерно у визначених умовах для пористих целюлозовмісних матеріалів), він буде горіти без полум’я (безпосередньо на поверхні, процес тління) [147].

Як зазначено в розділі 1, істотним фактором,який впливає на швидкість горіння матеріалу, є величина співвідношення П:О, або П:В, де П – повітря, О – об’єм, В – вага. Чим більші ці величини, тим більша швидкість горіння.

Для текстильних матеріалів, структура яких представляє собою сполучення великої кількості волокон (ниток), переплетених в різних напрямах, величина зазначених співвідношень має надзвичайно велике значення.

Горючість багатьох текстильних матеріалів може бути дещо знижена шляхом внесення змін в їх структуру. Більш густе переплетення волокон, щільніше скручення пряжі знижують швидкість горіння. Тобто зазначені механічні методи, спрямовані на одержання більш рівної та щільної поверхні тканин, одночасно сприяють зниженню горючості матеріалу, оскільки зменшується доступ кисню з повітря до поверхні волокон (ниток) тканин.

Деяке зменшення швидкості горіння тканин досягається за рахунок комбінування в складі тканин горючих волокон та волокон із зниженою горючістю. У зв’язку з цим достатньо велику долю з тканин, що випускаються текстильною промисловістю, становлять тканини із змішаних волокон: поліефір-бавовна, поліефір-віскоза [7, 146, 147]. При цьому одночасно використовуються

переваги хімічних волокон перед натуральними: однорідність волокон за товщиною, висока міцність, стійкість до багаторазової деформації тощо.

До основних способів вогнезахисту волокон і текстильних матеріалів відносять [146]:

- використання термостійких волокноутворюючих органічних полімерів;
- застосування неорганічних волокон;
- модифікація волокноутворюючих полімерів на стадії їх синтеза;
- модифікація волокна на стадії його формування шляхом використання стабілізаторів і сповільнювачів горіння реакційного і адитивного типу;
- поверхневе або об'ємне обробляння волокон, тканин, готових виробів з тканин.

Найбільш поширеним способом вогнезахисту текстильних матеріалів є поверхневе або об'ємне обробляння з використанням сповільнювачів горіння (антипіренів) [151]. Підхід до вибору сповільнювачів горіння для різного складу текстильних матеріалів може бути різним. Зокрема для целюлозних текстильних матеріалів та матеріалів із сумішей целюлозних та поліефірних волокон використовують ВВБЗР на основі неорганічних солей: буру та борну кислоту (ББ-11, БС-13), амонійні солі фосфорної та сірчаної кислоти. Ці антипірени впливають, в основному, на процеси, що відбуваються в конденсованій фазі, сприяють збільшенню нелеткого коксового залишку та зменшенню кількості горючих продуктів розкладу волокон. Суттєвим недоліком зазначених ВВБЗР є поступова міграція антипіренів на поверхню тканини за механізмом висолювання, що з часом приводить до зменшення вогнезахисної ефективності, зміни кольору і погіршення зовнішнього вигляду тканини.

Оскільки волокниста структура тканин значно відрізняється від капілярно-пористої структури деревини, не вдається застосувати підхід до вогнезахисту, який використано під час розроблення ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М. Дійсно, після застосування ДСА-1М та ДСА-2М для вогнезахисту тканин, останні втрачають свою еластичність. В даному випадку таку негативну властивість вогнезахищеній тканині надає полімерний антисептик. Однак, відмовитись від антисептиків у

складі ВВБЗР для тканин вкрай не бажано, оскільки фосфоровмісні антипірени схильні до біоруйнування, а це спричиняє й руйнування тканини, що, в свою чергу, суттєво знижує сферу її застосування.

Прогресивним науково-технічним рішенням слід вважати створення композиції для вогне- та біозахисту тканини і паперу за деклараційним патентом України № 3025 [192], в якому співвідношення інгредієнтів (%, мас):

- ортофосфорна кислота - 6-50;
- карбамід - 3-50;
- полігексаметиленгуанідинфосфат (хлорид) – 0,01-20;
- вода – решта.

Для використання зазначеної композиції були розроблені тухнічні умови ТУ У 24.6-32528450-002-2004 «Композиція просочувальна для поверхневого вогне-та біозахисту тканин і паперу [249].

В роботі [27] із зазначеною композицією були проведені дослідження щодо теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження умов захисту тканин і паперу від загоряння та біологічного руйнування із застосуванням просочувальної композиції біфункціонального призначення [192] для зниження пожежної небезпеки. В цій роботі було визначено оптимальне співвідношення компонентів у водному розчині просочувальної композиції, що містить 22 % фосфату сечовини та 1% «Гембару». Оптимізацію проведено за фактором димоутворення. У фосфаті сечовини було встановлено стехіометричне співвідношення карбаміду до ортофосфорної кислоти як 2:1. Таке співвідношення не відповідає результатам теоретичних та експериментальних досліджень розділів 2 та 3. Навпаки, синергетичного посилення інгібувального ефекту сумішшю азотовмісних та фосфоровмісних хімічних сполук слід очікувати при співвідношенні 1:2.

Водна композиція суміші карбаміду, ортофосфорної кислоти та полімерного антисептика «Гембар» для вогнебіозахисту тканин отримала технічну назву ФСГ-1, для паперу – ФСГ-1К (для зменшення «жорсткості» паперу додавали крохмаль).

Виходячи з умов експлуатації об’єкта і основного завдання вогнезахисту тканин, паперу, очерету (перевести матеріали у важкозаймистий стан), а також, враховуючи особливості структури зазначених матеріалів, теоретичні дослідження (див. розділ 2) та досвід розроблення ВВБЗР ФСГ-1, можна сформулювати наступні вимоги до ВВБЗР для тканин, паперу, очерету:

1) ВВБЗР повінні характеризуватись здатністю до реалізації ефектів: охолодження, інгібування, ізолювання, флегматизування;

2) ВВБЗР за своєю ефективністю вогнезахисту повинна мати здатність перевести легкозаймисті тканини в групу важко займистих матеріалів;

3) ВВБЗР у своєму складі повинна мати атоми фосфору та азоту, при чому співвідношення фосфоровмісних сполук до азотовмісних сполук повинно бути 2:1;

4) ВВБЗР повинна мати властивості поверхнево-активних речовин для сприяння «обгортанню» волокон вогнезахисною речовиною;

5) ВВБЗР повинна мати антисептичні властивості;

6) ВВБЗР повинна мати здатність до зменшення токсичності продуктів термічного розкладу волокон тканин;

7) ВВБЗР повинна мати здатність до зменшення димоутворення.

3.8. Обгрунтування складу водної вогнебіозахисної речовини нового покоління для протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням із тканин, паперу і очерету

В літературних джерелах не вдалося знайти відомості про ВВБЗР, що відповідають визначеним вище вимогам. Під час розроблення складів ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М було відзначено специфічні властивості полімерного антисептика полігексаметиленгуанідина, який у водорозчинний стан переводиться за допомогою кислот. Водні розчини його в деякій мірі можуть задовольняти наведеним вище вимогам за пунктами 2, 3 та 5. Однак для повної відповідності всім вимогам було висунуто гіпотезу про доцільність проведення

направленого синтезу речовини, водний розчин якої можна використати в якості ВВБЗР.

З фізико-хімії високомолекулярних сполук [90] відомий прийом такого синтезу шляхом наповнення полімера функціональними добавками з необхідними властивостями. В даному випадку це повинен бути антипірен, що містить атоми фосфору і азоту. Ефективними антипіренами для целюлозовмісних матеріалів є діамонійфосфат або моноамонійфосфат [13, 73]. Однак ці солі висолюють полімери з їх водних розчинів, як і багато інших солей [176, 235]. Була запропоновано використати ортофосфорну кислоту одночасно і для розчинення полігексаметиленгуанідина у воді і для її використання в якості антипірена [27, 192, 193, 249]. Отриманий водний розчин полігекспметиленгуанідингідрофосфату не міг задовольнити вимогам за пунктами 1, 4, 6 (підрозділу 3.). Необхідно було знайти азотовмісну сполуку для посилення вогнезахисних властивостей ортофосфорної кислоти. Теоретичні дослідження розділу 2 та літературні джерела [27, 162, 192], показали, що такою сполукою може бути карбамід, який при взаємодії з ортофосфорною кислотою утворює комплексну хімічну сполуку – гідрофосфат карбаміду перемінного складу [40]. Ця комплексна сполука представляє собою білу кристалічну речовину, що добре розчинюється у воді. В подальшому вдалося синтезувати водорозчинну полімерну комплексну хімічну сполуку – полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду (ПГМГФК). На відміну від роботи [27] під час синтезу було використано співвідношення ортофосфорної кислоти до карбаміду як 2:1, що відповідає п.2 розроблених вимог до ВВБЗР для тканин , паперу, очерету. Зазначену комплексну сполуку було відповідним чином ідентифіковано.

В процесі випаровування розчинника (води) із водного розчину ПГМГФК утворюється гель, який при подальшому випаровуванні води утворює еластичну прозору плівку. Ця плівка на поверхні тканин не помітна і не змінює їх колір, що відповідає п.3 розроблених вимог. Оброблена і висушена тканина залишається еластичною. Показник поверхневого натягу 10%-ного водного розчину синтезованої комплексної хімічної сполуки, який визначали методом відриву

кільця, зменшився у 2 рази порівняно із водою. Таким чином, проведені попередні випробування показали, що водний розчин полімерної комплексної хімічної сполуки ПГМГФК задовольняє пунктам 2, 3, 4 вимог до ВВБЗР для тканин, паперу, очерету.

Виходячи з прогнозу теоретичних досліджень розділу 2 щодо можливості неадитивного прояву інгібірування процесу горіння сумішами фосфоровмісних та азотовмісних сполук, були проведені наступні експериментальні дослідження. Для виявлення інгібірувальних властивостей ВВБЗР на основі ПГМГФК проведено дослідження за методом, який застосовується при вивченні дії на полум'я н-гептану водних розчинів неорганічних солей [243].

При вивченні реакцій інгібірування в полум'ї задача зводиться до виявлення взаємодії ВВБЗР та продуктів його термічного розкладу за радикалами, які приймають участь в розгалуженні ланцюгових реакцій горіння. Спектр випромінювання полум'я реєструвався за допомогою спектрометра СДЛ-1 [243]. В якості горючої речовини використовувалась пара n-гептана, що одержана способом карбюрації. Досліджувана ВВБЗР розпилювалась за допомогою пневматичної форсунки і подавалась в полум'я співвісно з ним. Проведено дослідження ВВБЗР, в якій мольне співвідношення ортофосфорної кислоти і карбаміду змінювалось відповідно: 1:3, 1:2, 2:3, 1:1, 3:2, 2:1, 3:1. Експериментально визначено, що зміна співвідношень компонентів у суміші, яка подається в пальник, суттєво впливає на інтенсивність випромінювання ОН-радикалів. Встановлено, що при мольному співвідношенні ортофосфорної кислоти та карбаміду 2:1 спільна дія компонентів посилюється максимально, на що вказує зменшення відносної інтенсивності випромінювання ОН-радикалів на 31%. Подібна залежність спостерігалась під час дослідження інгібірувальної здатності суміші діамонійфосфата та сульфата амонію в ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М [13, 105].

Здатність до переведення легкозаймистих тканин у важкозаймистий стан після їх обробляння ВВБЗР на основі ПГМГФК досліджували за методом випробування на займистість відповідно до [82]. Сутність цього методу полягає

в оцінюванні характеристик горіння матеріалів під дією полум’я в лабораторних умовах, які контролюються приладами. Для проведення випробувань використовували стандартизовану установку [82], в якій закріплюють випробувальний зразок тканини розміром 220х170 мм, до якого підводять пальник з висотою полум’я 40 мм. Випробування проводились при підведенні пальника до поверхні та до краю зразка. З поверхні випробовують зразок протягом 5 с, для цього зразок закріплюється на шинах тримача проб, пальник встановлюють у горизонтальному положенні на 40 мм вище нижнього краю проби та підводять його до проби на відстань 17 мм. При відсутності стійкого горіння випробування проводять на новій пробі не змінюючи положення пальника протягом 15 с. Випробування до краю зразка проводять аналогічно випробуванням до поверхні, для цього пальник встановлюють під кутом 60^0 таким чином, щоб полум’я торкалось нижнього краю проби. Під час проведення випробувань реєструють тривалість залишкового полуменевого горіння, прогорання матеріалу, поширення поверхневого спалаху та вимірюють середню довжину звугленої ділянки.

Для випробувань були відібрані такі зразки тканин: бавовна, льон, віскоза, поліефірна тканина, , бавовняно-поліефірна тканина (50:50). Спочатку були проведені випробування необроблених зразків тканин. Після дії пальника на поверхню матеріала за короткий проміжок часу відбувалось повне згоряння зразків тканин, що досліджувались. В подальшому були проведені випробування зразків тканин, оброблених ВВБЗР на основі ПГМГФК. Випробування показали відсутність залишкового полуменевого горіння, прогорання матеріалу та поширення полуменевого спалаху для тканин природного та штучного походження. Для оброблених зразків тканин синтетичного походження та їх сумішей з природними зафіксоване горіння в межах, що допускаються стандартом [82]. Результати випробувань наведено в таблиці 3.16. Дані таблиці вказують на позитивний результат, оскільки, згідно з [82] , зразки тканин всіх видів, що оброблені ВВБЗР на основі ПГМГФК, класифікуються як важкозаймистий матеріал.

Таблиця 3.16

Результати визначення тривалості залишкового полуменевого горіння тканин згідно з ДСТУ 4155 [82].

Досліджувані тканини	Тривалість залишкового полуменевого горіння, с	
	Випробування до поверхні	Випробування до краю
Льняна тканина товщиною 0,8 мм (вміст льону 100%): - не оброблена - оброблена	197	159
	Горіння відсутнє	
Бавовняна тканина товщиною 0,6 мм (вміст бавовни 100%): - не оброблена - оброблена	63,1	40,3
	Горіння відсутнє	
Віскозна тканина товщиною 0,3 мм (вміст віскози 100%): - не оброблена - оброблена	34,3	27,8
	Горіння відсутнє	
Поліефірна тканина товщиною 0,4 мм (вміст поліефіру 100%): - не оброблена - оброблена	40,8	28,1
	3,8	Горіння відсутнє
Бавовняно-поліефірна тканина (50:50) товщиною 0,35 мм: - не оброблена - оброблена	63,4	30,1
	2,8	Горіння відсутнє

Димоутворювальну здатність тканин визначали згідно метода за п.4.18 [52]. Сутність метода визначення коефіцієнта димоутворення полягає у визначенні оптичної густини диму, що утворюється при горінна або тлінні визначеної кількості випробувальної речовини, який розподілений у заданому об’ємі. Випробування показали, що для обробленої тканини складу бавовна-поліефір (50:50) коефіцієнт димоутворення знизився в 2 рази в режимі горіння та в 4 рази – в режимі тління порівняно із коефіцієнтом димоутворення для необробленої тканини. Тобто відбулось переведення зазначеної тканини з групи матеріалів з високою димоутворювальною здатністю в групу матеріалів з помірною димоутворювальною здатністю.

Біологічні випробування виконано за методом визначення біологічної стійкості до дії мікрофлори лісового грунту, враженого культурами грибів Ceratocystus, Sporodemiam, Penicilliam на протязі двох календарних місяців з використанням обладнання лабораторії хімічної обробки та захисту деревини і клеїв УкрНДІ «Ресурс» [62, 162]. Дослідження проводились на визначення рівня біологічної стійкості зразків різних тканин та паперу, оброблених способом просочування ВВБЗР на основі ПГМГФК (20%-вим розчином). Результати досліджень наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17

Результати досліджень біологічної стійкості зразків тканин і паперу

Матеріал	Втрата маси зразком, %		
	Вимоги за ГОСТ 26603, не більше	Необроблені зразки	Оброблені зразки
Льняна тканина	2,12	42,4	1,95
Бавовняна тканина	1,3	26,1	1,2
Віскозна тканина	1,01	20,1	0,93
Поліефірна тканина	1,96	39,1	1,83
Тканина з суміші бавовни та поліефіру (50:50)	1,44	28,7	1,22
Папір для пакування марки Б-3	1,63	32,6	1,6

За результатами даних таблиці 3.17 можна зробити висновок, що ВВБЗР на основі ПГМГФК (20%-ного розчину) при просоченні різних тканин і паперу забезпечує їх необхідний рівень біостійкості відповідно до вимог [62].

Показник токсичності продуктів горіння вогнезахищених тканин досліджували за п.4.20 [52]. Сутність метода наведено вище (п.3.4.2). Результати досліджень вказують на те, що оброблення тканин на основі ПГМГФК дозволяє отримати помірно небезпечні матеріали замість високо небезпечних. Більш детально результати досліджень на токсичність продуктів горіння вогнезахищених тканин наведено в п.4 [52] при аналізі результатів сертифікаційних випробувань продукції.

Проведений комплекс досліджень щодо реалізації вимог, які висуваються до вогнезахищених тканин, паперу, очерету, на прикладі розроблення ВВБЗР на

основі ПГМГФК для тканин, дає підстави стверджувати, що мета досягнута. В результаті вдалося отримати важкозаймисті матеріали з помірним димоутворенням, помірно небезпечні за показником токсичності продуктів горіння. При цьому вогнезахищені тканини і папір є стійкими до біоруйнування під час експлуатації. Водний розчин ПГМГФК може бути кваліфікований як ВВБЗР і її доцільно застосовувати для протипожежного захисту об'єктів з пожежним навантаженням з тканин, паперу, очерету. Результати досліджень були втілені у патенти України на корисну модель № 23802, № 23803 [193, 194].

Враховуючи різноманітність матеріалів (тканини різних видів, папір, очерет) та велику кількість вимог до вогнезахищеного матеріалу, для оптимізації складу ВВБЗР на основі ПГМГФК застосовано метод, який ґрунтується на функції бажаності Харрингтона [6]. В основі побудови такої функції лежить ідея перетворення натуральних значень приватних відгуків у безрозмірну шкалу бажаності, що встановлює відповідність між фізичними і психологічними параметрами. Було визначено, що концентрація ПГМГФК у водному розчині повинна бути в межах від 20% (мас) до 25% (мас). Отже, дана ВВБЗР отримала технічну назву ФСГ-1М. При цьому концентрація ПГМГФК для тонких тканин до 0,5 мм) становить 20 – 22%, для товстих тканин (до 1,5 мм) і паперу – 22 – 24%, а для очерету – 28% [162]. Використання найбільшої концентрація ПГМГФК для очерету пов'язане з тим, що очерет має особливу структуру волокон. Він майже не набирає розчину при просоченні, тому вогнезахист очерету відбувається, головним чином, за рахунок утворення захисної плівки на поверхні очеретин.

3.9. Ідентифікація водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду

Зазвичай для ідентифікації і пояснення фізичних і фізико-хімічних властивостей полімерів використовують різні методи досліджень, оскільки, як правило, тільки сукупність отриманої інформації може надати повну характеристику полімера [167, 169, 176, 235]. Частіше всього використовують метод оптичної мікроскопії, метод інфрачервоної спектроскопії та метод

диференціального термічного аналізу [169, 178]. У полімерів розділяють первинну або молекулярну структуру, яка характеризує просторове розташування атомів і атомних груп окремо взятої макромолекули, та вторинну або надмолекулярну структуру, яка характеризує полімерне утворення, що складається з багатьох ланцюгових молекул [178].

Широке застосування для дослідження полімерів знаходить полярізаційна мікроскопія, яка інформує про фазовий стан матеріала та особливості мікроструктури: розміри і розподілення фаз, характер пор і тріщин. Вона дає також можливість з'ясувати морфологію і розміри надмолекулярних утворень для матеріалів, що кристалізуються [275].

Морфологічні дослідження кристалохімічних процесів утворення твердої речовини під час видалення розчинника (води) із ВВБЗР ФСГ-1М проводили із застосуванням полерізаційного мікроскопа «Polmy A». Дослідження показали, зменшенням кількості розчинника композиція приймає малорухомий стан (у вигляді гелю), який притаманний розчинам або розплавам високомолекулярних сполук [28]. Подальше видалення розчинника приводить до утворення специфічних кристалів (рис. 3.7), що є кристалічною формою високомолекулярних сполук [235]. Для порівняння на рисунку 3.8 наведено кристалічну форму фосфату карбаміду, яка значно відрізняється від попередньої і притаманна кристалам неорганічних сполук [40, 257]. Схожі результати отримано в [27].

Для ідентифікації речовин, дослідження або визначення у молекулі різних атомарних груп і хімічних зв'язків і, тим самим, встановити будову молекул, часто користаються порівнянням інфрачервоного спектру поглинання (ІЧ-спектру) досліджуваної речовини із стандартом або з табличними значеннями характеристичних смуг поглинання функціональних груп [178].

Дослідження проводили на двопроменевому спектрофотометрі «Specord M-80», який має діапазон вимірювання 4000-200 $см^{-1}$. Джерелом випромінювання служив Ni-Cr випромінювач із спіраллю розжарення діаметром 4 мм і висотою 14 мм. Фокусування променів здійснюється сферичними дзеркалами. Для одержання

монохроматичного випромінювання служать чотири дифракційні решітки. Оптичний сигнал перетворювався в електричний у приймачі випромінювання, в якості якого використовують вакуумний термоелемент із лінзою з CsI. В результаті вимірювань отримали ІЧ-спектр досліджуваного зразка в координатах «хвильове число - % пропускання», де пропускання дорівнює відношенню I/I_0.

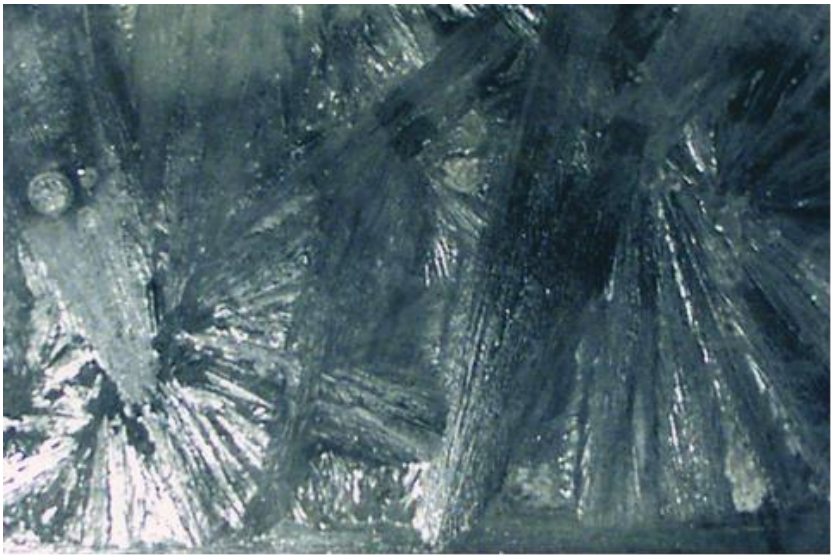


Рисунок 3.7 - Кристали ПГМГФК

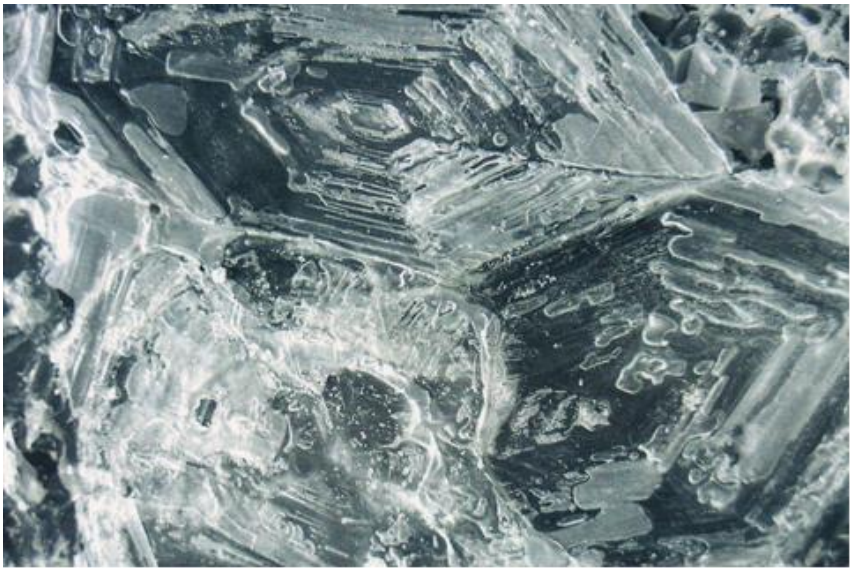


Рисунок 3.8 - Кристали фосфату карбаміду.

Для дослідження використали методику приготування зразка твердої речовини у вигляді таблеток з KBr [178]. Наважку досліджуваного зразка

ПГМГФК масою 8 мг ретельно перемішували з 392 мг оптично чистого калію бромиду у агатовій ступці, а потім у вібромлині. Отриману суміш таблетували за допомогою пресформи у прозору таблетку, яку розміщували у кюветному відділенні прибору.

В ІЧ-спектрі ПГМГФК знайдено всі характеристичні смуги поглинання, які притаманні карбаміду, ортофосфорній кислоті та полігексаметиленгуанідину, і тому такий спектральний аналіз засвідчує утворення комплексної сполуки [178] (рис. 3.9).

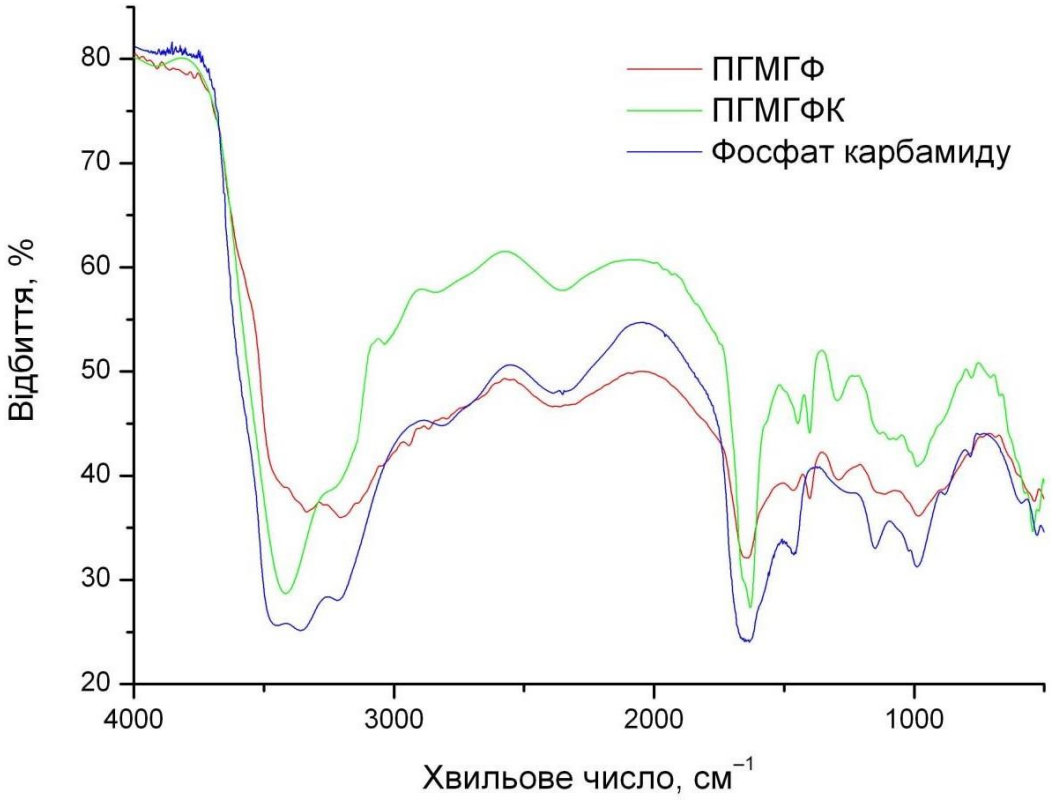
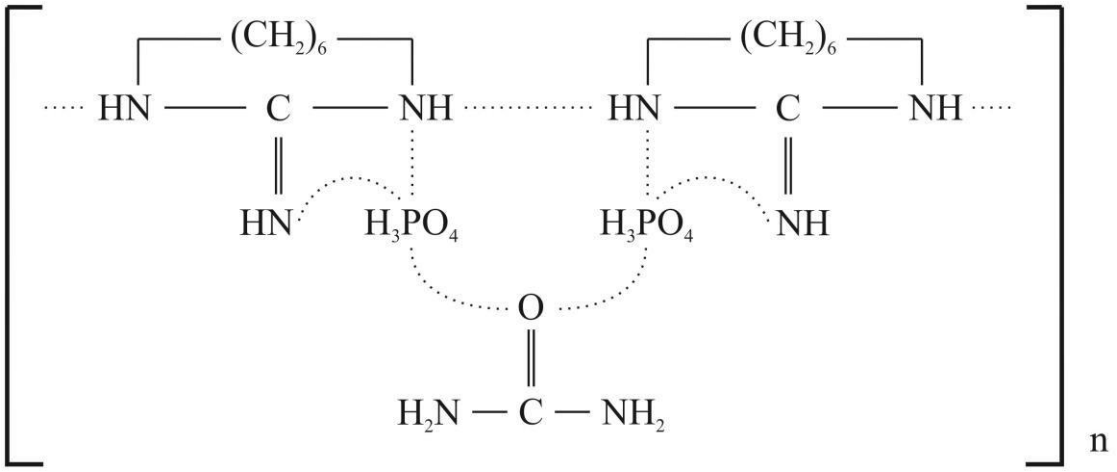


Рисунок 3.9 - ІЧ-спектри зразків фосфату карбаміду, ПГМГФ та ПГМГФК

З літературних даних [178] відомо, що за ІЧ-спектром можна не тільки однозначно встановити утворення комплексної сполуки, але і визначити, як відбувається координація (через атоми азоту або кисню). ІЧ-спектр полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду характеризується зменшенням частоти валентного коливання C=O, при незмінних значеннях частот валентних

коливань NH. За визначенням [40], координаційне число у комплексних сполуках ортофосфорної кислоти майже завжди дорівнює трьом. Тоді структурна формула ПГМГФК може мати такий вигляд (координаційні зв'язки за Ван Везером [40]):



З наведеної структурної формули стає зрозумілим, чому для синтезу полігексаметиленгуанідингідрофосфата карбаміду необхідно брати співвідношення ортофосфорної кислоти до карбаміду як 2:1.

3.10. Реалізація ефектів ізолювання, охолодження, флегматизування та інгібування при використанні для вогнебіозахисту тканин, паперу, очерету водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметиленгуанідин-гідрофосфат карбаміду

Дослідження умов реалізації ефекта ізолювання при вогнебіозахисті таких матеріалів, як тканина, папір та очерет, потрібно починати з розгляду фізико-хімічних властивостей макромолекул водорозчинних полімерів [176]. Зазначені макромолекули проявляють дифільні властивості по відношенню до гідрофільних та гідрофобних поверхонь, а це означає, що вони здатні їх змочувати. В практичному сенсі це дуже важливо, оскільки нитки тканин з природних матеріалів, як правило, проявляють гідрофільні властивості, а нитки тканин з штучних та синтетичних матеріалів, навпаки, - гідрофобні властивості. Тому, ФСГ-1М, що представляє собою ВВБЗР на основі водного розчину

полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду, здатна утворювати еластичну плівку на любих тканинах.

За своїми властивостями зазначена полімерна плівка подібна до плівки, що утворює ПГМГФ, отже здатна реалізувати корисні ефекти в контексті вогнезахисту. Нанесення плівки ПГМГФК на поверхню ниток забезпечує реалізацію ефекта ізолювання прискореної дифузії молекул кисню на початку термодеструкції тканин і буде сприяти реалізації ефекта флегматизування газоподібних продуктів деструкції тканин, що буде в подальшому розглянуто більш детально.

ПГМГФК завдяки наявності гідрофільних сполук, якими є ортофосфорна кислота та карбамід, утворює кристалогідрати. Кількість води змінюється в залежності від температури та вологості повітря. Ця кількість коливається від 0,1 грам води на 1 грам комплексної сполуки при вологості повітря менше 60% та 0,3 грам води на 1 грам комплексної сполуки при вологості повітря більше 60%. Без сумніву кристалогідрати комплексної сполуки внесуть охолоджуючий ефект у загальний механізм вогнезахисту, особливо тканин і паперу, оскільки вони будуть знаходитись в макроструктурі вогнезахищеного матеріалу.

В теперішній час широко використовується диференціальний термічний аналіз, який можна використати як для ідентифікації вогнезахисних речовин, так і для дослідження ефекта охолодження під час вогнезахисту. Цей метод досліджень особливо є актуальним при дослідженні полімерних матеріалів. Часто використовують порівняльний аналіз досліджуваного зразка з еталоном. Розглянемо полімерну комплексну хімічну сполуку ПГМГФК. Термогравіметричні криві для неї наведено на рисунку 3.11. Для порівняння на рисунку 3.10 наведені термогравіметричні криві для полімерного антисептика ПГМГФ. Криві для ПГМГФ вказують на термічно стабільну речовину. Інтенсивна втрата маси зразка починається з 150 ^{0}C. На кривій DTA спостерігаються два великих термічних ефекта.

Перший ефект з піком при 380 ^{0}C є ендотермічним, і він пов’язаний з термічним розкладом полімера з виділенням газоподібних продуктів. Другий

ефект з піком при 535 ^{0}C є екзотермічним, і він пов’язаний з вигорянням вуглеводневого «скелета» макромолекули з утворенням коксу, який поступово вигоряє при температурах вищих за 600 ^{0}C.

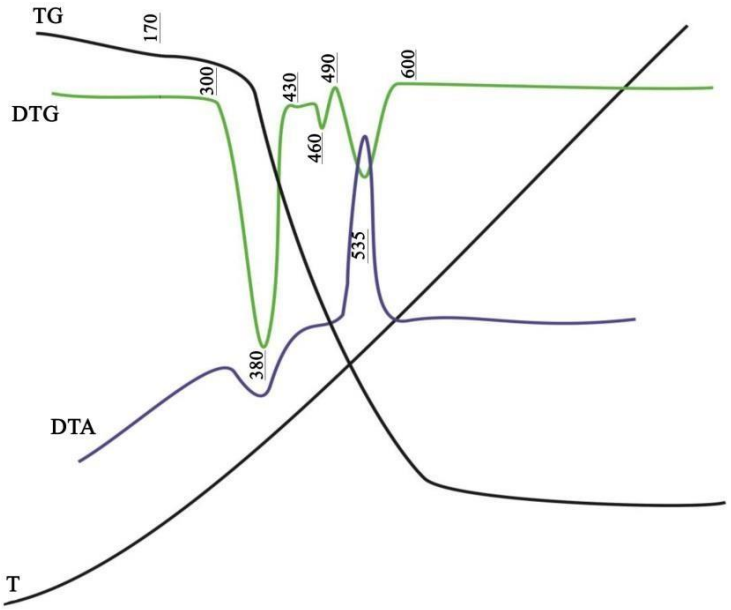


Рисунок 3.10 - Дериватограма зразка ПГМГФ.

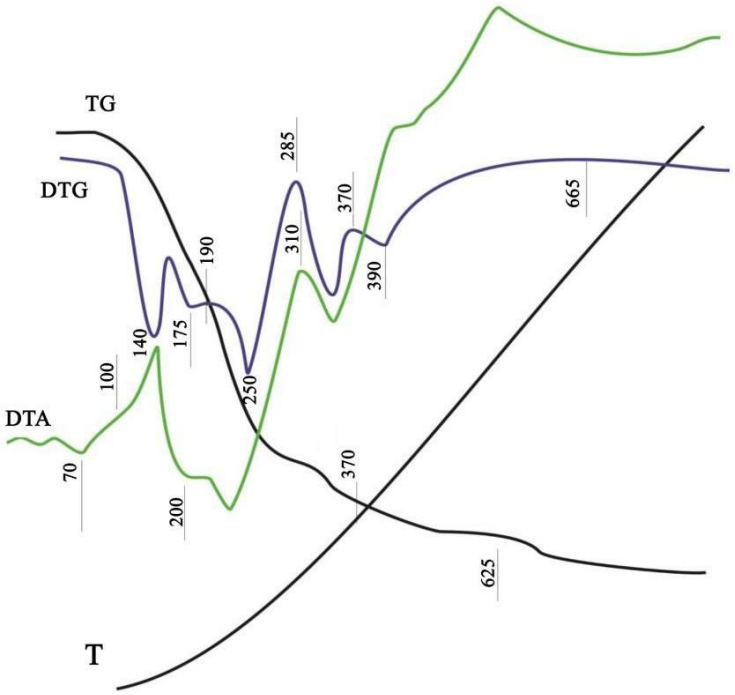


Рисунок 3.11 - Дериватограма зразка полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду (ПГМГФК).

Термогравіметричні криві, що характеризують ПГМГФК, мають певні відмінності. На кривій DTA спостерігається невеликий ендоефект з максимумом при 70 ^{0}C, який ймовірно вказує на випаровування води з кристалогідратів (сферолітів). На комплексний характер досліджуваної речовин вказує той факт, що інтенсивна втрата маси спостерігається при наближенні температури до 140 ^{0}C, що найбільш вірогідно пов'язане з відривом карбаміду від макромолекул полімеру та його плавленням. Дійсно, звичайний карбамід плавиться при температурі 132,7 ^{0}C [11]. Отже, витрата теплоти на прогрівання зразка приблизно на 7,3 ^{0}C витрачається на руйнування комплексного зв'язку карбаміда з макромолекулами полімеру. Звертає увагу кількість і значення ендоефектів на графіках досліджуваної речовини. Спостерігається чотири піка ендоефектів порівняно з одним для ПГМГФ. Це пояснює той факт, що синтезована речовина є багато кращим антипіреном порівняно з ПГМГФ за рахунок охолоджувального ефекту. Особливо треба відзначити великий ендоефект з піком при 250 ^{0}C. При цій температурі у більшості целюлозовмсних матеріалів (деревини, тканин, паперу, очерету) відбувається інтенсивний процес розкладу матеріала на горючі газоподібні продукти. Отже компенсуюча дія зазначеного ефекту в цьому температурному діапазоні особливо актуальна. Екзотермічний ефект у ПГМГФК починається після 310^{0}C, але, порівняно з екзоефектом для ПГМГФ (при 535 ^{0}C), він значно менше виражений, що пояснюється інгібуючою дією фосфоровмісних речовин.

Дослідження реалізації ефекта флегматизування продуктів термічної деструкції тканин і паперу, що оброблені водною вогнебіозахисною речовиною ФСГ-1М, проводили спільно з ДПУНДІ медицини транспорту МОЗ України шляхом їх газохроматографічного аналізу в порівнянні з продуктами термічної деструкції необроблених матеріалів [162]. Результати наведені в таблиці 3.18

Як видно з даних таблиці 3.21, під час термічного розкладу тканин і паперу, які оброблені ВВБЗР ФСГ-1М, леткі суміші продуктів піролізу суттєво відрізняються за вмістом азоту, CO_2, CO та кількістю горючих газів, особливо водню.

Таблиця 3.18

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
$C_2H_6 + C_2H_4$	0,72	0,98	0,23	-	0,61	0,18
C_3H_8	0,32	0,33	0,05	-	0,04	0,31
C_3H_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

У оброблених матеріалів значно зменшується кількість водню та метану, зменшується кількість CO, але збільшується кількість CO_2, збільшується кількість азоту, як продукта термічного розкладу ПГМГФК. Зменшення кількості горючих газів та збільшення інертного газу (азоту) свідчить про реалізацію ефекта флегматизування. Без сумніву це також сприяє процесу інгібування активних радикалів ланцюгових реакцій горіння газоподібних продуктів деструкції іонами ПГМГФК.

Таким чином, обробляння тканин, паперу та очерету водною вогнебіозахисною речовиною ФСГ-1М дозволяє суттєво підняти рівень їх вогнезахисту за рахунок реалізації всіх основних вогнезахисних ефектів: ізолювання, охолодження, флегматизування та інгібування.

3.11. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищених тканин і паперу

Вплив якісного і кількісного складу ВВБЗР ФСГ-1М на процеси займання, поширення полум’я поверхнею та припинення горіння тканин і паперу досліджували шляхом проведення випробувань відповідно методу і методики за ДСТУ 4155 [82, 162].

Дослідження проводили на п’ятьох видах вогнезахищених тканин (бавовна, поліефір, поліефір-бавовна (50:50), льон, віскоза) та одному виду паперу (гофропапір марки Б-3) під час проведення сертифікаційних випробувань.

В 2010 році під час сертифікації випробувалась тканина з бавовни. Випробуванням піддавали 5 (п’ять) зразків матеріалу тканини розміром 220 мм × 170 мм, завтовшки 0,2 мм та 48 (сорок вісім) зразків цього ж матеріалу, що було просочено ВВБЗР ФСГ-1М. Відбір та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Просочення зразків проводили з такими параметрами процесу:

- тривалість занурення матеріалу у просочувальну композицію - 2 хвилини;
- середня температура просочувальної композиції – 60,0 °С;
- тривалість сушіння оброблених зразків до постійної ваги не менше 48 годин за температури повітря 21 °С.

Поглинання маси просочувальної композиції становить 149,2 г/м^2 (концентрація солей 24 %). Кондиціювання зразків проводили за температури повітря (20 ± 2) °С та відносної вологості (65 ± 5) % не менше 24 годин.

Для випробувань використовувалась установка для визначення займистості тканин ОВТ [82] і засоби вимірювальної техніки, які метрологічно атестовані у встановленому порядку.

При проведенні випробувань пальник встановлюють в горизонтальному положенні на 40 мм вище нижнього краю зразка і присовують до зразка на відстань, яка дорівнює (17 ± 1) мм (режим запалювання зразка з поверхні). Час впливу полум’я на зразок складає 5 с. При відсутності горіння зразка проводять випробування на новому зразку – час впливу полум’я складає 15 с. У випадку відсутності стійкого горіння зразка пальник встановлюють під кутом 60 градусів до горизонталі та розташовують його таким чином, щоб полум’я торкалось нижнього краю зразка (режим запалювання зразка з краю). Час впливу полум’я на новий зразок складає 5 с. При відсутності стійкого горіння зразка час впливу полум’я збільшується до 15 с.

Під час проведення випробувань визначаються: час самостійного горіння, наявність пробіжки полум’я по поверхні зразка, наявність згоряння або тління бавовняної вати від падаючих краплин зразка, довжина обвугленої ділянки.

Матеріал класифікують як легкозаймистий, якщо результати випробувань відповідають таким умовам:

- тривалість залишкового полуменевого горіння становить більше ніж 5 с у будь-якого з зразків, які випробували з поверхні;

- прогоряння зразка до одного з його країв у будь-якого з зразків, випробуваних при запалюванні з поверхні;

- займання бавовняної вати під будь-яким з випробуваних зразків;

- поширення поверхневого спалаху більш ніж на 100 мм від точки запалювання у будь-якого з зразків, випробуваних з поверхні чи з краю;

- середня довжина звугленої ділянки становить більш ніж 150 мм у будь-якого з зразків, випробуваних з поверхні чи з краю.

Якщо з п’яти зразків, вирізаних у напрямку основи або утоку, одній або декілька з вищевказаних вимог задовольняє тільки один зразок, то проводять повторне випробування на п’яти зразках. Якщо отримані результати підтверджуються вдруге, то матеріал класифікують як легкозаймистий. Якщо при випробуванні тканини не виконуються вказані умови, то матеріал класифікують як важкозаймистий. Результати випробувань наведені в таблиці 3.19.

Згідно з [82] зразки тканини портьєрної (100 % бавовна) арт. 11205 завтовшки 0,2 мм виробництва ВАТ „Льонотекс” (м. Житомир), що просочена ВВБЗР ФСГ-1М з поглинанням маси просочувальної композиції 149,2 г/м^2 (концентрація солей 21 %), класифікуються як важкозаймистий матеріал.

В подальшому випробування проводили на тканинах з поліефіру, віскози, льону, суміші волокон бавовни та поліефіру (1:1). Випробовували тканини різної товщини від: 0,24 мм до 0,82 мм. Просочування матеріалу проводили за схемою, аналогічною просоченню матеріалу з бавовни. Поглинання робочого розчину ВВБЗР ФСГ-1М становило від 150 до 1000 г/м^2 в залежності від типу тканини та її товщини. Згідно з [82] всі зразки вогнебіозахищеної тканини були класифіковані як важкозаймистий матеріал.

Таблиця 3.19

Результати випробувань зразків тканини портьєрної (100% бавовна) арт. 11205 виробництва ВАТ „Льонотекс” (м. Житомир), що просочена ВВБЗР ФСГ-1М

Розташування зразка	Характер впливу пальника	№ Зразка	Маса зразка, г	Час впливу полум’я, с	Довжина пошкодження зразка, мм	Час залишкового полуменевого горіння, с
За основою (лицевий бік)	З поверхні	1	9,9	5	4	0
	З поверхні	1	10,0	15	70	0
		2	9,9	15	71	0
		3	10,1	15	68	0
		4	10,3	15	71	0
		5	9,8	15	70	0
	З краю	1	9,9	5	8	0
	З краю	1	10,1	15	73	0
		2	10,0	15	53	0
		3	10,2	15	65	0
		4	9,8	15	60	0
		5	9,9	15	61	0
За утоком (лицевий бік)	З поверхні	1	10,2	5	5	0
	З поверхні	1	10,1	15	67	0
		2	10,0	15	72	0
		3	10,0	15	68	0
		4	10,2	15	59	0
		5	10,1	15	71	0
	З краю	1	9,8	5	7	0
	З краю	1	10,1	15	50	0
		2	10,2	15	53	0
		3	10,0	15	69	0
		4	9,8	15	70	0
		5	10,3	15	65	0
За основою (виворітний бік)	З поверхні	1	9,9	5	5	0
	З поверхні	1	9,8	15	71	0
		2	9,8	15	65	0
		3	10,0	15	65	0
		4	10,2	15	57	0
		5	10,1	15	70	0
	З краю	1	9,8	5	66	0
	З краю	1	9,8	15	58	0
		2	10,1	15	62	0
		3	10,2	15	71	0
		4	9,5	15	65	0
		5	10,2	15	69	0
За утоком (виворітний бік)	З поверхні	1	10,0	5	6	0
	З поверхні	1	10,2	15	70	0
		2	10,0	15	68	0
		3	10,1	15	72	0
		4	9,7	15	65	0
		5	10,2	15	71	0
	З краю	1	10,2	5	7	0
	З краю	1	10,1	15	52	0
		2	9,8	15	58	0
		3	9,9	15	65	0
		4	10,3	15	71	0
		5	10,1	15	65	0

Максимальна похибка вимірювання часу склала ± 0,19 с.
Максимальна похибка вимірювання маси зразків склала ± 0,05 г.

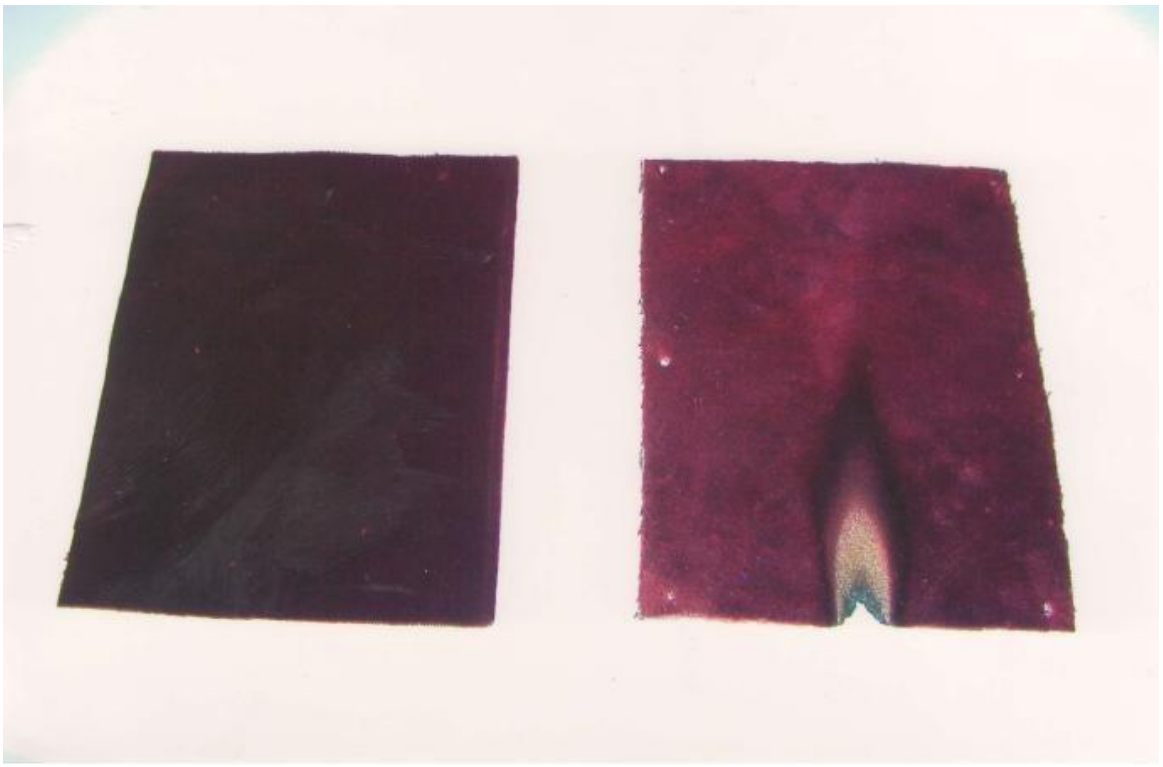


Рисунок 3.12 - Зовнішній вигляд зразків тканини, що оброблені ВВБЗР ФСГ-1М до та після випробувань

На рисунку 3.12 представлений зовнішній вигляд зразків тканини, вогнебіозахищеної ВВБЗР ФСГ-1М, до випробувань та після випробувань з краю зразка тканини.

Папір як горючий матеріал може внести вагомий вклад у пожежне навантаження різних об’єктів. Він має широку галузь використання і, відповідно, різні марки. Найбільш широкого використання набув папір пакувальний марки Б-3. Спеціальних методів випробувань на горючість паперу не має. Виходячи з подібності структури цього матеріала структурі нетканих полотен, доцільно також використати метод випробувань за [82]. Отже, за відповідним рішенням ДЦС МНС України в 2008 році були проведені відповідні сертифікаційні випробування. Випробуванням піддавали зразки паперу для пакування марки Б-3, розмірами (220±1) мм х(170±1) мм, завтовшки 0,2 мм, що оброблено ВВБЗР ФСГ-1М з середньою загальною витратою робочого розчину 945 мл/м^2 (у розрахунку на суху речовину 191,0 г/м^2). Відбирання та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Обробку зразків проводили способом занурення на 2 хвилини в

20%-й розчин ВВБЗР ФСГ-1М. Кондиціювання зразків проводили за температури повітря (20±2) ^{0}С в умовах відносної вологості повітря (65 ± 5) %.

Для випробування використовували установку для визначення займистості тканин ОВТ і засоби вимірювальної техніки, метрологічно атестовані. Метод випробування за [82]. Результати випробувань наведено в таблиці 3.20.

Таблиця 3.20

Результати випробування паперу для пакування марки Б-3, який оброблено ВВБЗР ФСГ-1М

Розташування зразка	Вид впливу полум'я пальника	№ зразка	Маса зразка, г	Тривалість впливу полум'я, с	Довжина звугленої ділянки зразка, мм	Тривалість залишкового полуменевого горіння, с
за основою (лицевий бік)	з поверхні	1	7,2	5	20	0
	з поверхні	1	7,3	15	68	0
		2	7,2	15	70	0
		3	7,2	15	69	0
		4	7,3	15	68	0
		5	7,2	15	69	0
	з краю	1	7,1	5	27	0
	з краю	1	7,1	15	76	0
		2	7,2	15	75	0
		3	7,4	15	73	0
		4	7,2	15	76	0
		5	7,3	15	74	0

Максимальна похибка результату вимірювання часу становить ± 0,19 с.
Максимальна похибка результату вимірювання маси зразків становить ± 0,05 г.

За результатами проведених випробувань згідно з [82], зразки паперу для пакування марки Б-3 завтовшки 0,2 мм, який оброблено ВВБЗР ФСГ-1М, з середньою витратою робочого розчину 945 мл/м^2 (у розрахунку на суху речовину 191,0 г/м^2), належить до важкозаймистих матеріалів.

Отже, як засвідчують випробування п'яти видів тканин, різних за складом та товщиною, та випробування пакувального паперу, запропонований якісний та кількісний склад ВВБЗР ФСГ-1М забезпечує вплив на процеси займання, поширення полум'я по поверхні та припинення горіння таким чином, що оброблені матеріали переходять в групу важкозаймистих матеріалів: вони не поширюють полум'я поверхнею і не горять після відсторонення газового пальника.

Для окремих об'єктів додатково висувається вимога щодо димоутворювальної здатності вогнезахищених тканин. Зокрема це стосується

тканних оздоблювальних матеріалів для пасажирських вагонів. Такі дослідження проводили під час сертифікаційних випробувань коефіцієнта димоутворення згідно з п.4.18 [52] зразків оббивної тканини арт. 7450 US/OG фірми «RUNOTEX S.A.» (Польща), обробленої ВВБЗР ФСГ-1М.

Випробуванням піддавали 10 (десять) зразків матеріалу темно-синього кольору. Розміри зразків 30 мм × 30 мм, середня товщина 2,8 мм. Тканина арт. 7450 US/OG була оброблена ВВБЗР ФСГ-1М з середньою витратою робочого розчину 0,7 л/м^2 (в розрахунку на суху речовину 140 г/м^2). Відбирання та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Кондиціювання зразків проводили за температури повітря (20 ± 2) °С протягом 50 годин.

Для випробувань використовували установку УД-1, метод і методику випробувань згідно з 4.18 [52] та засоби вимірювальної техніки, метрологічно повірені в установленому порядку. Результати випробувань наведено в таблиці 3.21.

Середнє значення коефіцієнта димоутворення зразків у режимі тління становить 487 м^2/кг, в режимі полуменевого горіння - 240 м^2/кг. Згідно з 2.14.2 [52] зразки середньою товщиною 2,8 мм оббивної тканини арт. 7450 US/OG фірми "RUNOTEX S. A." (Польща), що оброблена ВВБЗР ФСГ-1М з середньою витратою робочого розчину 0,7 л/м^2 (в розрахунку на суху речовину 140 г/м^2), належать до матеріалів з помірною димоутворювальною здатністю.

Для зазначеного об’єкта важливим показником є також токсичність продуктів горіння вогнебіозахищених матеріалів. Такі дослідження проводили під час сертифікаційних випробувань токсичності продуктів горіння полімерних матеріалів згідно з [52]. Випробовувалась тканина «Astromal» (100% поліефір) фірми «PESA Bydgoszcz S.A.H.» (Польща) для оббивки крісел, що оброблена ВВБЗР ФСГ-1М. Випробування проводили спільно з відділом гігієни та токсикології ДП УНДІ медицини транспорту МОЗ України. Для випробувань використовували установку згідно з [52] і засоби вимірювальної техніки, метрологічно повірені в установленому порядку.

Таблиця 3.21

Результати випробувань зразків оббивної тканини арт. 7450 US/OG фірми "RUNOTEX S. A." (Польща), що оброблена ВВБЗР ФСГ-1М

Режим випробувань та густина теплового потоку	Номер зразка для випробувань	Маса зразка (m), г	Світлопропускання, %		Коефіцієнт димоутворення (D_m), $м^2/кг$
			початкове значення (T_0)	кінцеве значення (T_{min})	
1	2	3	4	5	6
Полуменеве горіння, 35 $кВт/м^2$	1	1,24	100,0	70,4	234,7
	2	1,25	100,0	69,2	244,4
	3	1,23	100,0	67,6	264,4
	4	1,24	100,0	71,8	221,9
	5	1,26	100,0	69,9	235,5
Середнє значення (округлено до цілого числа)					240
Тління, 35 $кВт/м^2$	1	1,21	100,0	49,5	481,8
	2	1,24	100,0	47,2	502,0
	3	1,22	100,0	47,9	501,4
	4	1,23	100,0	47,7	499,4
	5	1,19	100,0	52,3	452,2
Середнє значення (округлено до цілого числа)					487

Максимальна похибка результату вимірювання маси зразків становить ± 0,001 г

Згідно з [52] програма робот складалась з санітарно-хімічних та токсикологічних випробувань, які виконувались методами, затвердженими МОЗ України. Результати санітарно-хімічних випробувань наведені у таблиці 3.22. При горінні матеріалу в повітрі запалювальної камери були визначені оксид вуглецю, двооксид вуглецю та водені ціаністий у концентраціях, що можуть викликати гостре отруєння експериментальних тварин, а також азоту оксиди, акролеїн, аміак, аміни аліфатичні, бензол, бутанол, водень хлористий, вуглеводні C_1-C_{10} , ксилоли, стирол, толуол, фенол, формальдегід у гігієнічно безпечних (з позиції гострої токсичності) концентраціях, а також сажа, смолистий залишок та водний конденсат [158].

Таблиця 3.22

Міграція компонентів при моделюванні умов горіння матеріалу

Компонент	Визначені кількості продуктів горіння, мг/г	
	400 ^{0}C	750 ^{0}C
Оксид вуглецю (II)	52,6±4,4	68,6±5,84
Двооксид вуглецю (IV)	128,6±9,5	256,3±22,1
Формальдегід	0,17±0,06	0,34±0,07
Водень хлористий	0,6±0,03	0,8±0,04
Фенол	0,07±0,003	0,26±0,02
Аміак	34,8±3,9	28,3±2,1
Аміни аліфатичні	0,06±0,003	0,03±0,002
Акролеїн	0,03±0,001	0,06±0,003
Азоту оксиди	0,3±0,02	0,8±0,2
Водень ціаністий	0,41±0,06	0,57±0,03
Вуглеводні C_1-C_{10}	6,4±0,3	2,4±0,06
Метанол	н.в.	н.в.
Бензол	0,63±0,3	2,4±0,2
Бутанол	0,03±0,001	н.в.
Ксилоли	0,08±0,002	0,03±0,002
Стирол	0,07±0,002	0,02±0,001
Толуол	0,6±0,03	0,06±0,003
Сажа, смолистий залишок, конденсат	316,7±34,8	437,6±35,9
Втрата маси, %	72,8%	82,5%

Метою токсикологічних випробувань є визначення показника токсичності (H_{CL50}), який характеризується як співвідношення кількості матеріалу до одиниці об’єму замкнутого простору, продукти згорання якого викликають загибель 50% піддослідних тварин. Експозиція становила 30±0,5 хв., концентрація кисню у камері перевищувала18%. У кожному випробуванні використовували білих мише вагою 20,0±2,0 г.

У кожному температурному режимі знаходили ряд значень залежності загибелі тварин від відношення маси зразку до об’єму експозиційної камери, який використовували для розрахунку показника токсичності H_{CL50} за допомогою пробіт-аналізу [210] Результати представлені в таблиці 3.23.

Таблиця 3.23

Результати пробіт-аналізу

Навіска, г	Смертність,%	Місце концентрацій	Пробіти	Ваговий коефіцієнт
50	0	1	3,04	1
60	30	2	4,48	4,3
70	50	3	5	5
80	80	4	5,84	3,9
90	100	5	6,96	1

**у розрахунку на м^3, при часі дії 30 хв.*

Масова доля карбоксигемоглобіну в крові лабораторних тварин визначалась спектрофотометричним методом [264]. Результати токсикологічних випробувань наведені у таблиці 3.24.

Таблиця 3.24

Результати токсикологічних випробувань

400 ^{0}C		750 ^{0}C	
H_{CL50}, г/м^3	HbCO, %	H_{CL50}, г/м^3	HbCO, %
84,3±6,9	49,8±4,4	72,4±6,4	52,6±4,8

Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що кількісні характеристики вмісту шкідливих сполук у повітрі експозиційної камери та рівень карбоксигемоглобіну у крові лабораторних тварин свідчить про те, що смертельний ефект обумовлений головним чином дією оксиду вуглецю, аміаку та водню ціаністого. Мінімальне значення показника H_{CL50} , визначене при температурі 750 ^{0}C, склало 72,4±6,4 г/м^3. Тому значення H_{CL50} при температурі 750 ^{0}C використане для встановлення величини показника токсичності продуктів горіння згідно з класифікацією по п. 2.17.2 [52]. По цьому показнику досліджений зразок тканини «Astromal», що оброблена ВВБЗР ФСГ-1М, відноситься до класу помірно небезпечних матеріалів [162].

3.12. Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання, розповсюдження та припинення горіння вогнебіозахищеного очерету

Очерет, як природний матеріал, набув широкого застосування для влаштування дахів. Цей матеріал належить до будівельних покрівельних горючих матеріалів, тому, в сенсі пожежного навантаження, створює велику пожежну небезпеку для різного виду об’єктів. Для покращення рівня пасивного протипожежного захисту таких об’єктів застосовується вогнебіозахсине обробляння виробів з очерету (блоків або матів). Для протидії процесу вимивання вогнебіозахисного засобу вироби з очерету додатково обробляють гідрофобізаторами [193, 252].

Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання та припинення горіння вогнебіозахищеного очерету проводили під час сертифікаційних випробувань з визначення групи горючості за [85, 162].

Випробуванням піддавали 12 (дванадцять) зразків матеріалу (зв'язані дротом блоки очеретин) світло-коричневого кольору розмірами 1000 мм × 190 мм, середньою загальною товщиною 21 мм. Зразки матеріалу було оброблено ВВБЗР ФСГ-1М з середнім значенням поглинання робочого розчину у розрахунку на суху речовину 300 г/м^2 та нанесено гідрофобізувальну речовину (суміш) „СІЛОЛ-ЕКО" [252] з середньою витратою (у розрахунку на суху речовину) 60 г/м^2. Відбирання та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Кондиціювання зразків проводили за температури повітря 20 ^{0}С та відносній вологості повітря 60%. Тривалість кондиціювання – понад 72 години. Зовнішній вигляд зразків очерету наведено на рисунку 3.13.



Рисунок 3.13 - Зовнішній вигляд зразків очерету, що оброблені ВВБЗР ФСГ-1М та гідрофобізувальною речовиною (сумішшю) „СІЛОЛ-ЕКО" до та після випробувань

Для випробувань використовували установку УВГБМ-1 згідно з [85] і засоби вимірювальної техніки, метрологічно атестовані в УкрСЕПРО.

Згідно з [85] будівельні матеріали поділяють на негорючі (НГ) та горючі (Г). Суть методу випробувань з визначення групи горючості горючих будівельних матеріалів полягає у введенні одночасно чотирьох зразків, закріплених у тримачі, в камеру згоряння, дії на зразки полум'я від джерела запалювання з заданими параметрами (фіксовані витрати газу та повітря) протягом 10 хвилин та визначенні для кожного випробування таких параметрів горючості:

- температури димових газів;
- тривалості самостійного горіння;
- ступеня пошкодження за довжиною;
- ступеня пошкодження за масою.

За результатами випробувань горючі (Г) будівельні матеріали в залежності від значень параметрів горючості матеріалу поділяють на чотири групи горючості – Г 1, Г 2, Г 3, Г 4 – відповідно до таблиці 3.25.

Таблиця 3.25

Класифікація горючих будівельних матеріалів згідно з [85]

Група горючості матеріалів	Параметри горючості			
	Температура димових газів T, °C	Ступінь пошкодження за довжиною S_L, %	Ступінь пошкодження за масою S_m, %	Тривалість самостійного горіння $\tau_{сг}$, с
Г 1	$\leq$ 135	$\leq$ 65	$\leq$ 20	0
Г 2	$\leq$ 235	$\leq$ 85	$\leq$ 50	$\leq$ 30
Г 3	$\leq$ 450	> 85	$\leq$ 50	$\leq$ 300
Г 4	> 450	> 85	> 50	> 300

Примітка: Для матеріалів груп горючості Г1-Г3 не допускається утворення крапель розплаву, що горять під час випробувань.

Результати випробувань наведено у таблиці 3.26.

Таблиця 3.26

Результати випробувань зразків очерету, що оброблені ВВБЗР ФСГ-1М та гідрофобізувальною речовиною (сумішшю) „СІЛОЛ-ЕКО”

№ випробування	№ зразків	Початкова температура $T_п$, ºС	Максимальна температура димових газів T, ºС	Середнє арифметичне значення температури димових газів $T_{ср}$, ºС	Довжина пошкодженої зони L, мм	Середнє арифметичне значення довжини пошкодженої зони $L_{ср}$, мм	Ступінь пошкодження зразків за довжиною S_L, %	Маса зразка до випробувань m_1, г	Маса зразка після випробувань m_2, г	Середнє арифметичне значення втрати маси $\Delta m_{ср}$, г	Ступінь пошкодження зразків за масою S_m, %	Тривалість самостійного горіння зразків τ, с
1	1	30	143	144,0	410	420,0	42,0	965	750	206,3	21,7	14
	2	32	149		450			925	725			
	3	30	137		400			950	740			
	4	32	147		420			955	755			
2	5	30	130	139,5	390	412,5	41,3	920	745	185,0	21,0	24
	6	33	134		400			870	705			
	7	30	136		410			880	675			
	8	32	158		450			860	665			
3	9	30	145	154,0	430	435,0	43,5	890	665	231,3	25,4	28
	10	31	173		460			900	670			
	11	31	150		420			920	705			
	12	31	148		430			935	680			
Середні арифметичні значення для трьох випробувань (округлено до цілого числа)				146			42				23	22

Максимальна похибка результату вимірювання початкової температури становить ± 2,5 °С.

Максимальна похибка результату вимірювання температури димових газів становить ± 2,8 °С.

Максимальна похибка результату вимірювання довжини становить ± 1,4 мм.

Максимальна похибка результату вимірювання маси становить ± 6,1г.

Отже, згідно з 5.3 [85] зразки очерету середньою загальною товщиною 21 мм, які оброблені ВВБЗР ФСГ-1М з середнім значенням поглинання робочого розчину у розрахунку на суху речовину 300 г/м^2 та гідрофобізувальною речовиною (сумішшю) „СІЛОЛ-ЕКО” [252] з середньою витратою (у розрахунку на суху речовину) 60 г/м^2, належать до групи горючості Г2 (за пожежно-технічною класифікацією - матеріали помірної горючості).

Дослідження впливу якісного та кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси поширення полум’я поверхнею вогнебіозахищеного очерету проводили під час сертифікаційних випробувань з визначення групи поширення полум’я згідно з [85].

Випробуванням піддавали 5 (п’ять) зразків матеріалу (зв’язані дротом блоки очеретин) світло-коричневого кольору розмірами 1100 мм × 250 мм, середньою загальною товщиною 19 мм, які розміщували на негорючій основі (азбестоцементний лист завтовшки 10 мм) розмірами 1100 мм × 250 мм. Зразки матеріалу було оброблено ВВБЗР ФСГ-1М з середнім значенням поглинання робочого розчину у розрахунку на суху речовину 300 г/м^2 та нанесено гідрофобізувальну речовину (суміш) „СІЛОЛ-ЕКО” з середньою витратою (у розрахунку на суху речовину) 60 г/м^2. Відбирання та ідентифікацію зразків проведено ДЦС МНС України. Кондиціювання зразків проводили за температури повітря 20 °С та відносної вологості повітря 60 %. Тривалість кондиціювання становило понад 72 години.

Для випробувань використовували установку УВПП-1 [85] і засоби вимірювальної техніки, метрологічно повірені.

Суть методу випробувань згідно з [85] полягає у визначенні критичної поверхневої густини теплового потоку (КПГТП) під час дії на поверхню горизонтально розташованого зразка джерела запалювання та теплового потоку від радіаційної панелі, що встановлена під кутом 30° до зразка. В залежності від довжини поширення полум’я, за калібрувальним графіком розподілу значень поверхневої густини теплового потоку установки визначають КПГТП.

Випробуванням піддають 5 зразків матеріалу розміром 1100 мм × 250 мм кожен. Зразки для стандартних випробувань виготовляють у поєднанні з негорючою основою. Як негорючу основу застосовують азбестоцементні листи завтовшки 10 мм або 12 мм. Товщина зразка з негорючою основою повинна становити не більше 60 мм.

У разі відсутності займання зразка протягом 10 хвилин випробування вважають закінченим. Якщо тривалість полуменевого горіння зразка становить не більше ніж 30 хвилин, випробування вважають закінченим після його припинення. Якщо полуменеве горіння триває довше, то здійснюють примусове гасіння. Під час випробувань фіксують проміжок часу до займання та тривалість полуменевого горіння матеріалу. Довжину поширення полум'я визначають як середнє арифметичне значення за довжиною пошкодженої зони п'яти зразків. За відсутності займання зразка або за довжини поширення полум'я менше ніж 100 мм слід вважати, що КПГТП становить більше ніж 11 кВт/м^2. У випадку примусового гасіння за довжину поширення полум'я умовно приймають довжину пошкодженої зони на момент припинення горіння.

За результатами випробувань матеріали в залежності від значення КПГТП поділяють на чотири групи поширення полум'я відповідно до даних таблиці 3.27.

Таблиця 3.27.

Класифікація горючих будівельних матеріалів за групами поширення полум'я

Група поширення полум'я	Критична поверхнева густина теплового потоку, кВт/м^2
РП 1 (не поширюють полум'я)	11,0 та більше
РП 2 (локально поширюють полум'я)	від 8,0, але менше 11,0
РП 3 (помірно поширюють полум'я)	від 5,0, але менше 8,0
РП 4 (значно поширюють полум'я)	менше 5,0

Розподіл значень поверхневої густини теплового потоку (ПГТП) на калібрувальному зразку наведено у таблиці 3.28.

Таблиця 3.28

Розподіл значень ПГТП на калібрувальному зразку

Діапазон значень ПГТП, кВт/м^2	Діапазон відстаней від точки „0”, мм
11,0 та більше	від 0 до 99
від 8,0, але менше 11,0	від 100 до 257
від 5,0, але менше 8,0	від 258 до 410
менше 5,0	більше 410

Результати випробувань наведено у таблиці 3.29.

Таблиця 3.29

Результати випробувань зразків очерету, що оброблені ВВБЗР ФСГ-1М та гідрофобізувальною речовиною (сумішшю) „СІЛОЛ-ЕКО”

№ зразка	Проміжок часу дії полум’я до займання зразка, $\tau_з$, с	Тривалість полумене-вого горіння зразка $\tau_{гор}$, с	Довжина пошкодженої зони зразка L, мм	Довжина поширення полум’я, $L_{ср}$, мм	Критична поверхнева густина теплового потоку, кВт/м^2
1	64	124	32	31	більше 11,0
2	67	121	32		
3	62	130	34		
4	63	128	31		
5	71	124	28		

Максимальна похибка результату вимірювання часу становить ± 0,68 с.
Максимальна похибка результату вимірювання довжини становить ± 1,4 мм.

Отже, згідно з 5.1 [85] зразки очерету середньою загальною товщиною 19 мм, які розміщували на негорючій основі (азбестоцементний лист завтовшки 10 мм) розмірами 1100 мм × 250 мм, що оброблені ВВБЗР ФСГ-1М з середнім значенням поглинання робочого розчину у розрахунку на суху речовину 300 г/м^2 та гідрофобізувальною речовиною (сумішшю) „СІЛОЛ-ЕКО” з середньою витратою (у розрахунку на суху речовину) 60 г/м^2 належать до групи поширення полум’я РП1 (за пожежно-технічною класифікацією - матеріали, що не поширюють полум’я).

3.13. Феноменологічна модель процессу вогнезахситу тканин, паперу, очерету, оброблених водною вогнебіозахисною речовиною ФСГ-1М

Проведені дослідження і випробування дозволили скласти феноменологічну модель процесу вогнезахисту тканин, паперу, очерету шляхом їх обробляння ВВБЗР ФСГ-1М [112, 162].

При попаданні краплин ВВБЗР ФСГ-1М на поверхню волокна тканини або тростини очерету, завдяки поверхнево-активним властивостям ПГМГФК, розчин ФСГ-1М змочує і «обгортає» її. Дифільна макромолекула ПГМГФК на гідрофільній поверхні волокон бавовни, льону, віскози, очерету орієнтується до неї своєю гідрофільною частиною і утворює водневий зв'язок адгезійних сил. У випадку гідрофобної поверхні волокон поліефірної тканини навпаки відбувається орієнтація до неї гідрофобною частиною макромолекули.

Випаровування води і перехід ВВБЗР в гідрогель ПГМГФК сприяє додатковому посиленню адгезії, що дуже важливо при вертикальній (похилі) орієнтації поверхні волокон. При позитивній температурі і пониженій вологості оточуючого повітря гідрогель ПГМГФК перетворюється у полімерну плівку з надмолекулярною структурою у вигляді сферолітів. Завдяки високій гігроскопічності полімерної плівки повного її висихання досягнути (протягом експлуатації вогнезахищених матеріалів) практично не можливо. Полімерна плівка залишається еластичною і прозорою, яка не змінює колір вогнебіозахищеного матеріалу, а отже не погіршує його естетичні характеристики.

При підведенні полум'я до вогнезахищеного матеріалу підвищується температура і починається прояв охолоджувального ефекту. При 70 ^{0}C випаровується вода із сферолітів надмолекулярної структури ПГМГФК. Паралельно з охолоджуючим ефектом відбувається процес ізолювання волокон вогнезахищеного матеріалу від проникнення молекул кисню за рахунок утворення полімерної плівки. Процес охолодження є розтягнутим в температурно-часовому полі, про що свідчать дериватограми розкладу ПГМГФК. На дериватограмах можна виділити чотири ендотермічних ефекти. При температурі 140 ^{0}C відбувається руйнування полімерного комплексу.

Карбамід починає плавитись з розкладом на азотовмісні сполуки, а ПГМГФ на фосфоровмісні, які утворюють іон-радикальні та іон-молекулярні комплекси з активними центрами горіння. Отже, відбувається інгібування ланцюгових реакцій окиснення. Ефективність цього процесу збільшується за рахунок збільшення кількості азоту в мікрооб'ємі протікання реакцій. Тобто додатково проявляється ефект флегматизування.

Верхній шар волокон поступово втрачає газоподібні продукти деструкції і поступово перетворюється на модифікований фосфоровмісними нелеткими продуктами коксовий шар. На його поверхні певний час не може утворюватись жар, який міг би стати джерелом займання. Тільки по досягненні температури 625 ^{0}С модифікований шар коксу може загорітися [112].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод пасивного протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням із ЦВМ (деревини, тканин, паперу, очерету), що ґрунтується на використанні розроблених високоефективних екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

2. Аналітично досліджено значну недосконаліть вимог до водних вогнебіозахисних речовин та вогнезахищеної деревини, які містяться в діючих стандартах та державних будівельних нормах. В якості вимоги запропоновано враховувати довготривалий фізико-хімічний процес висолювання антипіренів на поверхні вогнезахищеної деревини, який залежить як від капілярно-пористої структури деревини, так і від складу та фізико-хімічних властивостей водної вогнебіозахисної речовини. Встановлені загальні вимоги до водних вогнебіозахисних речовин для деревини:

- речовини повинні характеризуватись здатністю до реалізації ефектів: охолодження, інгібування, ізолювання, флегматизування.

- речовини у своєму складі повинні мати антипірени (сполуки з атомами азоту і фосфору) та ізолюючий полімерний антисептик.

- речовини за своєю ефективністю вогнезахисту деревини повинні відповідати першій групі (за ГОСТ 16363).

- речовини повинні характеризуватись здатністю до зменшення поширення полум’я поверхнею.

- речовини повинні характеризуватись здатністю до зменшення димоутворення.

- речовини повинні характеризуватись здатністю до зменшення токсичності продуктів горіння.

- деревина, що оброблена водними вогнебіозахисними речовинами, повинна відповідати вимогам щодо корозійної дії на чорні метали.

3. Запропоновано оптимальний склад водних вогнебіозахисних речовин для деревини, що ґрунтується на використанні властивостей їх складових, які забезпечують реалізацію 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 використанням 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 оксиду вуглецю в 4 рази, водню – у 8 разів, та до збільшення флегматизуючого азоту майже на два порядки.

4. Встановлено вплив якісного і кількісного складу запропонованих водних вогнебіозахисних речовин на процеси займання, поширення полум’я і припинення горіння вогнебіозахищеної деревини, що дозволяє отримати матеріал, який відповідає встановленим вимогам і характеризується властивостями:

- матеріал є важкогорючим;
- матеріал не поширює полум’я поверхнею;
- матеріал має малу димоутворювальну здатність;
- продукти горіння матеріалу є помірнонебезпечними;
- матеріал з допустимим рівнем корозійної дії на чорні метали;
- матеріал є стійким до біологічного руйнування.

5. Встановлено вплив якісного і кількісного складу водних вогнебіозахисних речовин на строки збереження вогнезахисних та експлуатаційних характеристик вогнебіозахищеної деревини на протязі її експлуатації. Збереження необхідного рівня вогнезахисту вогнебіозахищеної деревини на протязі щонайменше 12 років забезпечується за рахунок наявності плівки полігексаметиленгуанідингідрофосфата на поверхні захищеної деревини, яка ефективно протидіє процесу висолювання антипіренів. Вогнебіозахищена деревина відповідає нормативним вимогам щодо ступеню корозійної дії на чорні метали.

6. Обгрунтована можливість подовження тривалості початкової стадії пожежі на об’єктах, на яких здійснено вогнебіозахисне обробляння деревини

розробленими водними вогнебіозахисними речовинами, оскільки температура займання вогнебіозахищеної деревини підвищується на 140÷170 ^{0}С порівняно з температурою займання необробленої деревини, та відсутнє поширення полум’я по поверхні вогнебіозахищеної деревини.

7. Розроблена феноменологічна модель процесу вогнезахисту деревини, вогнебіозахищеної водними вогнебіозахисними речовинами ДСА-1М та ДСА-2М, яка враховує комплексну реалізацію ефектів ізолювання, охолодження, інгібування та флегматизування, розкриває сутність механізму вогнезахисту деревини і може буди використана для вдосконалення існуючих та для розроблення нових ефективних засобів вогнебіозахисту деревини.

8. Обгрунтовані вимоги до водних вогнебіозахисних речовин для пасивного протипожежного захисту об’єктів з пожежним навантаженням з тканин, а саме:

- речовина повінна характеризуватись здатністю до реалізації ефектів: охолодження, інгібування, ізолювання, флегматизування;

- речовина за своєю ефективністю вогнезахисту повинна мати здатність перевести легкозаймисті тканини в групу важко займистих матеріалів;

- речовина у своєму складі повинна мати атоми фосфору та азоту, при чому співвідношення фосфоровмісних сполук до азотовмісних сполук повинно бути 2:1;

- речовина повинна мати властивості поверхнево-активних речовин для сприяння «обгортанню» волокон вогнезахисною речовиною;

- речовина повинна мати антисептичні властивості;

- речовина повинна мати здатність до зменшення токсичності продуктів термічного розкладу волокон тканин;

- речовина повинна мати здатність до зменшення димоутворення.

9. Вперше розроблено оптимальний склад водної вогнебіозахисної речовини шляхом використання полімерної речовини – 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 очерета.

10. Розкрито механізм вогнебіозахисної дії ВВБЗР 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, монооксиду вуглецю та до збільшення флегматизуючого азоту.

11. Встановлено вплив якісного і кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-1М на процеси займання, поширення полум’я і припинення горіння вогнебіозахищених тканин і паперу, що дозволяє здійснити перетворення:

- з легкозаймистого матеріалу у важкозаймистий;

- з матеріалу, який легко поширює полум’я поверхнею, в матеріал, що не поширює полум’я поверхнею;

- з матеріалу, продукти горіння якого класифікуються як високо небезпечні для людини, в матеріал, продукти горіння якого класифікуються як помірно небезпечні;

- з матеріалу із високою димоутворювальною здатністю в матеріал з помірною димоутворювальною здатністю;

- з матеріалу, який легко піддається біологічному руйнуванню, в матеріал, який стійкий до біологічного руйнування.

Перетворення легкозаймистих матеріалів у важкозаймисті матеріали підвищує пасивний протипожежний захист об’єктів з пожежним навантаженням із тканин і паперу.

12. Вперше встановлені закономірності перетворення очерету, використаного в якості покрівельного будівельного матеріалу, після оброблення речовиною ФСГ-1М:

- з матеріалу, який легко горить, у матеріал помірної горючості;

- з матеріалу, який легко поширює полум’я поверхнею, в матеріал, що не поширює полум’я поверхнею.

13. Розроблена феноменологічна модель процесу вогнезахисту тканин, паперу, очерету, оброблених ВВБЗР ФСГ-1М, яка враховує комплексну реалізацію ефектів ізолювання, охолодження, інгібування та флегматизування.

РОЗДІЛ 4
РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН В ЯКОСТІ ЗАРЯДІВ ПЕРВИННИХЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖІ

4.1. Обгрунтування вимог до водних вогнебіозахисних речовин для застосування в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння

Аналітичними дослідженнями розділу 1 показана актуальність і перспективність науково-дослідних робіт щодо розроблення ВВБЗР. Теоретичними дослідженнями розділу 2 обгрунтовано доцільність використання тонкорозпилинених струменів води і ВВБЗР [100, 113, 182, 162]. Слід зазначити, що питання стосовно ефективності використання тонкорозпилених струменів води є досить полемним, оскільки є публікації, які відстоюють протилежні точки зору на це питання [2, 150, 241]. Скептичним ставленням до ефективності дії тонкорозпилених струменів є посилання на необхідність створення для цього спеціальної техніки, в якій використовується високий тиск і яку саму по собі не застосовують на початковій стадії розвитку пожежі [2]. Техніка високого тиску дійсно не може бути використана для більшості об'єктів. Цю, суто технічну проблему, можна вирішити застосуванням спеціально розроблених ВВБЗР замість звичайної води, які б мали покращені характеристики порівняно з водою. В першу чергу необхідно знизити поверхневий натяг рідини (ВВБЗР) для досягнення необхідної дисперсності краплин без використання великого тиску. Саме тому інтенсивно розвивається фізико-хімічний підхід, який базується на направленому пошуку (або синтезу) речовин і добавок до води, які покращують її властивості в інтересах пожежогасіння [14, 31, 236].

В розділі 2 теоретично обгрунтвані можливості покращення застосування водних вогнегасних речовин. Зокрема проведені квантово-хімічні розрахунки енергетичних параметрів іон-радикальних комплексів активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу водних вогнегасних речовин доводять, що при

використанні сумішей фосфоровмісних речовин та азотовмісних речовин з’явиться вибірковість тяжіння кисневмісних активних центрів горіння (АЦГ) (O', O'H, HO2' тощо) та водневмісних АЦГ (H', OH', C'H3, C'H2 тощо) до різних продуктів термічного розкладу зазначеної речовини і в результаті може привести до підвищення ефективності як гомогенного, так і гетерогенного інгібування ланцюгових реакцій горіння різних органічних речовин, тобто до ефекту синергізму [108, 162].

Під час розроблення ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М звернули на себе увагу специфічні властивості полімерного антисептика - полігексаметиленгунідин-гідрофосфата (ПГМГФ). Дійсно, ПГМГФ притаманні властивості, характерні для поверхнево-активних речовин [110], а водні розчини при концентрації ПГМГФ більше 50 % здатні утворювати гідрогель [250]. Враховуючи властивості ВВБЗР на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду (ПГМГФК), розглянуті в розділі 3, а також результати аналітичних досліджень розділу 1, можна сформулювати вимоги до ВВБЗР для застосування їх в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння. Отже, речовина заряду повинна:

- мати властивості, що забезпечують змочування поверхонь рідин під час гасіння речовин пожеж класу В;
- мати властивості, що сприяють унеможливленню повторного займання матеріалів пожеж класу А;
- мати поверхневий натяг, нижчий порівняно із 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 із водою дисперсність за однакових умов розпиленя струменя;
- мати більшу в’язкість порівняно із 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/(м^2·с);
- мати температурний діапазон експлуатації від -5 ^{0}С до +50 ^{0}С.

Полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду, який використано в якості основи ВВБЗР ФСГ-1М, може забезпечити виконання майже всіх зазначених вимог, які, в своїй більшості, досліджено в розділі 3. Недослідженими є реологічні властивості розчину ПГМГФК. До уваги потрібно взяти те, що для поліпшення вогнегасних властивостей води до неї додають полімери з великою молекулярною масою і ниткоподібною будовою, наприклад, поліакриаміди і поліетиленоксиди, молекули яких під час руху рідини орієнтуються переважно вздовж потоку [132, 175, 183, 245]. Швидкість течії водного розчину при цьому збільшується, що показує на вагомість вкладу цих добавок на поліпшення реологічних властивостей води (з точки зору її використання для пожежогасіння).

Реологічні характеристики розчину ПГМГФК визначали із застосуванням ротаційного віскозиметру РЕОТЕСТ, в якому використані циліндричні вимірювальні пристрої Сирлє [102, 113, 114].

Для ньютонівських рідин характерна пряма пропорційність напруження зсуву від градієнту швидкості (тобто $n=1$ у степеневої функції $y=\mu x^n$, де y - напруження зсуву, μ – динамічна в'язкість , x – швидкість зсуву). Для неньютонівських (аномальних рідин), які можуть бути описані законом Оствальда-де-Віля, значення степеню $n\neq1$. Як свідчать результати досліджень [114], значення степеню в апроксимуючих функціях (для реологічних кривих) приблизно дорівнює 0,9. Таким чином, можна констатувати факт наявності слабо виражених псевдопластичних ефектів (оскільки $n<1$) у водних розчинів ПГМГФК. Це свідчить про те, що в'язкість цієї рідини значна при малих швидкостях, але з подальшим ростом градієнта швидкості її в'язкість зменшується. Ці властивості можуть мати велике значення для роботи технічних пристроїв пожежогасіння [102, 114].

В роботі [142] обґрунтовано використання дисперсних середовищ із високими градієнтами сил міжфазної взаємодії дисипативних процесів у мастильному шарі (до 7000 об/хв) і вперше виявлено ефект структуроутворюючої

дії речовини групи полегексаметиленгуанідингідрофосфатів (0,5÷1 %-ний водний розчин) у приповерхневих шарах гідростатодинамічних підшипників на водному змащенні, який забезпечує стійкість рідинного тертя в гідродинамічному режимі роботи опорного вузла. Такі явища можуть бути використані і в пожежній техніці [114].

На характер розкладу струменя ВВБЗР при розпилюванні впливають безпосередньо сама хімічна природа рідини, капілярні сили, турбулентні пульсації, кавітація, зовнішні та інерційні сили. Серед усіх сил, які існують у двохфазних системах, сили поверхневого натягу направлені на те, щоб надати краплині форму сфери. Всі інші сили направлені на деформування сферичної форми краплини [236].

В основі створення теорії розпаду струменів лежить класична постановка задачі, яка запропонована Релеєм, коли передбачається, що розпад струменя на краплини обумовлено нестійкістю стовпа рідин кругового перетину під дією сил поверхневого натягу. Гіпотеза Релея була поширена Вебером для в'язкої рідини. У загальному випадку при розповсюджені в повітрі струменя рідини в його структурі зустрічаються наступні характерні складові: компактний, роздріблений та розпилений [236].

Вебер визначив залежність довжини суцільної частини струменя від умов витікання і фізичних властивостей рідини. Експериментально встановлено, що при швидкості витікання струменя в атмосферу до 30 м/с довжина компактної частини збільшується з підвищенням швидкості витікання, а при зменшені скорочується [236].

Характер і можливі різновиди процесу руйнування краплин і струменів рідини в газовому потоці і спектр частинок, що виникають внаслідок розпилення, теоретично поки що досліджені недостатньо. У зв'язку з цим єдиним надійним джерелом інформації про поведінку краплин і струменів є експериментальний метод.

Для вивчення витікання струменів з отворів та насадків використовували установку Маріотта [114].

Проведені дослідження витікання з установки Маріотта води та водних розчинів ПГМГФК показали, що довжина струменя при використанні циліндричного насадку в обох випадках становить 54 см при напорі H = 67 см [102, 114]. Але форма струменю при досліджені водного розчину ПГМГФ дещо відрізняється від форми струменю при дослідженні витікання води (рис.4.1 та рис.4.2) [114].



Рисунок 4.1 - Форма струменю води при витіканні через циліндричний насадок з установки Маріотта (Н= 67 см)

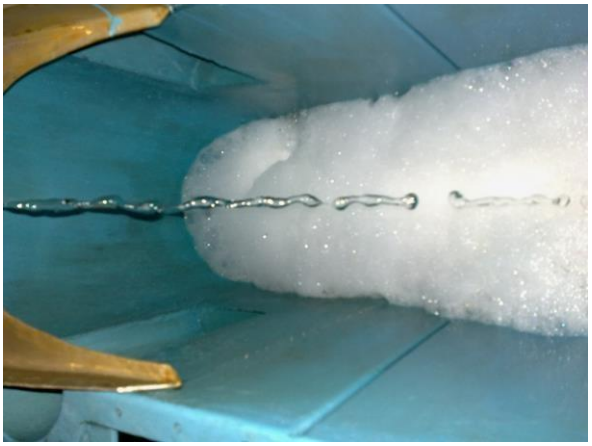


Рисунок 4.2 - Форма струменю водного розчину ПГМГФК при витіканні через циліндричний насадок з установки Маріотта (Н= 67 см)

Як видно з рисунків 4.1 та 4.2, струмінь водного розчину ПГМГФК довше зберігає компактну «циліндричну» форму (тобто струмінь пізніше розпадається на краплини) порівняно із струменем води. Це дає підстави для гіпотези про те, що при використанні в умовах більш високих тисків (на кшталт робочих тисків в

реальній пожежній техніці) довжина струменю водного розчину ПГМГФК може бути більшою, ніж довжина струменю води. Необхідно також звернути увагу і на те, що візуально розмір крапель води більший за розмір крапель водного розчину ПГМГФК.

Подальше перебування первинних крапель у газовому потоку буде приводити до подальшого подрібнення. Як зазначено в [46] оцінку мінімального і максимального діаметрів крапель води і водного розчину ПГМГФК, які утворюються розпиленням струменів за допомогою різних пристроїв, можуть бути визначені наступним чином:

$$d_{min} = d_0 (B/ We)^{1/3};$$
$$d_{max} = d_0 (B/ 3)^{1/3}; \qquad (4.1)$$
$$d_{сер} = 0{,}9\, d_0 (B)^{1/3} lg(We/3),$$

де d_0 – діаметр первинних крапель при розпаді струменя, B = 0,38 – експериментальний коефіцієнт, We – число Вебера.

При розпаді струменів (перехід в режим розпилення) доцільно значення числа Вебера прийняти за 14 (відповідно до [46]). Тоді

$$d_{min} = 0{,}301\, d_0;$$
$$d_{max} = 0{,}502\, d_0; \qquad (4.2)$$
$$d_{сер} = 0{,}436\, d_0.$$

Тобто при розпиленні розмір краплин визначається діаметром первинних крапель.

Здатність до утворення розпилених струменів води і водних розчинів ПГМГФК досліджували на лабораторному пневматичному розпилювачі. Первинний розмір краплин рідини вимірювали за допомогою мікроскопа „Polmy A”. Результати вимірювання і обчислення розміру краплин наведено в таблиці 4.1. Як засвідчують дані таблиці 4.1, водний розчин ПГМГФК має більшу здатність до розпилення струменів. При швидкості потоку в 60 м/с розмір краплин може зменшуватись до 150-200 $x10^{-6}$ м, що класифікується як розпиленість струменів середньої дисперсності, що можна використати для

підвищення вогнегасної здатності вогнегасної речовини, що розробляється [114, 162].

Таблиця 4.1.

Результати вимірювання і обчислення розміру краплин рідин [162]

Параметри	Рідини					
	Вода			водний розчин ПГМГФК		
Швидкість потоку, м/с	20	40	60	20	40	60
Початковий діаметр краплин d_0, 10^{-6} м	2500	2000	1500	1600	1200	600
d_{min} , 10^{-6} м	752	602	451	461	324	160
d_{max} , 10^{-6} м	1255	1004	783	783	522	261
d_{cep} , 10^{-6} м	1090	872	654	654	489	248

4.2. Розроблення оптмального складу водної вогнебіозахисної речовини для застосування в якості заряда первинних засобів пожежогасіння

Результати досліджень підрозділу 4.1 вказують на наявність корисних (для пожежогасіння) властивостей водних розчинів ПГМГФК. Але для визначення оптмального складу водної вогнебіозахисної речовини, яка б відповідала всім вимогам підрозділу 4.1, на першому етапі доцільно скористатись відомим прийомом фізичної хімії полімерів і колоїдів [235] подібно до того, як це було зроблено в розділі 3 під час розробляння складу ВВБЗР ФСГ-1М.

Скористалися додаванням до основи прогнозованої за якісними і кількісними фізико-хімічними властивостями речовину. Додали до ВВБЗР ФСГ-1М 0,2% пілівко-утворюючої поверхнево-активної речовини (ПАР) S.F.P.M. Таким чином, було запропоновано склад водної вогнебіозахисної речовини, яка отримала технічну назву ФСГ-2М.

Подальші дослідження зосередили на вивченні властивостей ФСГ-2М, оскільки потенційно псевдо пластичні ефекти (раніше виявлені при реологічних дослідженнях) мають більш явно проявлятися у зазначеній ВВБЗР.

Розчинність ПГМГФК у воді дуже висока, особливо з підвищенням температури. На відміну від ендотермічного процесу розчинення карбаміду у воді, процес розчинення ПГМГФК є екзотермічним. Густина ВВБЗР ФСГ-2М більша за густину води, із збільшенням концентрації речовини показник густини збільшується, а значення показника pH практично не змінюється в діапазоні

концентрацій від 4% до 60% (див. табл. 4.2 [162]). Це свідчить про те, що комплексна сполука відноситься до речовин, які здатні проявляти буферні властивості, що притаманно сполукам ортофосфорної кислоти [40].

Таблиця 4.2

Результати дослідження фізико-хімічних властивостей ВВБЗР ФСГ-2М

Показник	Концентрація комплексної сполуки у ВВБЗР ФСГ-2М, %					
	0	4,0	8,0	16	31,7	64
Водневий показник, pH	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	32,976	31,03	29,32	28,91

Показник поверхневого натягу рідин визначали методом відриву кільця. Із-за специфічних властивостей ВВБЗР ФСГ-2М визначити температуру замерзання вдалося тільки для 4,0% та 8,0% розчинів – $T_{зам}$ = - 4,8 ^{0}C та $T_{зам}$ = -9,8 ^{0}C, відповідно. Визначенню температури замерзання для більш високих концентрацій ПГМГФК заважав процес гелеутворення [48, 127, 162, 183].

Були проведені дослідження інгібувальних, флегматизувальних та охолоджувальних властивостей ВВБЗР ФСГ-2М, які показали, що ці властивості подібні до властивостей ВВБЗР ФСГ-1М (див. розділ 3).

Під час визначення раціонального складу ВВБЗР ФСГ-2М було взято до уваги той факт, що при концентраціях ПГМГФК у воді більше 50% утворюється гідрогель, що може стати перепоною для витікання ФСГ-2М з вогнегасників. На швидкість гелеутворення впливає також і жорсткість води, особливо при наявності іонів Ca^{+2} , тому концентрація ПГМГФК в складі ФСГ-2М може бути в межах 30÷50 %. Додаткове врахування економічного важелю спонукає наблизитись до концентрації в 30%.

Дисперсність розпилених струменів ВВБЗР ФСГ-2М (концентрація ПГМГФК - 31,7%) досліджували із застосуванням експериментального метода [162]. Сутність метода полягала в наступному. Заданий розчин водної вогнегасної речовини подавався тонкорозпиленим струменем для гасіння пожежі класу А згідно з методикою. У зону розпилу вносили чашку Петрі із нанесеною на її дно

касторової оливи. Краплини водної вогнегасної речовини збирались на дні чашечки Петрі, після чого вона фотографувалась за допомогою цифрового мікроскопу (рис. 4.3). З метою можливості масштабування отриманих зображень до чашечки Петрі, на її дно, укладався шматок жили дроту визначеного діаметру (140 мкм). Отримані зображення оброблялись за допомогою растрового графічного редактору Adobe Photoshop CS3 з метою підвищення контрастності зображень крапель. Оброблені файли зберігались та оброблялись за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для проведення аналізу зображень UTHSCSA ImageTool (Університет Техаса, США). Це програмне забезпечення дозволяє за визначеного масштабу, величина якого спирається на відомий розмір (діаметр шматка жили дроту), класифікувати та визначати площу кожної краплі. Результати формувались у вигляді таблиці та в подальшому оброблялись за допомогою табличного процесору Microsoft Excel 2003 [271].

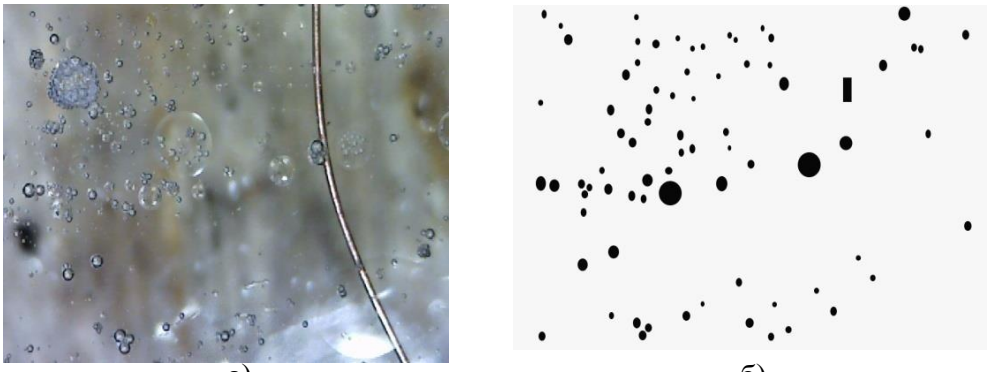
Обробка результатів проведених дослідів, а саме розрахунок розподілу розмірів краплин виконувалась відповідно до додатку В європейських норм CEN/TS 14972:2008 Fixed firefighting systems - Watermist systems - Design and installation (Стаціонарні системи пожежогасіння - Системи тонкрозпиленої води - Проектування та установка) [162, 271].

Для кожної краплини визначався її діаметр. Отримані значення діаметрів крапель сортувались за їх зростанням. Після чого краплі сортувались за класами, де під класом розуміється діапазон діаметрів краплин, співвідношення між яким складає 1,25. Початком першого класу є мінімальне отримане значення діаметру краплини, його закінченням - значення мінімального діаметру збільшеного в 1.25 рази. Класи створювались доки значення кінцевого діаметру не перевищувало діаметр найбільшої краплини.

Визначаючи співвідношення загальної суми кубів діаметрів крапель в межах класу по відношенню до загальної суми кубів діаметрів крапель визначається об’ємний відсоток розподілу:

$$Volume\%_{class} = \frac{\sum_{i-1}^{N_c} D_i^3}{\sum_{i-1}^{N}} 100\%, \quad (4.3)$$

де N_c- кількість краплин у класі; N – загальна кількість краплин.



а) б)

Рисунок 4.3 - Фотографія розпилених краплин ПГМГФК: а) фото у чашечці Петрі після розпилу; б) оброблені результати визначення розміру краплин

Потім визначалось значення $D_{v0.1}$, $D_{v0.5}$, $D_{v0.9}$, що характеризують значення діаметрів крапель по відношенню до загального об'ємного співвідношення, тобто краплини менш якого діаметру складали відповідно 10, 50, та 90% загального об'єму краплин. За значенням $D_{v0.9}$ робились відповідні висновки щодо дисперсності розпилу струменів досліджуваних водних вогнегасних речовин.

Визначалось співвідношення SPAN, що характеризує загальний розподіл крапель:

$$SPAN = \frac{D_{v0.9} - D_{v0.1}}{D_{v0.5}}. \quad (4.4)$$

Співвідношення SPAN дає уяву про розподіл за дисперсністю, тобто чим менше це співвідношення тим більш рівномірна дисперсність досліджуваного струменя.

Результати проведених експериментальних досліджень наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати визначення дисперсності зразків водних вогнегасних речовин

Позначення показника	Визначені значення дисперсності краплин досліджених зразків водних вогнегасних речовин	
	Вода	ВВБЗР ФСГ-2М
D10, мкм	248,94	73,55
D20, мкм	256,18	68,27
D30, мкм	276,20	74,99
D32, мкм	321,05	90,49
Dv01, мкм	209,64	58,46
Dv05, мкм	350,43	90,81
Dv09, мкм	434,35	101,90
SPAN	0,641244626	0,478343504

Результати експериментальних досліджень, що наведені в таблиці 4.3, засвідчують, що комплексна хімічна сполука, яка досліджувалась, має значний вплив на розмір краплин за діаметром у водних струменях. Введення до складу води 31,7% цієї сполуки (яка має поверхнево-активні властивості), призводить до зменшення розмірів краплин ВВБЗР не менш ніж в 3 рази.

Були також проведені дослідження з визначення впливу концентрації ПГМГФК (молекулярна маса ПГМГФ більше 9000 в.о.) у водному розчині на ефективність гасіння пожежі класу А з використанням вогнегасника ВВ-9 [79, 101, 127, 162].

Дослідження критеріїв ефективності водної вогнегасної речовини в залежності від концентрації полігексаметиленгуанідингідрофосфату проводили з використанням водяного вогнегасника ВВ-9 [39].

Визначення довжини струменя та тривалість гасіння водної вогнегасної речовини проводили згідно з [79].

Випробування проводили на відкритому, спеціально обладнаному майданчику, розташованому у захищеному від вітру місці при температурі навколишнього середовища (20±5) °С [101, 127, 162].

Довжину струменя визначали мірною рейкою. Також використовували контрольну розмітку стіни, темного кольору [39, 79]. Результати досліджень по

визначенню довжини струменя (L) в залежності від концентрації полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду представлені на рисунку 4.4.

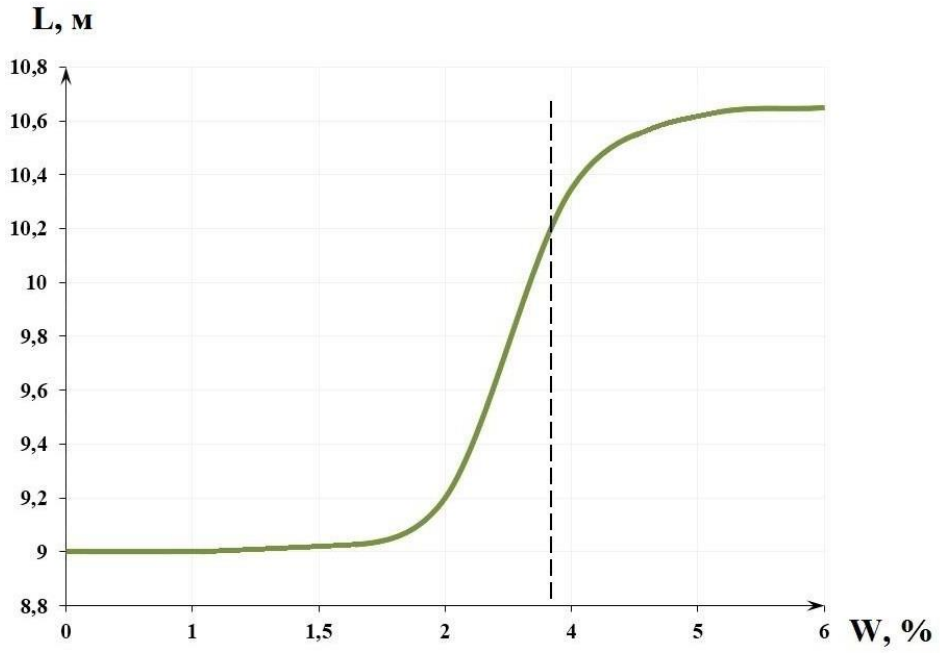


Рисунок 4.4 - Залежність дальності струменя водяного вогнегасника ВВ-9 від концентрації ПГМГФК

Згідно технічних характеристик водного вогнегасника ВВ-9, дальність струменя при використанні в якості водної вогнегасної речовини води складає 6-8 м [78]. Як видно з рисунку 4.4, дальність струменя при використанні 2 %-ного розчину ПГМГФК зростає більше 9м, а наявність в розчині 3-4% даної речовини призводить до зростання дальності струменя більше 10 м. На нашу думку, це пов’язано з конформаційними змінами в молекулі ПГМГФК, що дає можливість молекулі ПГМГФК під час руху орієнтуватися переважно вздовж потоку, оскільки в області концентрації (приблизно від 1,0 до 3,0 - 5,0 мас.%) відбуваються конформаційні зміни в макромолекулах ПГМГФК, а саме: макромолекули приймають все більш розгорнуту конформацію [183].

Згідно технічних характеристик водних вогнегасників час викиду заряду вогнегасника ВВ-9 складає 45с. [39]. Важливо було дослідити як впливатиме наявність невеликих концентрацій ПГМГФК (до 5%) на час викиду заряду.

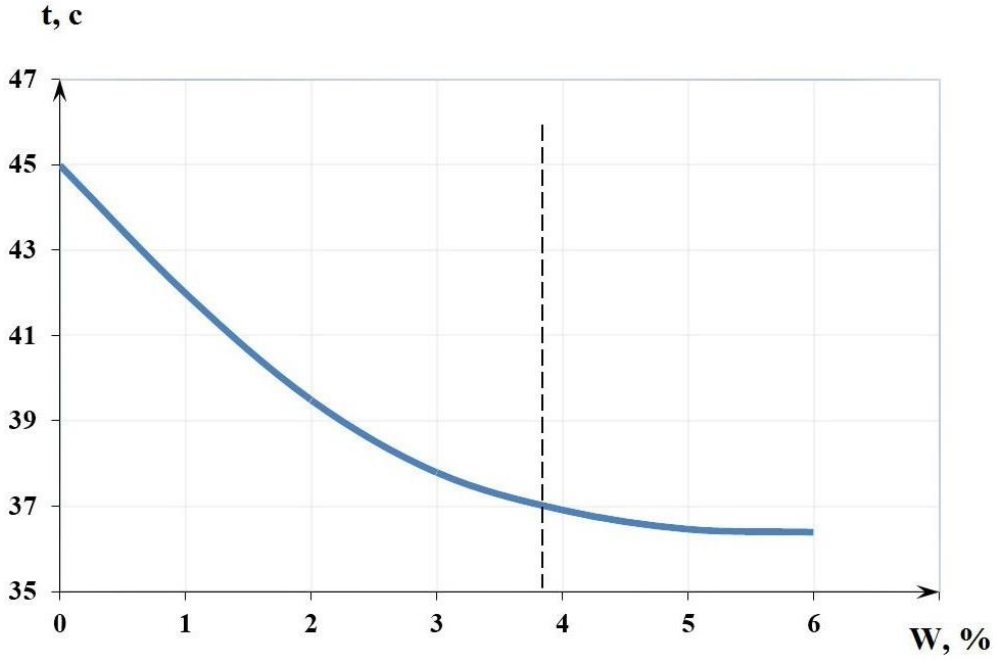


Рисунок 4.5 - Залежність часу викиду водної вогнегасної речовини від концентрації ПГМГФК.

На рисунку 4.5 представлено залежність часу викиду водної вогнегасної речовини від концентрації ПГМГФК, яка підтверджує гіпотезу про поліпшення текучості води (вода з добавками полімерних речовин), завдяки яким зменшується гідравлічний опір і турбулентність потоків [132, 175].

Дослідження тривалості гасіння в залежності від концентрації ПГМГФ проводили на модельному осередку пожежі класу 1А. Це штабель з дерев'яних брусків з поперечним перерізом у вигляді квадрату зі стороною 40 мм [79] (рис. 4.6).

Для виготовлення модельних осередків використовували заготовки деревини із сосни звичайної відповідно до [68] з вологістю від 10 % до 14 % [79].

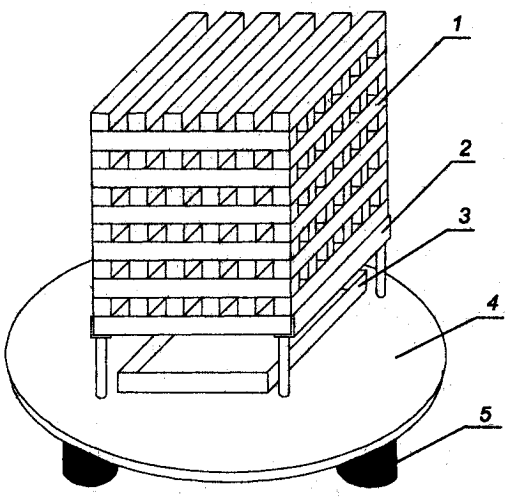


Рисунок 4.6 - Загальний вигляд модельного осередку пожежі 1А:

1 – штабель з дерев'яних брусків;

2 – опори;

3 – деко для підпалу штабеля;

4 – вагова платформа;

5 – вимірювальний датчик

Бруски, що утворюють поверхневі грані штабеля, для міцності закріплювалися скобами. Штабель розміщувався на двох сталевих кутиках згідно з [2], встановлених на жорстких металевих опорах.

Бруски кожного наступного шару клалися перпендикулярно до брусків шару, що лежить нижче таким чином, щоб при цьому утворювалися канали прямокутного перерізу по усьому об'єму. Форма штабеля повинна наближатися до кубу. Деко відповідного розміру розміщували на підлозі (платформі) під штабелем. Виставляли деко горизонтально, дно його покривали шаром води як базою і заливали бензин А-76 літнього виду згідно з [59] у кількості 1,1 л. Підпалювали пальне. Після вигоряння пального деко забирали з-під штабеля. Вільне горіння модельного осередку продовжувалося до моменту вигорання (45 ± 2) % від його початкової маси, після чого розпочинали гасіння.

З відстані не менше 1,8 м спрямовували струмінь вогнегасної речовини на фронтальну поверхню модельного осередку. Продовжували гасіння з меншої

відстані, спрямовуючи струмінь на верхню, нижню і бічну поверхні (за винятком тильної поверхні осередку) [79].

Залежність тривалості гасіння модельного вогнища 1А від концентрації ПГМГФК наведено на рисунку 4.7.

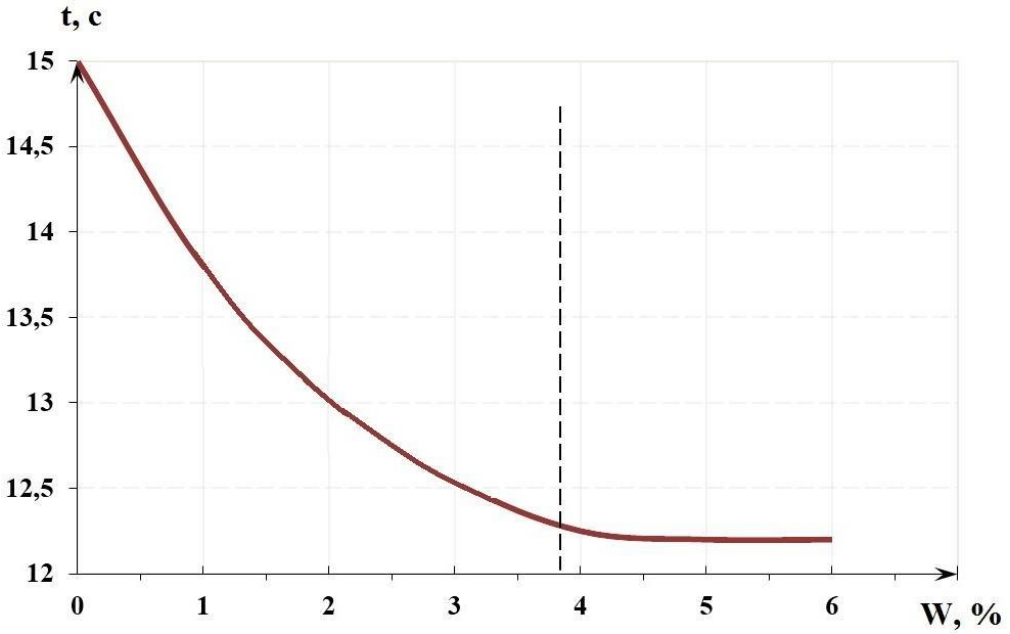


Рисунок 4.7 - Залежність тривалості гасіння від концентрації ПГМГФК

Як видно з рисунку 4.7, тривалість гасіння при використанні води складає 15с. При використанні в якості водної вогнегасної речовини ФСГ-2М ця цифра знижується до 12с.

Дослідження з визначення показника корозійної активності ФСГ-2М проводили за методикою визначення показника корозійної активності водних та водопінних вогнегасних речовин, а також водних розчинів, в тому числі і вогнезахисних речовин, яка розроблена в УкрНДІЦЗ.

Методика встановлює порядок проведення досліджень і випробувань з метою визначення показника корозійної активності водних і водопінних вогнегасних речовин, а також водних розчинів, у тому числі і вогнезахисних речовин.

Сутність методу полягає у визначенні середньої швидкості втрати маси з одиниці площі металевих пластин під час їх експонування у досліджуваному водному розчині. Для цього готують три скляні циліндричні посудини та шість

металевих пластини з розрахунку по 2 пластини на кожну посудину. Скляні посудини промивають дистильованою водою і споліскують розчином, що досліджується. Визначають об’єм розчину, який необхідно залити в скляні посудини, щоб він покрив підвішені пластини до половини їх висоти. Металеві пластини шліфують шкуркою, промивають ацетоном і протирають фільтрувальним папером. Нумерують пластини, зважують, затісують номери пластин, значення їх маси та номери посудин. Заливають досліджуваний розчин у посудини.

Випробування проводять в лабораторних умовах. Підвішують дві металеві пластини на підставки за допомогою гачків, опускають підставки з пластинами у скляні посудини із зануренням пластин до половини їх висоти у досліджуваний розчин і герметично закривають кришкою.

Після експонування пластин у досліджуваному розчині протягом 30 діб визначають втрату маси пластин. Для цього виймають з посудини обидві пластини, промивають водою і проводять травлення, повністю занурюючи пластини в 10 % розчин виннокислого амонію або виннокислого натрію на 1,5-2 години. Пластини знову промивають дистильованою водою, витирають насухо фільтрувальним папером і зважують. Визначають величину втрати маси пластини як різницю результатів її зважування після обробки (експозиції в досліджуваному розчині і травлення) та перед обробкою. Площу поверхні контакту пластин з досліджуваним розчином визначають шляхом вимірювання лінійних розмірів тієї частини пластини, яка була занурена в розчин.

Середню питому швидкість втрати маси пластини (Vп, кг/(м^2•с)) розраховують за формулою:

$$V_П = \frac{P}{S*t}, \qquad (4.5)$$

де Р - втрата маси пластини, кг;

S - площа поверхні контакту пластини з розчином вогнегасної речовини, м^2;

t- тривалість експозиції пластини в розчині вогнегасної речовини, с;

t= 2592000 с

За результат визначення корозійної активності приймають середнє арифметичне значення результатів двох паралельних вимірювань

Допустима розбіжність між результатами паралельних вимірювань, які отримані за однакових умов випробувань не повинна перевищувати ±10 % відносно середнього арифметичного значення

Результати досліджень з визначення показника корозійної активності ФСГ-2М наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Результати досліджень з визначення показника корозійної активності ВВБЗР ФСГ-2М

Маса пластини до випробувань m_1, г	Маса пластини після випробувань m_2, г	Втрата маси пластини P = (m_1 - m_2), кг	Ширина пластини, мм	Довжина пластини, мм	Площа пластини s, м^2	Корозійна дія (швидкість корозії), кг/(м^2·с)
33,666	33,649	0,000017	30,0	38,7	0,001161	$5{,}639 \cdot 10^{-9}$
33,6004	33,582	0,0000184	32,4	39,1	0,00126684	$5{,}611 \cdot 10^{-9}$
Середнє значення						$5{,}625 \cdot 10^{-9}$

Розбіжність між результатами випробувань:

$$\Delta V\text{п} = \frac{V\text{п} - V\text{п}_{ср}}{V\text{п}_{ср}} \qquad \Delta V\text{п} = (5{,}639 \cdot 10^{-9} - 5{,}625 \cdot 10^{-9})/5{,}625 \cdot 10^{-9} = 0{,}0025 < 0{,}1$$

Дані таблиці 4.4. свідчать про те, що ВВБЗР ФСГ-2М, розробленого складу, відповідає вимогам, що наведені в підрозділі 4.1, стосовно корозійної активності вогнегасної речовини.

На завершальному етапі застосовано метод, який ґрунтується на функції бажаності Харрингтона [6], аналогічно як в п.3.8. Отже, показано, що ВВБЗР ФСГ-2М (концентрація ПГМГФК - 31,7 %) відповідає розробленим вимогам, що висуваються до водних вогнебіозахисних речовин для застосування їх в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння.

4.3 *Дослідження закономірностей впливу якісного і кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М на процеси гасіння ЦВМ*

Дослідження з виявлення впливу хімічного складу водних вогнегасних речовин на їх вогнегасну ефективність під час гасіння модельних вогнищ класу А проводилися за методикою, що наведена в додатку В [182].

Сутність методики полягає у визначенні вогнегасної ефективності досліджуваних водних вогнегасних речовин за рахунок визначення їх маси, яку необхідно подати, за однакових умов, на гасіння вогнища пожежі класу А тонкорозпиленими струменями. Відносну вогнегасну ефективність (Z) досліджуваних водних вогнегасних речовин визначали порівняно із вогнегасною ефективністю води (див. додаток В) [182].

Для розрахунку показника відносної вогнегасної ефективності кожної водної вогнегасної речовини, що досліджувалася, використовували середнє арифметичне значення величини Δm, що було отримано в результаті проведення трьох дослідів для кожного виду водної вогнегасної речовини. Оброблення результатів експериментальних досліджень проводилася відповідно до [204]. Методика пройшла апробовування та використана під час виконання науково-дослідних робіт, зокрема [115].

Під час проведення досліджень були використані водні вогнегасні речовини різного хімічного складу, які впливають на процес вогнегасіння модельного вогнища пожежі класу А. Результати проведених експериментальних досліджень з визначення відносної вогнегасної здатності водних вогнегасних речовин наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Усереднені результати визначення відносної вогнегасної здатності тонкорозпилених струменів деяких водних вогнегасних речовин (клас пожежі - А, час вільного горіння 300с, площа горіння - 0,2268 м^2) [127, 162]

Вогнегасна речовина	Вміст добавки до води, % мас	Середня маса вогнегасної речовини, витраченої на гасіння, кг	Відносна вогнегасна здатність вогнегасної речовини
Вода	-	5±	1,00
Вода + 2 % ПУ типу Pirena	2	3±	1,66
Вода + 2 % ГУР Prevento	2	1,6±	3,75
Вода + 34% K_2CO_3 + 0,5% ПУ типу AFFF	34/0,5	1,2±	4,16
ВВБЗР ФСГ-2М	32	1,014±	4,93

Із даних таблиці 4.5 випливає, що водна вогнегасна речовина із змотувачем типу Pirena має більшу вогнегасну здатність під час гасіння пожежі класу А в 1,66 рази порівняно із водою. Цей ефект досягається за рахунок зниження поверхневого натягу рідини, що призводить до більш тонкого подрібнення крапель струменя ВВР.

ВВР з 2% гелеутворювальної речовини типу Prevento збільшує її вогнегасну здатність для пожеж класу А більш ніж в 3 рази. Підвищення вогнегасної здатності водної вогнегасної речовини можна пояснити тим, що під час гасіння пожежі збільшується кількість факторів, що забезпечують припинення горіння. Основу такої речовини становить вода, тому на першому етапі головним чином проявляється охолоджувальна дія. Під час нагрівання починається процес випаровування води з гелеутворювальної речовини. Одночасно відбувається розведення зони горіння водяною парою. При подальшому нагріванні на поверхні деревини утворюється ксерогель, який чинить теплоізолюючу дію. Оскільки процес гелеутворення сповільнює стікання вогнегасної речовини з вертикальних та похилих поверхонь, що сприяє загальному підвищенню ефективності вогнегасної дії.

Додавання до води інгібувальних добавок максимально підвищує вогнегасну здатність. Наочно це показує результат додаванні до води інгібувальної солі, а також піноутворювача типу AFFF (вогнегасна здатність збільшується в 4,16 рази).

Необхідно відзначити, що збільшення концентрації піноутворювачів або гелеутворюючих речовин у складі ВВР не призводить до лінійного покращення результатів пожежогасіння [133], а, у випадку з гелеутворювальними речовинами, навіть унеможливлює утворення ВВБЗР [295].

Найкращі результати були отримані при застосуванні ВВБЗР ФСГ-2М, відносна вогнегасна здатність якої складає 4,93, тобто вона майже в 5 разів ефективніша за воду. Досягнута ефективність пов’язана з виконанням вимог до ВВБЗР, які наведено в п.4.1: ВВБЗР ФСГ-2М має поверхневий натяг - 29,32 мН/м, що в 2,2 рази менше за поверхневий натяг води (тому ФСГ-2М краще

змочує поверхню деревини, особливо коли вона під час горіння стає гідрофобною); ВВБЗР характеризується гелеутворюючою здатністю, яка реалізується при випаровуванні води; розмір краплин струменя в 3 рази менший від краплин води за однакових умов подачі; ФСГ-2М характеризується показником корозійної активності – $5{,}625 \cdot 10^{-9}$ кг/(м^2·с) , що задовольняє відповідним вимогам; температурний діапазон експлуатації становить від -9 ^{0}С до +60 ^{0}С. Зазначені властивості забезпечують реалізацію комплексного впливу всіх факторів припинення горіння: охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання (за рахунок теплоізолюючої дії вогнезахисного гелю). Необхідно відзначити, що обробляння поверхні дерев'яних брусків ВВБЗР ФСГ-2М унеможливлює її підпалювання. Цей феномен може мати велике значення під час гасіння пожеж на початковій стадії розвитку пожежі, коли пожежне навантаження сформована головним чином за рахунок деревини та інших целюлозовмісних матеріалів. Зазвичай при гасінні такого навантаження водою спостерігається повторне займання, що потребує надлишкових витрат води, що, в свою чергу, призводить до значних економічних збитків (наприклад, при гасінні пожеж в житловому секторі).

4.4. Дослідження закономірностей впливу якісного і кількісного складу водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М на процеси гасіння пожежі класу В

Теоретичними дослідженнями розділу 2 була спрогнозована вогнегасна ефективність окремих речовин, сумішей, комплексних хімічних сполук у разі створення необхідного співвідношення атомів фосфору та азоту. Експериментальні дослідження підрозділів 4.1 виявили специфічні фізико-хімічні і реологічні властивості ВВБЗР ФСГ-2М, корисні для цілей пожежогасіння. Експериментальними дослідженнями підрозділу 4.3 було доведено високу вогнегасну здатність ФСГ-2М під час гасіння вогнищ класу А. Дослідження закономірностей впливу якісного і кількісного складу ВВБЗР ФСГ-2М на процеси гасіння вогнищ класу В проводили за методикою визначення показника відносної

вогнегасної ефективності тонко розпилених водних речовин для гасіння вогнищ класу В, яка розроблена в УкрНДІЦЗ (див. додаток В) [127].

Методика призначена для визначення показника відносної вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ класу В з використанням тонкорозпилених струменів, а також впливу на його значення хімічного складу та концентрації активних добавок до води [14] (див. Додаток В).

Для визначення критичної інтенсивності подавання зразків водних вогнегасних речовин для гасіння вогнищ класу В її тонкорозпиленими струменями використовують установку, розроблену в УкрНДІЦЗ (див. додаток В).

Випробування проводили в лабораторних умовах у витяжній шафі з примусовою вентиляцією. Попередні випробування проводять на дистильованій воді. При цьому підбирають умови подавання: мінімальний робочий тиск і висоту подавання розпиленої води, коли досягається гасіння дека визначеного діаметру.

Подальші випробування досліджуваних водних вогнегасних речовин проводять за цими параметрами, дотримуючись однакових умов гасіння.

Визначають витрату вогнегасної речовини ваговим методом, зібравши тонкорозпилений розчин до попередньо зваженої посудини впродовж визначеного проміжку часу у трьох паралельних дослідах.

Витрату вогнегасної речовини (води, ВВБЗР ФСГ-2М) за одиницю часу R ($см^3/с$), визначають за формулою:

$$R=\frac{m_1-m_0}{\tau\rho}; \qquad (4.6)$$

де m_0 – маса посудини для збирання розпиленої вогнегасної речовини, г;

m_1 – маса посудини для збирання розпиленої вогнегасної речовини зі зібраною речовиною, г;

τ – час збирання вогнегасної речовини, с;

ρ – густина досліджуваної вогнегасної речовини, $г/см^3$.

За результат визначення показника витрати вогнегасної речовини беруть середнє арифметичне трьох результатів випробувань. Максимальне відхилення

результатів визначення, одержаних одним оператором при однакових умовах, від середнього арифметичного значення не повинне перевищувати 5%.

Розраховують критичну інтенсивність подавання ВВБЗР ФСГ-2М, при якій досягається гасіння:

$$I_{кр} = \frac{R}{S}, \text{ см}^3\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}, \quad (4.7)$$

де S – площа дека).

Показник відносної вогнегасної ефективності вогнегасної речовини визначають за формулою:

$$K = \frac{I_{кр H_2O}}{I_{кр ВВР}}, \quad (4.8)$$

де $I_{кр H_2O}$ - критична інтенсивність подавання води, $\text{см}^3\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}$;

$I_{кр ВВР}$ – критична інтенсивність подавання водної вогнегасної речовини, $\text{см}^3\text{с}^{-1}\text{м}^{-2}$.

Результати досліджень представлені на рисунку 4.8.

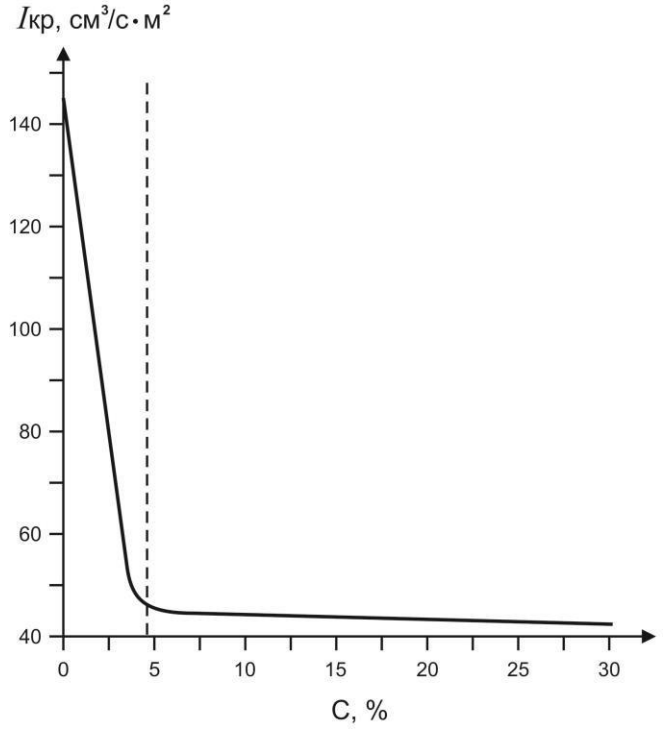


Рисунок 4.8 - Залежність критичної інтенсивності подавання ВВБЗР на гасіння вогнища класу В від концентрації активної речовини (ПГМГФК + 0,2% S.F.P.M.) у складі ВВБЗР ФСГ-2М

Під час гасіння спостерігався такий феномен: коли ВВБЗР ФСГ-2М попадає на поверхню горючої речовини, вона не занурюється, а змочує її, утворюючи плівку, яка витискує полум'я до борту деко, з подальшим гасінням горючої рідини.

З рисунку 4.8 видно, що для гасіння горючої рідини водою необхідно, щоб І*кр* досягло значення 145 $см^3/(с \cdot м^2)$, а І*кр* для ВВБЗР ФСГ-2М достатньо значення 45 $см^3/(с \cdot м^2)$, тобто її відносна вогнегасна здатність в 3,21 рази більша.

4.5. Феноменологічна модель вогнегасної дії водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2М під час гасіння пожеж класів А та В на початковій стадії їх розвитку

Використовуючи результати теоретичних досліджень розділу 2, результати аналітичних та експериментальних досліджень фізико-хімічних властивостей води і ВВБЗР ФСГ-2М, які проявляються під час гасіння вогнищ пожеж класу А та В, можна запропонувати феноменологічну модель механізму вогнегасної дії ФСГ-2М. Ця речовина має специфічні реологічні властивості: вона є не ньютонівською рідиною з слабо вираженими псевдо пластичними властивостями: в'язкість її значна при малих швидкостях витікання, але з подальшим ростом градієнта швидкості в'язкість зменшується. Отже, струмінь ВВБЗР ФСГ-2М довше зберігає компактну «циліндричну» форму порівняно із водою, але при розпаді струменя утворюються краплини меншого розміру порівняно із водою. При швидкостях потоку в 60 м/с , які реалізуються у звичайних протипожежних пристроях (вогнегасниках тощо), розмір краплин розчину зменшується до $150 \div 200 \cdot 10^{-6}$ м, що класифікується як розпиленість струменів середньої дисперсності. При попаданні краплин ФСГ-2М у факел полум'я між ними відбуваються тепломасообмінні процеси: вода випаровується і охолоджує об'єм полум'я, визначений краплинами. В цей же час у факелі відбувається флегматизування його об'єму водяною парою. Краплини ВВБЗР, які позбулись до 60% води , перетворюються спочатку у гідрогель з подальшим переходом у тверді

частинки комплексної хімічної сполуки. Далі вони стають частинками високодисперсного порошку і під дією температури розкладаються на молекули, атоми, іони, що вступають у взаємодію з активними радикалами полум'я. Інгібування ланцюгових реакцій окиснення горючих газів може відбуватись як за гомогенним та і за гетерогенним механізмом, в основі яких є утворення іон-молекулярних та іон-радикальних комплексів.

Представлений механізм вогнегасної дії ВВБЗР ФСГ-2М в об'ємі полум'яного горіння є однаковим як для гасіння матеріалів пожежі класу А, так і для матеріалів пожежі класу В. Оскільки зазначені матеріали відрізняються за своєю фізичною сутністю, відрізняються механізми припинення горіння при контакті частинок ФСГ-2М з їх поверхнею.

Для матеріалів пожежі класу А, наприклад, деревини, цей механізм можливо представити наступним чином. Великі краплини ВВБЗР, які не встигли висохнути в об'ємі полум'я, досягають поверхні і, завдяки низькому поверхневому натягу, утворюють плівку із гідрогеля, яка вподальшому перетворюється у розплавлену плівку комплексної хімічної сполуки. Плівка гідрогелю (розплаву) забезпечує протікання наступних фізичних і фізико-хімічних процесів. Завдяки ендотермічним ефектам при розкладі комплексної хімічної речовини відбувається охолодження твердої поверхні. Під час плавлення зазначеної речовини виділяються інертні гази N_2, CO_2, які флегматизують зону окислювальних реакцій. Розплавлена плівка є бар'єром для двох дифузійних процесів: доступу кисню в шар деревини, де відбувається хімічна деструкція макромолекул целюлози, та виходу горючих газів із поверхневого шару деревини. З часом утворюється звуглений шар деревини, який просочений антипіреном. Цей вогнезахисний звуглений шар деревини унеможливлює повторне займання деревини, що надзвичайно важливо для гасіння деревини на початковій стадії розвитку пожежі.

При гасінні ж матеріалів пожежі класу В, значну роль відіграє добавка плівкоутворюючого ПАР S.F.P.M.: краплини ВВБЗР при попаданні на поверхню

горючої рідини не занурюються, а утворюють ізолюючу плівку, що виконує функцію бар’єру для випаровування, що пришвидшує припинення горіння.

Таким чином, феноменологічна модель вогнегасної дії ВВБЗР ФСГ-2М під час гасіння вогнищ пожеж класу А та В відтворює комплексний прояв вогнегасних ефектів: охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання. Вона суттєво відрізняється від вогнегасної дії води [162].

ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено метод активного протипожежного захисту об’єктів, що ґрунтується на використанні високо ефективної водної вогнебіозахисної речовини на основі полігексаметиленгуанідингідрофосфат карбаміду (ФСГ-2М) в якості зарядів для первинних засобів пожежогасіння на початковій стадії розвитку пожежі.

2. Обгрунтовані вимоги до водних вогнебіозахисних речовин (ВВБЗР) для застосування в якості зарядів первинних засобів пожежогасіння. Речовина заряду повинна:

- мати властивості, що забезпечують змочування поверхонь рідин під час гасіння речовин пожеж класу В;
- мати властивості, що сприяють унеможливленню повторного займання матеріалів пожеж класу А;
- мати поверхневий натяг, нижчий порівняно із 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 із водою дисперсність за однакових умов розпиленя струменя;
- мати більшу в’язкість порівняно із 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/(м^2·с);
- мати температурний діапазон експлуатації від -5 ^{0}С до +50 ^{0}С.

3. Обгрунтована можливість застосування полігексаметиленгуанідин-гідрофосфата карбаміду (ПГМГФК) в якості базової сполуки для водної вогнегасної речовини, що ґрунтується на встановлених реологічних властивостях її водного розчину: вона є неньотонівською рідиною з слабовираженими псевдо пластичними 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 компактну «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. Показано, що при використанні запропонованої сполуки для гасіння модельного вогнища пожежі класу 1А, тривалість гасіння та витрата вогнегасної речовини значно зменшується порівняно з використанням води за тих же умов.

4. Розроблено оптимальний склад водної вогнебіозахисної речовини нового покоління ФСГ-2М: у якої поверхневий натяг у 2 рази менший ніж у води (при концентрації 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.

5. Встановлено закономірність впливу якісного і кількісного складу ВВБЗР ФСГ-2М, використання якої в якості заряду первинних засобів пожежогасіння дає можливості отримання тонкорозпилених струменів ВВБЗР з розміром краплин менше 100 мкм при використанні пневматичної форсунки з надлишковим тиском в 0,8 МПа. При цьому відносна вогнегасна здатність ВВБЗР ФСГ-2М при гасінні ЦВМ в 4,9 рази, а при гасінні полум’я пожежі класу В в 3,2 рази вища за ефективність води при однакових умовах їх подавання.

6. Вперше розроблена феноменологічна модель механізму вогнегасної дії ВВБЗР ФСГ-2М, яка враховує прояв різних факторів: реологічних властивостей струменів водної вогнегасної речовини, ефектів охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання.

РОЗДІЛ 5
СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТА, В ЯКІЙ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ МЕТОДИ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН

У відповідності до структурно-логічної схеми загальної методики виконання досліджень в розділах 2, 3, 4, проведені теоретичні і експериментальні дослідження, в результаті яких створено науково-технічне підґрунтя для побудови СППЗО, в якій застосовуються методи пасивного і активного захисту із застосуванням ВВБЗР для ЦВМ (деревини, тканин, паперу, очерету). Для безпосередньої реалізації зазначеної системи на реальних об'єктах необхідно створити відповідні алгоритми застосування ВВБЗР для пасивного та активного захисту [104].

5.1. Сутність і алгоритм методу пасивного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин

Як зазначалось в підрозділі 2.1, основним функціональним завданням пасивного протипожежного захисту об'єкта є забезпечення нормативного часу протидії виникнення пожежі або затримки її на початковій стадії до прибуття пожежних підрозділів. Отже, для того, щоб якісно спрацював пасивний захист необхідно мати науково обґрунтований порядок виконання робіт з вогнезахисту. Починаючи з 2000 року відбувалось накопичення знань в цьому напрямку, особливо з появою ВВБЗР нового покоління ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М, ФСГ-2М [162].

На протязі 2006 року були проведені роботи над створенням нормативного акту «Правила з вогнезахисту» [198] в частині, що стосується вогнезахисту деревини, тканин, паперу, очерету. Правила з вогнезахисту створювались з метою удосконалення нормативно-правового забезпечення у

сфері безпеки та у відповідності до Закону України «Про пожежну безпеку», положення про Державну пожежну охорону, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 26 липня 1994 року №508 та НАПБ А.01.001-95 «Правила пожежної безпеки в Україні», а також «Правил з вогнезахисту» (Правила) [198]. Ці Правила затверджено наказом МНС України від 02.07.2007 за №460 та зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 27.07.2007 за №849/14116.

Правила встановлюють основні вимоги щодо проектування, виконання та приймання робіт з вогнезахисного обробляння матеріалів, виробів, будівельних конструкцій. У відповідності до Правил відпрацьовано алгоритм застосування ВВБЗР для пасивного захисту. Цей алгоритм включає наступні процедури:

- проектування вогнезахисного обробляння;
- розроблення регламенту з вогнезахисту кожною ВВБЗР;
- порядок придбання та використання ВВБЗР;
- виконання робіт з вогнезахисного обробляння;
- порядок приймання робіт з вогнезахисного обробляння;
- утримання вогнезахисного просочення.

Вогнезахисне обробляння виконується на підставі проекту проведення робіт з вогнезахисного обробляння (ППР). ППР виконується як у складі проектно-кошторисної документації на об'єкт у цілому, так і окремо на виріб, конструкцію, інженерне обладнання тощо, які підлягають вогнезахисту.

ППР розробляється на підставі архітектурно-планувального рішення з урахуванням напружено-деформованого стану будівельних конструкцій та можливого впливу на них при пожежі, а також на підставі Регламенту на вогнезахисний засіб, що застосовується. При цьому ППР проходить експертизу щодо пожежної безпеки в органах державного пожежного нагляду і може бути застосованим лише після отримання позитивного експертного висновку.

У ППР передбачається застосовування вогнезахисних засобів, які мають сертифікат відповідності Державної системи сертифікації УкрСЕПРО, токсиколого-гігієнічний паспорт і відповідають сфері застосування та умовам експлуатації.

Для вогнезахисту конструкцій, які згідно з проектною документацією закриваються і в процесі експлуатації доступ до них унеможливлено, необхідно передбачати вогнезахисні засоби з визначеним строком придатності, що забезпечує вогнезахист упродовж усього періоду служби конструкцій або до чергового капітального ремонту будівлі (споруди).

Регламент робіт з вогнезахисту (Регламент) розробляється для кожного конкретного вогнезахисного засобу. Регламент установлює галузь та порядок застосування, строки та умови експлуатації, порядок утримання і заміни вогнезахисного засобу (повторного вогнезахисного обробляння), а також безпечні умови праці та вимоги щодо охорони навколишнього природного середовища при його застосуванні.

Регламент затверджується виробником або представником виробника вогнезахисного засобу та погоджується з Державним департаментом пожежної безпеки. На погодження разом з Регламентом подаються документи, які підтверджують наведені в ньому показники.

Внесення змін та доповнень до Регламенту здійснюється в такому самому порядку. Протягом одного місяця з моменту внесення змін та доповнень виробник (представник виробника) зобов'язаний сповістити про це суб'єктів господарювання, яким був наданий цей Регламент.

Відповідно до наведених вимог було розроблено регламент робіт з вогнезахисту ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини згідно ТУ У 24.6-32528450-001-2003, який зареєстровано в Державній інспекції техногенної безпеки України за № 19/5/32528450/2011. Розроблено також і регламент робіт з вогнезахисту ВВБЗР ФСГ-1М для поверхневого вогне- та біозахисту тканин та деревини згідно з ТУ У 24.6-

32528450-002-2004, який зареєстровано в Державній інспекції техногенної безпеки України за № 312/32528450/2010.

При реалізації ВВБЗР постачальник (виробник) повинен надати покупцю копію сертифіката відповідності, на лицьовому боці якої він робить відмітку про кількість наданого ВВБЗР згідно встановленого зразка.

Після закінчення вогнезахисного обробляння замовник робіт на зворотньому боці копії сертифіката відповідності робить відмітку щодо кількості застосованого вогнезахисного засобу згідно встановленого зразка. Такі відмітки робляться окремо щодо кожного об'єкта вогнезахисту.

Копія сертифіката відповідності з відмітками замовника (замовників) зберігається у виконавця робіт з вогнезахисного обробляння.

Вогнезахисне обробляння виконується відповідно до ППР та Регламенту. Про початок роботи на об'єкті виконавець робіт зобов'язаний письмово сповістити орган державного пожежного нагляду. Забороняється виконувати вогнезахисне обробляння в кліматичних умовах, які не відповідають умовам, визначеним Регламентом на ВВБЗР.

Результати проведених досліджень розділу 3 (п. 3.4) дають підстави для наступних міркувань. В умовах експлуатації другої категорії розміщення вогнезахищених зразків деревини, що просочені ВВБЗР ДСА-1М, зберігається перша група ефективності вогнезахисту цим засобом, що визначено методом за [53], протягом 12 років. У тих же умовах експлуатації зразки деревини, що оброблені ВВБЗР ДСА-2М, зберігають важкогорючий стан матеріалу, що визначено методом за [52], також протягом 12 років. Таким чином можна стверджувати, що встановлений строк збереження ефективності вогнезахисту деревини, захищеної засобами ДСА-1М або ДСА-2М, складає 12 років. Враховуючи відсутність динаміки погіршення показників якості протягом 12 років, стабільність інгредієнтів сумішей, незмінність механізму їх вогнезахисної дії, можна прогнозувати строк експлуатації вогнезахищеної деревини без погіршення якості вогнезахисту в умовах другої категорії розміщення не менше 20 років.

Розглянутий вище алгоритм застосування ВВБЗР для пасивного ППЗО передбачає визначення ефективності вогнезахисту дерев'яних конструкцій під час їх експлуатації, що пов'язується з визначенням якості виконаних робіт та дотриманням відповідних умов експлуатації об'єкта.

Тривалий час якість вогнезахисного обробляння на об'єктах контролюється експрес-методом, сутність якого полягає в тому, що з вогнезахищеної дерев'яної конструкції знімається зразок поверхневого шару деревини товщиною до 1 мм. Цей зразок поміщається в полум'я сірника і витримується в ньому протягом 15 с. Якщо після видалення джерела запалювання зразок не підтримує самостійного горіння та тління, вогнезахисне обробляння вважається якісним [98].

Необхідно відзначити, що розподіл джерел займання за енергетичною здатністю не завжди доцільне, оскільки тоді з контексту випадає масова характеристика пожежного навантаження. Якщо вважати, що полум'я сірника є малокалорійним джерелом займання, то таке ствердження є справедливим для маси навантаження із деревини в декілька кілограмів і більше. Але для описаного вище зразка масою в декілька грамів, таке джерело займання можна вважати висококалорійним, оскільки полум'я сірника за 10-15 с здатне нагріти матеріал до 550 ^{0}C і більше. Таким чином, температурний інтервал від 20 ^{0}C до 550 ^{0}C можна використати в якості випробувального для зразків поверхневого шару вогнезахищеної деревини, оскільки всі значення температур займання цього матеріалу знаходяться в цьому інтервалі. Отже, розглянуті фізико-хімічні властивості вогнезахищеної деревини дають підставу вважати зазначений експрес-метод об'єктивним та адекватним для визначення якості вогнезахисного обробляння дерев'яних конструкцій на реальних об'єктах. Основним недоліком цього методу є те, що випробування дають інтегральну характеристику вогнезахищеної деревини, не проводячи її диференціацію за ефективністю застосованих вогнезахисних засобів [98, 99, 126].

Відомо декілька намагань удосконалення цього експрес-методу. Наприкінці 80-х років минулого століття у ВНДІПО МВС СРСР було розроблено малогабаритний прилад ПМП-1, в якому джерелом займання служить полум’я газової запальнички [21]. Але сутність експрес-методу від цього не змінилась, оскільки в ньому також визначається вплив відкритого полум’я, як джерела займання, на поверхню зразка вогнезахищеної деревини [126].

В 1995 році розглянутий експрес-метод набув стандартизованого статусу і його було введено до складу міждержавного стандарту ГОСТ 30219 «Деревина вогнезахищена. Загальні технічні вимоги. Методи випробування. Транспортування і збереження.» [64]. В ньому, зокрема в п. 5.7,зазначено:

«Для поверхневих способів просочення якість виконаного вогнезахисту, а також його забезпечення в процесі експлуатації визначається експрес-методом. При наявності протирічущих результатів можуть проводитися випробування за [53]…

… Поверхневе вогнезахисне обробляння вважається якісним, а вогнезахищена деревина відповідає II групі, якщо після видалення джерела вогню не менше ніж 90% проб не будуть підтримувати самостійного горіння і тління…

… п. 5.8 Визначення якості вогнезахищеної деревини I групи здійснюють в лабораторних умовах за методами, які встановлені стандартами.»

Стосовно наведеної цитати слід зазначити. По-перше, ще не наведено сутність експрес-методу, а вже надається застереження, що за наявності результатів, що протирічать, можуть проводитися випробування за [53]. Із цього абзацу не зрозуміло, що саме і чому може протирічити. По-друге, не логічним є ствердження про те, що вогнезахищена деревина відповідає II групі, якщо після видалення джерела вогню не менше ніж 90% проб не будуть підтримувати самостійного горіння і тління, оскільки ті самі фізико-хімічні явища (властивості) будуть притаманні і вогнезахищеній деревині I

групи. По-третє, пункт 5.8 містить посилання на неіснуючі до теперішнього часу стандарти, яки б містили методи і методики визначення якості вогнезахищеної деревини I групи.

На теперішній час в Російській Федерації додатково до основного експрес-методу (методу «стружки») в якості арбітражного використовують лабораторні методи диференціального термічного аналізу [227], за якими досліджуються термічні перетворення у вогнезахищеній деревині в інтервалі температур займання цього матеріалу. Зазначені методи можливо використовувати навіть для ідентифікації вогнезахисних засобів, які були використані на об'єкті [87]. Але недоліком цих методів є те, що в них не використовується відкрите полум'я і таким чином не імітується весь комплекс процесів, що впливає на вогнезахищену деревину під час реальних пожеж, і це також суперечить вимогам стандарту [86].

Найкраща ж імітація впливу процесів пожежі на вогнезахищену деревину відтворюється при визначенні температури займання. Для перевірки даного твердження були проведені дослідження з визначення температури займання вогнезахищеної деревини різної якості [75]. Різні показники ефективності отримували шляхом спеціального регулювання кількістю вогнезахищеної речовини, яку вводили в стандартний зразок деревини розміром 150х60х30 мм із застосуванням способів обробляння, які наведені в технічний документації на вогнезахисний засіб та у відповідності вимог [55]. Для кожної вогнезахисної речовини, сертифікованої вУкраїні (ДСА-2М, БС-13, ХМББ, ДМФББ, ФСГ-1М, Неомид 450-1 [251]), готували по 10 зразків, шість з них використовували для визначення показників якості вогнезахисту за прискореним методом відповідно до [53], а інші чотири зразки – для визначення показника температури займання за п.4.7 [52]. В останньому випадку з кожного зразка розміром 150х60х30 мм з верхнього шару деревини зрізали проби товщиною 1,0 ± 0,1 мм, довжиною 25,0 ± 0,1 мм і шириною такою, щоб вага проби дорівнювала 3,0 ± 0,1 г. Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 5.1 [98, 99, 126].

Таблиця 5.1

Результати експериментальних досліджень з визначення втрати маси і температури займання зразків деревини сосни, захищених різними вогнезахисними засобами, та розрахованих коефіцієнтів якості $К_я$

Вогнеза-хисна речовина	№ групи зразків	Спосіб обробляння	Витрата вогне-захисної речовини (робочого розчину), г/м^2	Втрата маси зразка за ГОСТ 16363, %	Група ефектив-ності за ГОСТ 16363	Темпе-ратура займан-ня, ^{0}С	Коефі-цієнт якості ($К_я$)	Темпера-тура відхід-них газів за ГОСТ 16363, ^{0}С
ДСА-2М	1	Гаряча – холодна ванна	654	5,1	I	498	49	298
	2	Поверхневий, 2 рази	517	7,8	I	370	38	196
	3	Поверхневий, розбав-лений розчин, 2 рази	287	11,3	II	340	32	257
	4	Поверхневий, розбав-лений розчин, 2 рази	248	16,1	II	305	25	285
	5	Поверхневий, розбав-лений розчин, 2 рази	232	20,2	II	275	16	297
БС-13	6	Гаряча – холодна ванна	717	6,5	I	295	22	200
	7	Поверхневий, 2 рази	320	14	II	280	18	265
	8	Поверхневий, 2 рази	280	18	II	250	8	295
ФСГ-1М	9	Поверхневий, 2 рази	512	12	II	315	27	261
	10	Поверхневий, 2 рази	481	14	II	300	25	338
	11	Поверхневий, 2 рази	315	18	II	265	13	385
ДМФББ	12	Гаряча – холодна ванна	680	8,5	I	315	37	325
	13	Поверхневий, 2 рази	503	15	II	300	24	413
	14	Поверхневий, 2 рази	285	23	II	265	10	495
ХМББ	15	Гаряча – холодна ванна	420	12	II	295	21	498
	16	Поверхневий, 2 рази	280	17	II	280	18	539
	17	Поверхневий, 2 рази	230	22	II	250	8	540
Неомид 450-1	18	Поверхневий, 4 рази	408	12,6	II	295	22	455
	19	Поверхневий, 4 рази	291	15,3	II	275	16	575
	20	Поверхневий, 4 рази	205	19	II	265	13	594

Дані таблиці 5.1 свідчать, що для кожної речовини, характерна особиста максимальна температура займання, коли ефективність вогнезахищеної деревини відповідає першій групі: для ДСА-2М ця температура становить 410 ^{0}С, для ДМФББ - 365 ^{0}С, для БС-13 - 295^{0}С. Слід зазначити, що наведені результати відповідають даним [75]. Із збільшенням втрати маси зразків, що оброблені різними вогнезахисними засобами, відповідно зменшується температура займання цих зразків від 300 ^{0}С до 250 ^{0}С. При використанні речовин ФСГ-1М, ХМББ, Неомид 450-1 не вдалося

отримати зразків, які б відповідали першій групі ефективності вогнезахисту. Необхідно відзначити високу температуру відхідних газів при випробувані зразків, що оброблені ВВБЗР ХМББ та Неомид 450-1 (вона досягає майже 600 ^{0}С при втраті маси зразків 19 -22 %) [98, 99, 126].

За результатами визначення температури займання зразків вогнезахищеної деревини можна побудувати ряди ефективності або якості вогнезахисного обробляння. Зазначені ряди характерні для кожної окремої вогнезахисної речовини: для ДСА-2М від 398 ^{0}С до 275 ^{0}С, для БС-13 від 295^{0}С до 250 ^{0}С, для ДМФББ від 365 ^{0}С до 250 ^{0}С. На практиці набагато зручніше користуватися відносними величинами. Тому, використовуючи температуру займання необробленої деревини, можна запропонувати емпіричну формулу для визначення коефіцієнта якості вогнезахисного обробляння $К_я$ [98]:

$$К_я = 100 (1 - Т_{зн} / Т_{зв}), \quad (5.1)$$

де $Т_{зн}$ - температура займання необробленої деревини;

$Т_{зв}$ - температура займання вогнезахищеної деревини.

Використовуючи наведену формулу, розраховані коефіцієнти якості вогнезахисного обробляння при використанні різних засобів вогнезахисту, які наведено в таблиці 5.1. Для кожної ВВБЗР можна визначити діапазони значень $К_я$, які відповідають першій або другій групі ефективності. Наприклад, для ВВБЗР ДСА-2М для забезпечення першої групи ефективності $К_я$ має бути не менше 35, а для забезпечення другої групи $К_я$ має бути в діапазоні значень від 32 до 16. В подальшому для достовірної оцінки вогнезахисних властивостей конструкцій із деревини (якості вогнезахисту) доцільно провести додаткові лабораторні випробування з визначення температури займання деревини, вогнезахищеної сертифікованими в Україні вогнезахисними засобами, для складання еталонної бази даних [98, 99, 126].

Таким чином, за критерій якості вогнезахисного обробляння дерев’яних конструкцій на об’єктах можна прийняти температуру займання

верхнього шару вогнезахищеної деревини товщиною в 1 мм. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження щодо визначення температури займання вогнезахищеної деревини різними вогнезахисними речовинами та проведені розрахунки запропонованого кеоефіцієнта якості вогнезахисного обробляння утворюють підгрунтя для створення експериментально-розрахунковго метода визначення якості вогнезахисту дерев'яних конструкцій на реальних об'єктах. Зазначений метод доцільно буде використовувати в якості арбітражного (та/або додаткового) до методів п.п. 5.7, 5.8 стандарту [64].

Запропонований алгоритм застосування ВВБЗР для пасивного захисту та коефіцієнт якості вогнезахисного обробляння деревини апробували під час натурних випробувань фрагмента макетних зразків дерев'яних конструкцій дахів.

В якості макету пожежного навантаження використовувалися дерев'яні конструкції, які відтворювали реальне пожежне навантаження конструкції даху, з найбільш поширеним кутом нахилу 25°. Зразки оброблялися вогнебіозахисними засобами ДСА-1М та ФСГ-2М. Вологість брусків вимірювалася за допомогою вологоміра типу FEUCHTJGKEJTSMESSER та була в межах 9-10 %. Оброблення проводилося згідно з вимогами Регламенту способом поверхневого нанесення. З вогнебіозахищеної деревини відібрали зразки верхнього шару товщиною в 1 мм і провели визначення температури займання. Встановлено, що температура займання деревини, що оброблена ВВБЗР ДСА-1М складає 378 ^{0}С, а ФСГ-2М – 367 ^{0}С. Відповідно, розраховані коефіцієнти якості становили $К_я$(ДСА-1М) = 42 та $К_я$(ФСГ-2М) = 40, що свідчить про якісне вогнезахисне обробляння.

Подальшими випробуваннями досліджували вплив вогнезахисного обробляння деревини на ефективність вогнезахисту фрагменту даху під час пожежі в умовах, коли на пожежне навантаження діє джерело займання у вигляді вогнища класу В на протязі визначеного часу.

Макет пожежного навантаження відтворює 1/6 частину односкатної форми даху будівлі з питомою пожежною навантагою P = 8 МДж/м^2, що відповідає значенню пожежної навантаги реальної конструкції найбільш поширеного в Україні даху будівлі. Макет пожежного навантаження складався: з дерев'яних нестругаих соснових дощок та крокви розмірами в поперечному перерізі 500 мм × 500 мм, які укладалися на металевий каркас; трьох термопар типу ТХА, що встановлювалися у верхній, середній та нижній частинах макета пожежного навантаження, вздовж його центральної осі (рис. 5.1); пристрою ІВС «Термоконт» для реєстрації значень температур у визначених точках; модельного вогнища пожежі класу В для підпалювання макету.



Рисунок 5.1 - Фрагмент макета пожежного навантаження із вогнебіозахищеної деревини та модельного вогнища типу 21В

В якості вогнища класу В було вибрано модельне вогнище типу 21 В, що представляє собою металеве деко з внутрішнім діаметром d = 900 мм, висотою бортика h = 150 мм. У деко заливалося 7 л води та:

- 4 л бензину марки А-92, що забезпечувало 300 ± 15 с його горіння, що відповідає нормативному проміжку часу прибуття пожежно-рятувальних підрозділів на пожежу у міському населеному пункті [200];

- 12,5 л бензину марки А-92, що забезпечувало 900 ± 40 с його горіння, що перевищує нормативний проміжок часу прибуття пожежно-рятувальних

підрозділів на пожежу у сільському населеному пункті [200], а, отже, може відтворювати початкову стадію розвитку пожежі.

Макет пожежного навантаження укладався на металевий каркас. Перед випробуванням макет встановлювався на тензометричні ваги, для визначення втрати маси макета до та після випробувань. Абсолютна похибка вимірювань не перевищувала 100 г. Випробування розпочиналися після підпалювання вогнища пожежі класу В. Після його вигоряння фіксувалась наявність горіння дерев'яних частин макету або повторне їх займання протягом 20 хв від моменту вигорання вогнища пожежі класу В та поширення полум'я поверхнею дерев'яних конструкцій.

Для порівняння ефективності застосування вогнезахисних засобів для дерев'яних конструкцій дахів під час проведення натурних вогневих випробувань здійснювали розрахунки втрати маси оброблених вогнезахисними речовинами дерев'яних конструкцій після вогневого впливу [123, 126, 162]. Відносну втрату маси зразків Р (%) визначали за формулою (5.2).

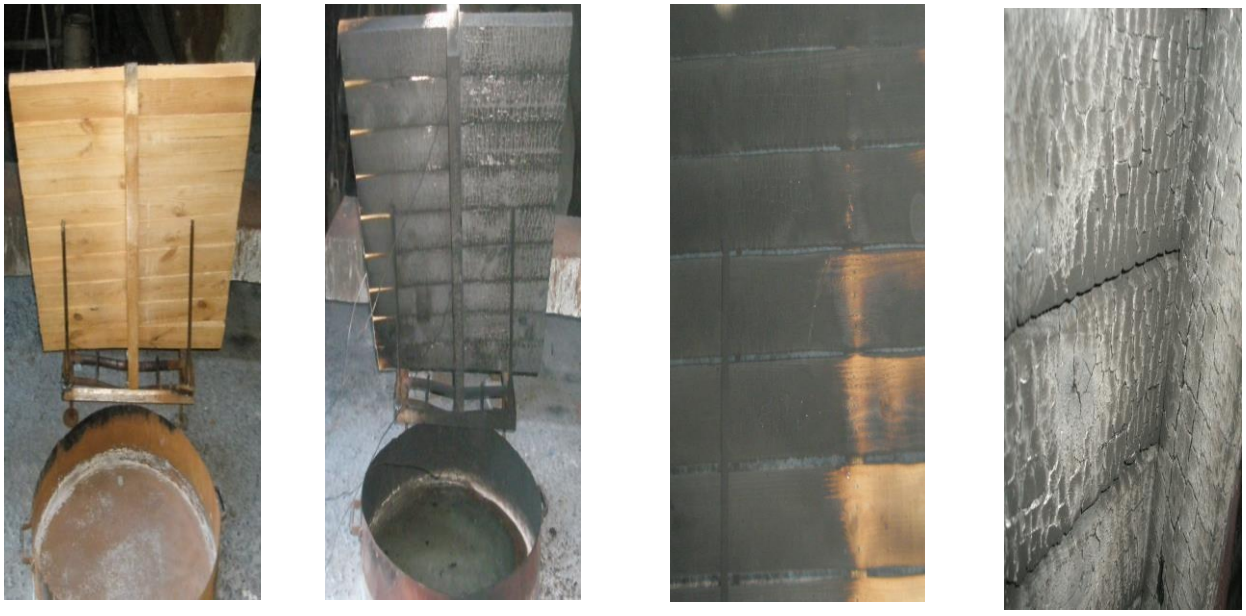
$$P = \frac{(m_1 - m_2)\cdot 100\%}{m_1}, \qquad (5.2)$$

де: m_1 – маса дерев'яних конструкцій до випробувань, кг;

m_2 – маса дерев'яних конструкцій після випробувань, кг

Визначення ефективності вогнезахисних засобів ДСА-1М, ФСГ-2М також проводилося за значеннями температур, які вимірювались під час вогневих випробувань термопарами та реєструвалося за допомогою пристрою ІВС «Термоконт», а також за глибиною обвуглення дерев'яних конструкцій після впливу полум'я, що вимірювалася за допомогою штангенциркуля. Заміри глибини обвуглення дерев'яних конструкцій у макеті пожежного навантаження проводилися у верхній, нижній та середній частинах макета в радіусі не більше ніж 0,1 м від встановлених термопар.

На рисунку 5.2 зображені фрагменти натурних вогневих випробувань макета дерев’яних конструкцій даху, що були оброблені вогнебіозахисним засобом ДСА-1М способом поверхневого нанесення.



а) б) в) г)

Рисунок 5.2 - Фрагмент натурних вогневих випробувань дерев’яних брусків макета пожежного навантаження конструкції даху, що були оброблені вогнебіозахисним засобом ДСА-1М способом поверхневого нанесення

а) початковий вид макета до випробувань; б) вид макета після вигорання вогнища класу В; в) стан дерев’яних конструкцій макета після 300 с впливу вогнища класу В; г) стан дерев’яних конструкцій макета після 900 с впливу вогнища класу В

Макет пожежного навантаження (рис. 5.2) підпалювався за допомогою вогнища класу В. Після вигорання вогнища класу В продовж 300 с та продовж 900 с для дерев’яних конструкцій макета, які були оброблені методом поверхневого нанесення, зафіксовано відсутність полум’яного горіння дерев’яних конструкцій та жару на їх поверхні, а самі дерев’яні конструкції не втратили цілісності.

Узагальнені результати досліджень щодо визначення ефективності вогнезахисту дерев'яних конструкцій макета даху, які були оброблені ВВБЗР ДСА-1М та ФСГ-2М, наведено в таблиці 5.2.

В результаті проведених полігонних випробувань встановлено, що для протипожежного захисту дерев'яних конструкцій дахів можна використовувати ВВБЗР ФСГ-2М або ДСА-1М, оскільки їх застосування (методом поверхневого просочення) дає можливість впевненого затримання пожежі на її початковій стадії розвитку.

Таблиця 5.2.

Узагальнені результати досліджень щодо визначення ефективності вогнезахисту дерев'яних конструкцій макета пожежного навантаження даху, які були оброблені ВВБЗР ДСА-1М та ФСГ-2М

Зразки для випробування	Час впливу вогнища класу В, с	Спосіб оброблення	Критерії оцінювання вогнезахисної ефективності		
			Макс. знач. температур в точках 1, 2, 3 під час горіння вогнища класу В ^{0}С	Втрата маси макета пож навантаження, %	Глибина обвуглення дерев'яних брусків в точках 1, 2, 3, мм
Дерев'яні конструкції, що оброблені ВВБЗР ДСА-1М	300	поверхневе нанесення	625, 691, 682	12,3	1,0-1,5-2,0
	900	поверхневе нанесення	721, 863, 796	29,6	1,0-3,0-5,0
Дерев'яні конструкції, що оброблені ВВБЗР ФСГ-2М	300	поверхневе нанесення	717, 922, 791	15,6	1,0-1,5-2,0
	720	поверхневе нанесення	791, 938, 792	28,9	2,0-3,0-5,0

Проведені дослідження дозволять зробити доповнення до «Правил з вогнезахисту» [198], зокрема до п. 7 «Виконання робіт з вогнезахисного обробляння». Після слів «Під час вогнезахисного обробляння здійснюється контроль за якістю виконання робіт» надати такий текст: «Для поверхневого способу просочення дерев'яних конструкцій якість виконаного вогнезахисного обробляння, а також її забезпечення в процесі експлуатації,

визначають за експрес-методом у відповідності до [64]. При наявності суперечностей проводять випробування з визначення температури займання вогнезахищеної деревини за методикою, що розроблена в УкрНДІЦЗ ДСНС України [185]».

5.2. Сутність і алгоритм методу активного протипожежного захисту об'єкта з використанням водних вогнебіозахисних речовин

Алгоритм застосування ВВБЗР ФСГ-2М для активного протипожежного захисту об'єкта може визначатися нормативними положеннями про СЗПБО [197], Правилами пожежної безпеки в Україні [71] та Типовими нормами належності вогнегасників [239]. Були проведені дослідження щодо використання ВВБЗР ФСГ-2М замість води в різних засобах пожежної техніки, насамперед в первинних засобах пожежогасіння – вогнегасниках, які поділяються на переносні відповідно до ДСТУ 3675-98 [79] та пересувні відповідно до ДСТУ 3739-98 [81]. В стандарті [79] зазначається, що в переносних вогнегасниках використовується вогнегасна речовина з фізико-хімічними властивостями, які дозволяють створити умови для припинення горіння. Цим вимогам відповідає ВВБЗР ФСГ-2М, про що свідчать дослідження гасіння зазначеною речовиною вогнищ пожеж класів А та В, що представлені в розділі 4. Стандартом [79] визначається 5 типів вогнегасників. Серед них є водні, вогнегасним зарядом в яких може бути вода, водні речовини піноутворювачів, вода з домішками. Тобто ВВБЗР ФСГ-2М цілком підпадає під визначення вогнегасного заряду для водних вогнегасників [118].

Вогнегасну здатність ВВБЗР ФСГ-2М визначали під час полігонних випробувань переносного водного вогнегасника ВВШ-9 закачного типу виробництва ПрАТ «Факел» (м. Макіївка Донецької обл.). Технічні характеристики зазначеного вогнегасника представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Технічні характеристики вогнегасника ВВШ-9

	Характеристики	Норма
1	Місткість корпусу, л	$11{,}0^{+0{,}4}$
2	Вогнегасна речовина: 6% робочий розчин піноутворювача S.F.P.M., кг	$9{,}00_{-0{,}45}$
3	Тривалість приведення вогнегасника до дії, с, не більше	5
4	Маса вогнегасника повна, кг, не більше	13,9
5	Робочий тиск у корпусі вогнегасника при 20 ° С, МПа	1,40 ± 0,14
6	Довжина струменя вогнегасної речовини, м, не менше	3,0
7	Тривалість викидання вогнегасної речовини, с не менше максимальна	 15 55
8	Вогнегасна здатність щодо гасіння модельного вогнища пожежі, не менше класу А класу В	 2А 113В

З таблиці 5.3 видно, що вогнегасна здатність ВВШ-9 із водним зарядом 6 % водного розчину піноутворювача S.F.P.M. щодо гасіння модельного вогнища класу А є 2А. Цей показник відповідає вимогам стандарту [79] для вогнегасників місткістю 9л вогнегасної речовини.

Були проведені порівняльні випробування заряду ВВБЗР ФСГ-2М (31,7% водний розчин ПГМГФК + 0,2 % піноутворювач S.F.P.M.) та заряду 6% водного розчину піноутворювача S.F.P.M. [162] Сутність методу випробувань полягала у визначення маси водної вогнегасної речовини, яка витрачається на одиницю відкритої поверхні горіння вогнища пожежі класу А максимального типорозміру у разі його успішного гасіння. Показник вогнегасної здатності (Q_A) водної вогнегасної речовини у разі успішного гасіння модельних вогнищ пожежі класу А визначається як відношення маси витраченої вогнегасної речовини (ΔM) до площі поверхні горіння модельного вогнища пожежі (S):

$$Q = \frac{\Delta M}{S} \qquad (5.3)$$

В таблиці 5.4 наведено значення площі горіння модельних вогнищ пожежі класу А.

Таблиця 5.4

Значення площі горіння модельних вогнищ пожежі класу А

Позначення модельного вогнища пожежі	Площа вільної поверхні модельного вогнища пожежі, $м^2$
2А	9,36
3А	13,89
4А	18,66

Результати випробувань наведено в таблиці 5.5. Як видно з даних таблиці 5.5, використовуючи заряд 6 % водного розчину піноутворювача S.F.P.M., максимально можливо погасити тільки модельне вогнище 2А, натомість зарядом ВВБЗР ФСГ-2М вдається впевнено погасити модельне вогнище 3А, тому показник вогнегасної здатності цих ВВР становить 0,93 $кг/м^2$ та 0,55 $кг/м^2$, відповідно. Що свідчить про більш високу ефективність саме ФСГ-2М та відповідає вимогам [79].

Таблиця 5.5

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 витра-ченої на гасіння ВВР (ΔM), кг	результат гасіння	показник вогнегасної здатності ВВР (Q_A), $кг/м^2$	примітка
6% піноутворювача S.F.P.M., вода - решта	2А	8,9	Погашено	0,93	При повторному підпалюванні вогнище горіло
6% піноутворювача S.F.P.M., вода - решта	3А	8,9	Не погашено	-	
ФСГ-2М (31,7% ПГМГФК + 0,2% S.F.P.M., вода – решта)	3А	7,8	Погашено	0,55	На поверхні звуглених брусків спостерігалось наявність плівки. При повторному підпалюванні вогнище не загорілось
ФСГ-2М	4А	8,9	Не погашено	-	

Крім того, звертає на себе увагу той факт, що при намаганні повторно підпалити модельне вогнище 3А, після його гасіння із застосуванням ВВБЗР ФСГ-2М, використовуючи таку ж саме кількість бензину А-76 (за методикою), повторного загоряння не відбулось, що свідчить про модифікування шару коксу антипіреном. В подальшому зазначене явище досліджували методами термогравіметрії. Для досліджень взяли зразок вугілля з модельного вогнище 2А, яке було погашене зарядом 6 % водного розчину піноутворювача S.F.P.M., та зразок вугілля з модельного вогнище 3А, яке було погашене зарядом ВВБЗР ФСГ-2М. Дані досліджень представлені на рисунках 5.3 та 5.4.

Як видно з рисунків 5.3 та 5.4, дериватограми вугілля, модифікованого під дією застосованої ВВБЗР ФСГ-2М, свідчать про наявність виражених ендотермічних ефектів в діапазоні температур від 150 ^{0}С до 370 ^{0}С. На термограмах зразку, що взято з звугленого шару деревини, яку тушили водою з піноутворювачем, такого ефекту не спостерігається. Таким чином, можна стверджувати, що завдяки зазначеним ендотермічним ефектам на поверхні звугленої деревини (при застосуванні для гасіння ВВБЗР ФСГ-2М) не залишається осередків тління (жару), що можуть ставати джерелами повторного займання деревини. Це додатково підтверджується тим, що в результаті термічних досліджень 100 мг вугілля (при його нагріванні від 20 ^{0}С до 1000 ^{0}С) залишкова маса зразку звичайного вугілля становила 5,5 мг, а модифікованого вугілля - 17,2 мг.

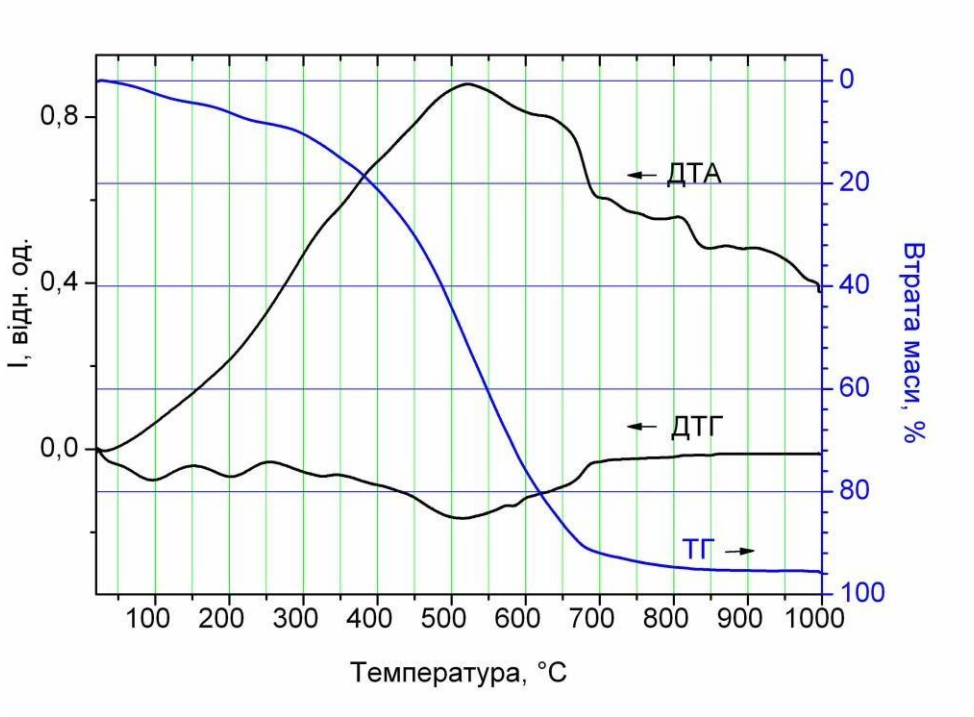


Рисунок 5.3 - Дериватограма зразка звугленого шару деревини (сосни) після гасіння 6 % водного розчину піноутворювача S.F.P.M.

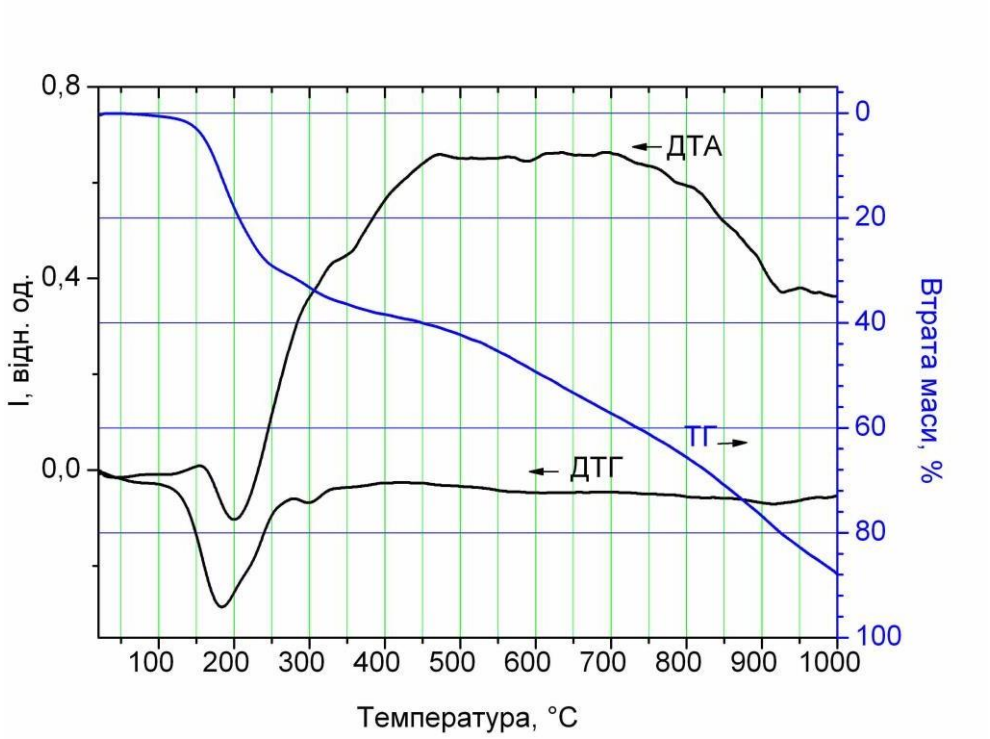


Рисунок 5.4 - Дериватограма зразка модифікованого звугленого шару деревини (сосни) зарядом ВВБЗР ФСГ-2М

Приведені термогравіметричні дослідження підтверджують феноменологічну модель гасіння деревини за допомогою ВВБЗР ФСГ-2М, яка представлена в розділі 4.

Необхідно відзначити важливість ефекту відсутності повторного займання модельного вогнища класу А після його гасіння зарядом ФСГ-2М. Практика пожежогасіння об'єктів з пожежним навантаженням з ЦВМ вказує на те, що дуже важливо на початковій стадії розвитку пожежі застосувати ефективну вогнегасну речовину, яка виключає можливість повторного займання. Адже відомо, що після гасіння таких пожеж водними вогнегасниками часто-густо відбувається повторне займання пожежного навантаження.

Останнім часом набуває поширення застосування автоматичних систем комбінованого пожежогасіння модульного типу тонко розпиленими водними вогнегасними речовинами [16, 17, 88, 91, 253]. Провідною організацією в цьому напрямку є ЗАТ «Інститут «Спецавтоматика», м. Луганськ. На підприємстві розроблено декілька модулів, зокрема МПГ ТВВР-0,05-1,6-00 та МПГ ТВВР-0,05-1,6-01. Для зарядки зазначених модулів повинні використовуватись ВВР, що відповідають вимогам ТУ У 24.6-00230668-008:2008. При цьому основними показниками є вогнегасна ефективність за класами пожеж А та В, температурний діапазон застосування, екологічність, корозійна активність, економічність.

Для встановлення придатності застосування ВВБЗР ФСГ-2М в якості заряду для наведених модулів визначили температуру замерзання. Вона становить мінус 9 ^{0}С, що відповідає вимогам ТУ. Визначення корозійної дії проводили за методикою №2000/2ПУ-13, що розроблена в УкрНДІПБ. Встановлений рівень корозійної активності на рівні 0,0000164 кг/м^2·год, що також задовольняє вимогам ТУ. Екологічність ВВБЗР ФСГ-2М була визначена в розділі 4. Отже, придатність ВВБЗР ФСГ-2М для використання в якості заряду в системі комбінованого пожежогасіння модульного типу тонко розпиленими водними вогнегасними речовинами підтверджена на

стенді ЗАТ «Інститут «Спецавтоматика» при використанні модуля МПГ ТВВР-0,05-1,6-01 (див. додаток Г).

За вимогами ДБН В.2.5-13-98* *Інженерне обладнання будинків та споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд* [72] багато об'єктів забезпечуються автоматичними установками пожежогасіння. Науково-виробнича фірма «Фактор» виробляє модулі порошкового пожежогасіння. Але на багатьох об'єктах (готелі, заклади масового харчування тощо) не можливо використати такі модулі, а водні модулі не забезпечують необхідну ефективність. Тому були проведені дослідження щодо використання ФСГ-2М замість порошків в зазначених модулях. Провели випробування з використанням установки СПРУТ-6 з 3 кг заряду ВВБЗР ФСГ-2М. Зазначеним модулем було впевнено погашено модельне вогнище 21В, що вказує на можливість використання зазначеної речовини в модулях автоматичного пожежогасіння (див. додаток Г).

Таким чином, проведені дослідження щодо використання ВВБЗР ФСГ-2М в якості заряда вогнегасної речовини в технічних засобах пожежогасіння показали, що із застосуванням такої техніки можна підвищити ефективність активного протипожежного захисту різних об'єктів.

Кількість та номенклатура основних видів пожежної техніки для захисту об'єктів регламентується вимогами державних та (або) галузевих стандартів, будівельних норм, правил та інших нормативних актів.

На стадії проектування повинна визначатись потреба об'єкта в пожежній техніці, в тому числі – у вогнегасниках. Норми належності вогнегасників для конкретних об'єктів повинні встановлюватися нормами технологічного проектування та галузевими правилами пожежної безпеки з урахуванням рекомендацій [72].

Вибір типу вогнегасника (пересувний чи переносний) обумовлюється розмірами можливих осередків пожеж. Для гасіння великих площ горіння, коли застосування переносних та пересувних вогнегасників є недостатнім, на

об’єкті мають бути передбачені додатково ефективні засоби пожежогасіння [197].

5.3. Побудова системи протипожежного захисту об’єкта, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин

Виходячи з структурно-логічної схеми загальної методики виконання роботи, можна стверджувати, що представлені в роботі наукові основи створення та застосування ВВБЗР дозволили розробити нові високоефективні ВВБЗР та алгоритми їх застосування в системі пасивного і активного протипожежного захисту об’єкта з пожежним навантаженням із різних матеріалів (в переважній більшості із ЦВМ). Ця система є складовою загальної системи захисту об’єкта і представляє собою комплекс розроблених в роботі заходів та засобів, впровадження якого спрямовано на виконання Правил з вогнезахисту виробів з деревини, тканин, паперу, очерету шляхом обробляння їх розробленими ВВБЗР та на виконання Типових норм належності пожежною технікою шляхом використання ВВБЗР в якості вогнегасного заряду технічних засобів пожежогасіння. Реалізація такої системи спрямована на забезпечення необхідного рівня безпеки реальних об’єктів (рис. 5.5).

Реалізація методу пасивного захисту є пріоритетним, оскільки він безпосередньо спрямований на пожежну бнзпеку та на вирішення екологічних питань шляхом:

- направленого використання речовин III і IV класів небезпеки при розробленні раціональних складів ВВБЗР (п.3.2, п.3.8);
- переведення горючих матеріалів, що характеризуються високотоксичними продуктами горіння, в важкозаймистий та важкогорючий стан, що характеризується помірно (або мало) небезпечними продуктами горіння (п.3.3.3, п.3.10, п.3.11).

Рівень пожежної безпеки під час експлуатації об’єктів може змінюватись. В значній мірі він залежить від умов експлуатації. Пожежне навантаження (матеріалів пожежі класу А) може змінюватись і якісно, і кількісно при переоснащенні інтер’єрів: заміні оздоблення, меблів, штор, ковролінів тощо. В результаті збільшується ризик виникнення НС, обумовлених пожежами, оскільки зазначені матеріали , як правило, легкозаймисті. Отже, небезпечна подія може виникнути в результаті необережного поводження з вогнем, про що й свідчать статистичні дані. Неякісна експлуатація вогнебіозахищених дерев’яних конструкцій (наприклад, допущення підтікання покрівлі) також приводить до погіршення рівня вогнезахисту.

Для аудиту ефективності реалізованого методу пасивного захисту в якості базового параметру при визначенні критерія якості вогнезахисного обробляння дерев’яних конструкцій на об’єктах можна прийняти температуру займання верхнього шару вогнезахищеної деревини товщиною в 1 мм, або критерієм якості за формулою (5.1).

Під час експлуатації об’єкта на ньому можуть з’являтися матеріали пожежі класу В (наприклад, під час ремонтних робіт при використанні легкозаймистих лаків, фарб, органічних розчинників тощо). В подібних випадках пожежне навантаження буде складатися як з матеріалів пожежі класу В, так і класу А. В такі періоди життєвого циклу об’єкта зростає актуальність реалізованого методу активного захисту, що повинен відповідати вимогам Типових норм належності забезпечення вогнегасниками, в яких в якості вогнегасного заряду застосована високоефективна екологічно безпечна ВВБЗР ФСГ-2М. Це дозволить унеможливити повторне займання матеріалів пожежі класу А та локалізувати (ліквідувати) пожежу на початковій стадії її розвитку.

При аудиті активного захисту аналізують відповідність наявних засобів пожежогасіння із зарядом ВВБЗР нормам їх належності на об’єкті, що визначається розрахунком величини пожежного навантаження.



Рисунок 5.5 – Схема реалізації системи протипожежного захисту об’єкта, в якій застосовуються методи пасивного і активного захисту з використанням ВВБЗР

Розглянемо приклад реалізації запропонованої СППЗО [125]. Одним з видів об’єктів критичної інфраструктури, ризики виникнення пожеж на яких значно зросли внаслідок підвищення ймовірності терористичних атак в останні роки, є склади зброї і боєприпасів Збройних Сил та Національної Гвардії України. На рисунку 5.6 представлено фото зберігання боєприпасів у військовому сховищі, на рисунку 5.7 – типовий варіант розміщення боєприпасів в складі відповідно до нормативних вимог (коричневим кольором виділені дерев’яні елементи будівельних конструкцій та тари для зберігання боєприпасів), а на рисунку 5.8 - варіант реалізації СППЗО (рис. 5.7) на основі методів пасивного і активного захисту з використанням ВВБЗР.

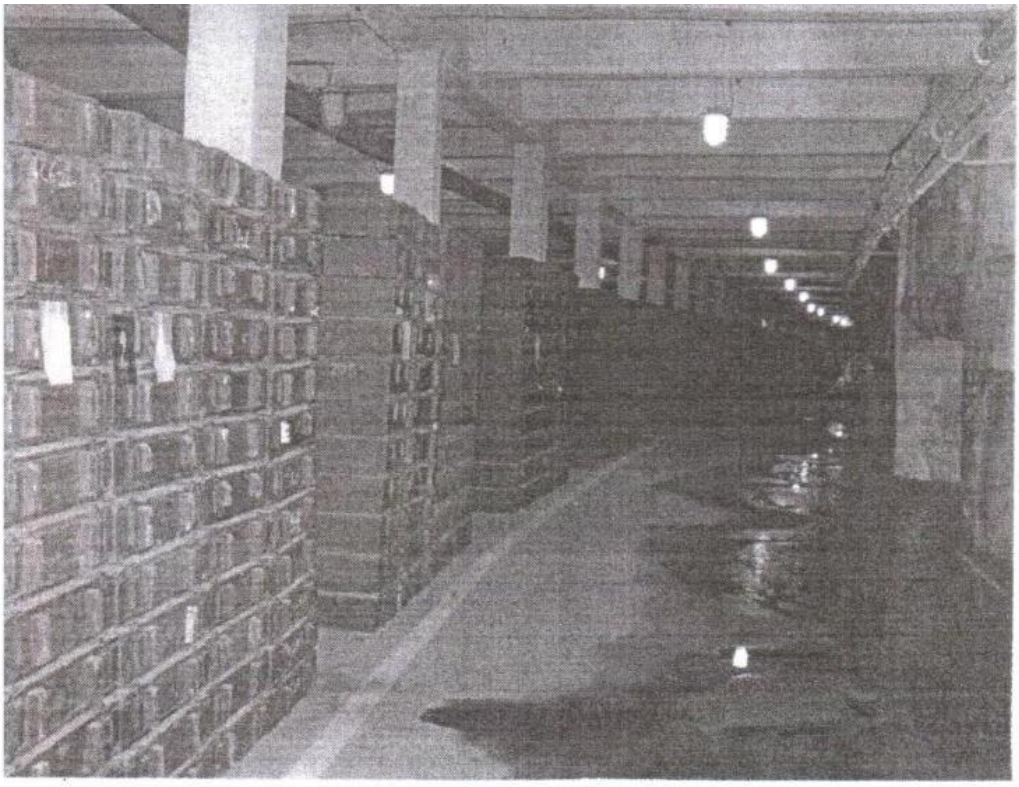


Рисунок 5.6 - Зберігання боєприпасів у військовому сховищі

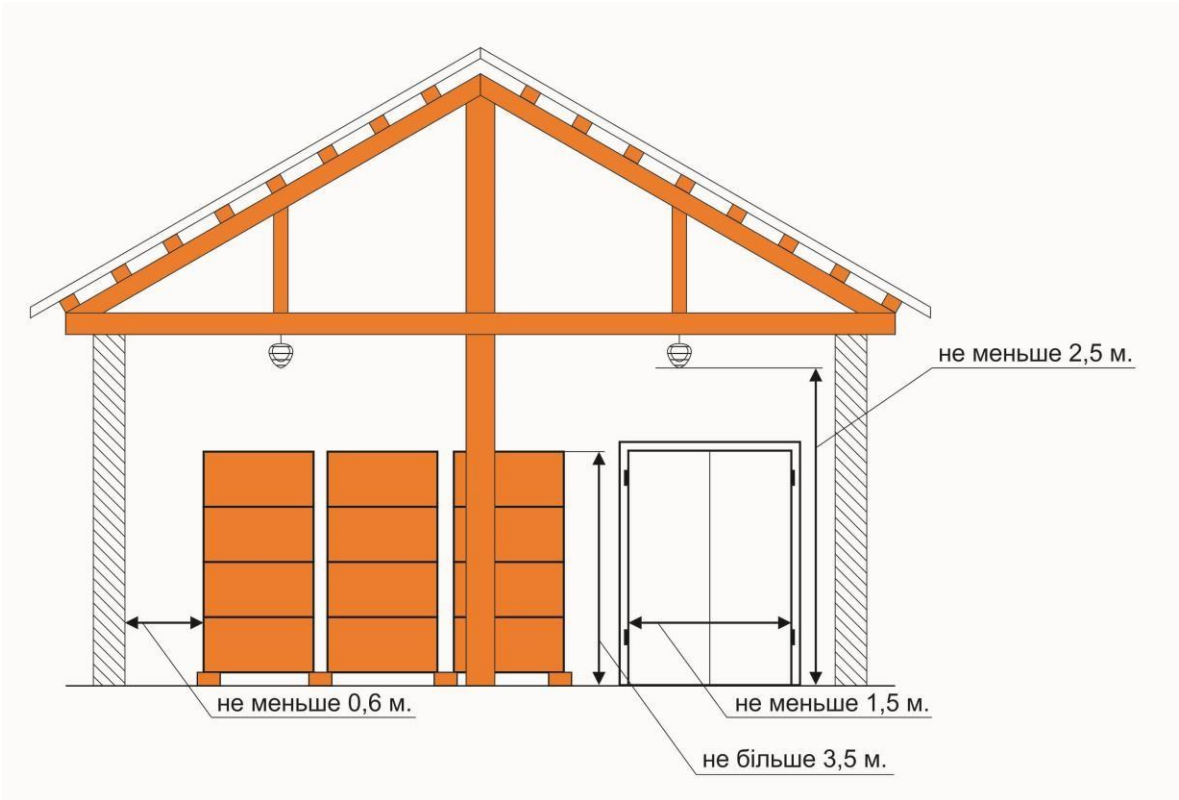


Рисунок 5.7 - Типовий варіант розміщення боєприпасів в складі відповідно до нормативних вимог

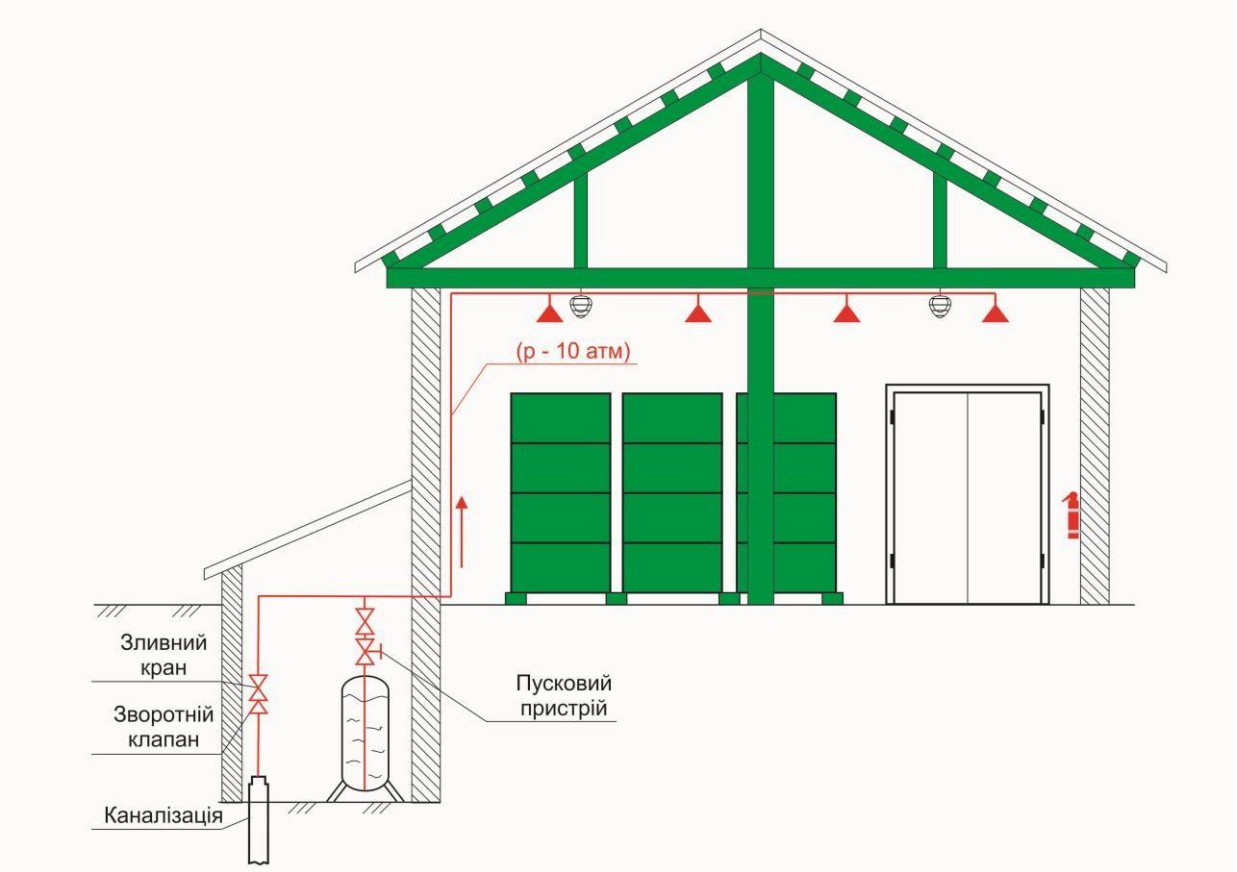


Рисунок 5.8 - варіант реалізації СППЗО на основі методів пасивного і активного захисту з використанням ВВБЗР (зеленим кольором - дерев'яні елементи тари та будівельних конструкцій, захищених в рамках заходів пасивного захисту; червоним кольором – елементи підсистеми активного захисту)

ВИСНОВКИ

1. Створена система протипожежного захисту об’єкта, в якій реалізуються методи пасивного та активного протипожежного захисту з використанням екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин.

2. Розроблено алгоритм пасивного протипожежного захисту, який ґрунтується на виконанні «Правил з вогнезахисту» щодо поверхневого обробляння деревини, тканин, паперу, очерету створеними високоефективними ВВБЗР, що забезпечує затримання пожежі на початковій стадії її розвитку. В якості оцінювання якості вогнезахисту деревини запропоновано визначати температуру займання вогнебіозахищеної деревини, яка на 150÷175 ^{0}С перевищує температуру займання необробленої деревини.

3. Розроблено алгоритм активного протипожежного захисту, в основу якого покладено використання розробленої ВВБЗР ФСГ-2М в якості вогнегасного заряда у вогнегасниках і установках пожежогасіння для гасіння пожеж класу А та В, що призводить до підвищення ефективності вогнезахисної дії порівняно із водою в 4,9 при гасінні вогнищ пожежі класу А та в 3,2 рази при гасінні вогнищ пожежі класу В. Експериментально показано, що використання ВВБЗР ФСГ-2М під час гасіння деревини унеможливлює повторне займання пожежного навантаження. Використання вогнегасників та установок пожежогасіння із зарядом ВВБЗР ФСГ-2М дозволяє ліквідувати або локалізувати пожежу на початковій стадії її розвитку.

4. Створена система пасивного і активного протипожежного захисту із застосуванням ВВБЗР, яка є складовою загальної системи захисту об’єкта і представляє собою комплекс заходів і засобів, спрямований на виконання «Правил з вогнезахисту» щодо виробів з деревини, тканин, паперу, очерету шляхом їх обробляння ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М та на виконання норм належності засобів пожежогасіння із зарядом ВВБЗР ФСГ-2М, що забезпечує захист об’єктів від пожежі на початковій стадії її розвитку.

РОЗДІЛ 6
ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЄЗДАТНОСТІ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТА, В ЯКІЙ РЕАЛІЗУЮТЬСЯ МЕТОДИ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНИХ ВОГНЕБІОЗАХИСНИХ РЕЧОВИН

6.1. Розроблення нормативно-технічної документації для створення виробництва екологічно безпечних водних вогнебіозахисних речовин

Система протипожежного захисту об'єкта з пожежним навантаженням із ЦВМ, в якій реалізовані запропоновані методи активного та пасивного захисту із застосуванням розроблених ВВБЗР, першочергово повинна відповідати вимогам ДБН В.1.1-7-2016 «Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва» [71], оскільки технічні рішення щодо подальшого функціонування СППЗО, відповідно до визначеного необхідного рівня безпеки, закладаються на етапах проектування та зведення (будівництва) об'єкта. Положення зазначеного стандарту містить пряму вимогу проте, що «у будинках, крім будинків V ступеня вогнестійкості, дерев'яні елементи горищних покриттів (крокви, лати) повинні оброблятися засобами вогнезахисту, які забезпечують I групу вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363». Додаткові вимоги щодо ефективності вогнезахисних засобів для деревини містяться в [64].

Отже, для серійного виробництва ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М були розроблені технічні умови, які відповідають вимогам зазначених стандартів: ТУ У 13672801.002-1999 зі змінами [247] та ТУ У 24.632528450-001-2003 зі змінами [248].

Ці технічні умови поширюються на суміші просочувальні для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини, які являють собою набір сухих компонентів антипірену, водного розчину піноутворювача та водного розчину полімерного антисептика і призначені для нанесення на поверхню дерев'яних елементів внутрішніх конструкцій будівель та споруд з метою зниження їх займистості (горючості) та надання їм антисептичних

властивостей. Робочі розчини антипірена та антисептика готуються з сумішей безпосередньо перед нанесенням.

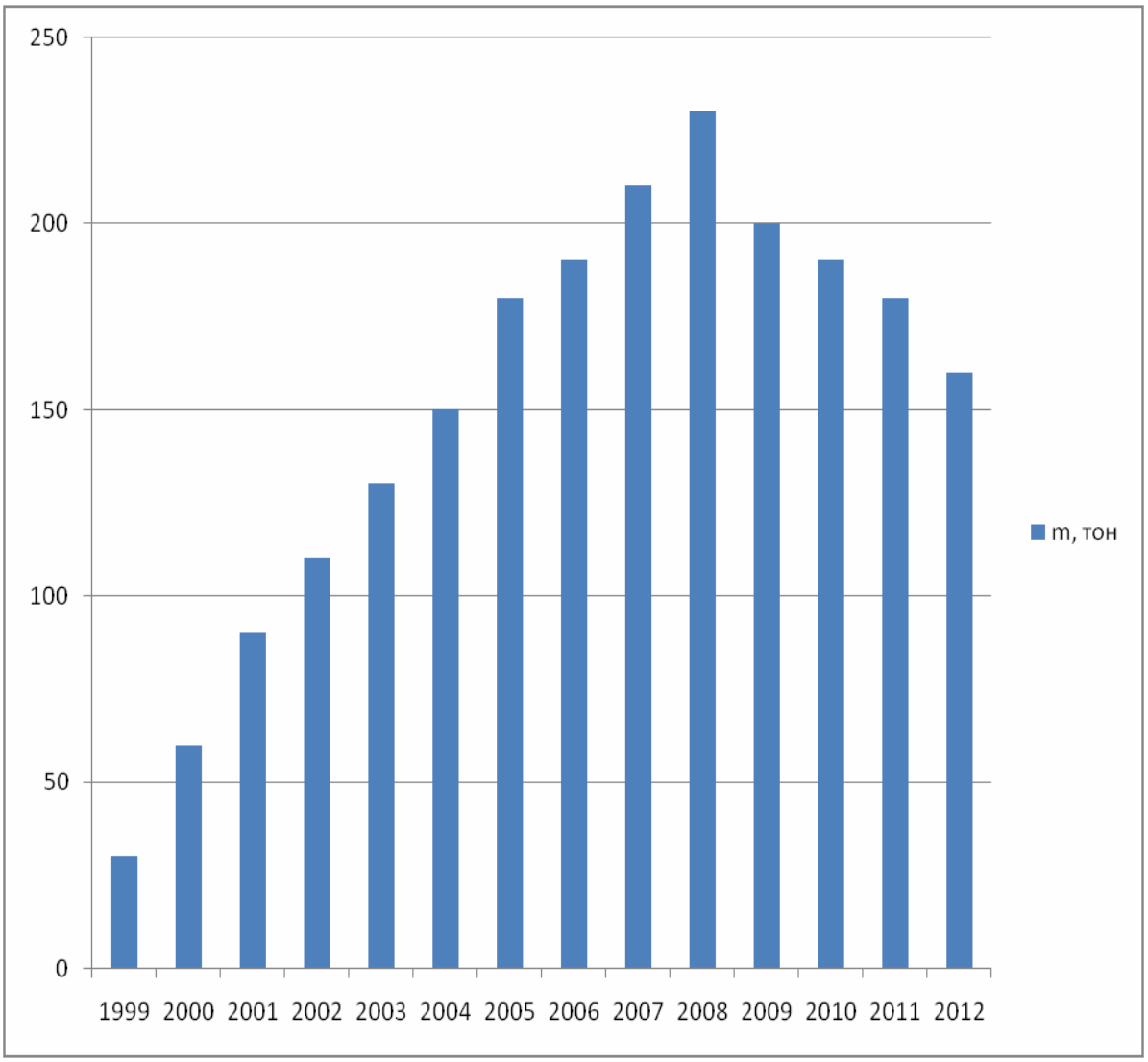


Рисунок 6.1 - Діаграма реалізації модифікацій ДСА

Споживачами ВВБЗР є організації, що проводять вогнезахисті роботи відповідно до ліцензії, та фізичні особи. Розроблені технічні умови придатні для отримання сертифікатів відповідності до вимог Державної системи сертифікації на зазначену продукцію, оскільки вона підлягає обов'язковій сертифікації згідно чинного законодавства.

Для випуску продукції ВВБЗР ФСГ-1М розроблено технічні умови ТУУ 24.6-32528450-002-2004 «Композиція просочувальна для поверхневого вогне-

та біозахисту тканин, паперу і очерету» зі змінами [249]. Ці технічні умови поширюються на ВВБЗР ФСГ-1М, яка являє собою водний розчин ПГМГФК для нанесення на поверхню тканин, паперу, очерету з метою зниження їх займистості та надання їм антисептичних властивостей. Склад речовини і технологія її виготовлення ґрунтується на використанні деклараційних патентів України на корисні моделі №23802 та №23803 [193, 1194]. ВВБЗР ФСГ-1М наноситься шляхом занурення або обприскування згідно ГОСТ 20022.6 [58] при температурі від 5 до 40 ^{0}С і відносній вологості повітря не більше 80%.

Для забезпечення об’єктів України засобами протипожежного захисту на виробничих потужностях ТОВ «Вогнебіозахист», ТОВ «Захист-Центр» створена виробнича база цих засобів вогнебіозахисту (див. додаток А). На рисунку 6.1 представлена діаграма реалізації продукції, з якої видно, що річна потреба модифікацій ДСА для об’єктів в Україні становить 150 – 250 тон. Також треба зазначити, що з початком економічної кризи обсяг замовлень на зазначену продукцію об’єктивно знизився.

У 2004 році розпочато виробництво і використання ВВБЗР ФСГ-1М для пасивного захисту об’єктів з пожежним навантаженням з тканин, паперу та очерету. В таблиці 6.1 наведені дані щодо випуску і використання на об’єктах в Україні ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М протягом 2012 року. З 2004 по 2007 рік зазначена продукція постачалась на експорт до Польщі в обсягах: 5 тон ДСА-1М та 500 кг ФСГ-1М на рік (табл. 6.1).

Позитивним прикладом сумлінного підходу до забезпечення пасивного і активного захисту є Крюківський вагонобудівний завод, м. Кременчук Полтавської області. Будівництво пасажирських вагонів відбувається з виконанням вимог НАПБ В.03.003 «Норми пожежної безпеки для пасажирських вагонів» [179]. За цими нормами деревина, з якої виготовлені конструктивні деталі, повинна класифікуватись як важкогорючий матеріал відповідно до вимог [52]. На заваді збудована стаціонарна установка для вогнезахисту ВВБЗР ДСА-2М деталей дерев’яних конструкцій вагонів, що

будуються. Відповідно до зазначених норм текстильні матеріали, що використані для оздоблення вагонів, повинні класифікуватись як важко займисті матеріали за ДСТУ 4155 [82], тому для вогнезахисту вагонних штор використовується ВВБЗР ФСГ-1М. А для активного захисту збудовані вагони комплектуються вогнегасниками із зарядом ВВБЗР ФСГ-2М.

Таблиця 6.1

Використання ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М в областях України в 2012 році

Регіон України		ДСА-1М, ДСА-2М, кг	ФСГ-1М, кг
1	Вінницька обл.	11394	35
2	Волинська обл.	5320	0
3	Дніпропетровська обл.	17912	450
4	Донецька обл.	3980	111
5	Житомирська обл.	13493	131
6	Закарпатська обл.	1300	0
7	Запорізька обл.	4065	0
8	Івано-Франківська обл.	1650	50
9	Київська обл.	2796	0
10	м. Київ	20099	6390
11	Кіровоградська обл.	2461	0
12	АР Крим	3442	5
13	Луганська обл.	14695	0
14	Львівська обл.	6357	65
15	Миколаївська обл.	9350	0
16	Одеська обл.	7849	120
17	Полтавська обл.	5300	0
18	Рівненська обл.	2105	0
19	Сумська обл..	1700	0
20	Тернопільська обл.	0	135
21	Харківська обл.	695	20
22	Херсонська обл.	2885	0
23	Хмельницька обл.	8075	0
24	Черкаська обл.	6102	0
25	Чернігівська обл.	4219	0
26	Чернівецька обл.	2630	0
	В С Ь О Г О:	**159874**	**7462**

У 2005 – 2006 роках за державним контрактом польська фірма Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz S.A.H. виробляла для України пасажирські вагони. Але сертифікаційні випробування вогнезахищених дерев'яних конструкцій, для захисту яких використовувалась польська ВВБЗР Antinal, та вогнезахищеної тканини Runotex, захищеної також польською ВВБЗР Myflan показали негативні результати. Безпосередньо виробником (ТОВ «Захист-Центр») було запропоновано польським підрядникам скористатися вітчизняним вогнезахисними засобами. Для вогнезахисту дерев'яних елементів було використано ВВБЗР ДСА-2М, а для вогнезахисту текстильної оббивки диванів (крісел) застосовано ВВБЗР ФСГ-1М.

Проведені випробування показали відповідність показників пожежонебезпечності тканини Runotex, вогнезахищеної ВВБЗР ФСГ-1М, вимогам вітчизняних стандартів. За результатами випробувань було отримано сертифікат відповідності для Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz S.A.H. Для виконання робіт з пасивного протипожежного захисту пасажирських вагонів, що вироблялись в Польщі, протягом 2005-2006 рр. щорічно експортувалось 5 тон ВВБЗР ДСА-2М та 500 кг ВВБЗР ФСГ-1М.

Кодекс цивільного захисту України [143] встановлює, що віднесення об'єктів до відповідних категорій з цивільного захисту проводиться з метою розроблення і завчасного здійснення комплексу заходів з їх підготовки до стійкого функціонування під час виникнення надзвичайних ситуацій у мирний час, в умовах надзвичайного стану та в особливий період, у тому числі для організації належного захисту працівників об'єктів і забезпечення проведення рятувальних та аварійно-відновлювальних робіт. До надзвичайних ситуацій даним документом віднесені і пожежі. В таблиці 6.2 наведено короткий перелік об'єктів критичної інфраструктури та/або об'єктів з масовим перебуванням людей [292, 293], на яких здійснено обробляння дерев'яних конструкцій та виробів з тканин вогнебіозахисними речовинами ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М в період з 2009 по 2017 роки.

Таблиця 6.1

№ п/п	Об’єкти
1	Адміністративні будівлі Кабінету міністрів України
2	Адміністративні будівлі Верховної ради України
3	Будівлі Національного Банку (в тому числі будівлі Управлінь в обласних центрах)
4	Атомні електростанції (Хмельницька, Рівненська)
5	Будівлі підприємства ВАТ «Укрнафта»
6	Споруди метрополітену в Києві, Харкові, Дніпропетровську
7	Залізничні вокзали та інші споруди Укрзалізниці
8	Елеватори та інші споруди ТОВ «Нібулон»
9	Споруди ТОВ НВП «Укртехноатом»
10	Будівлі ДП «Східний гірнозбагачувальний комбінат» (м. Жовті Води)
11	Будівлі заводу «Дніпроспецсталь» (м. Дніпропетровськ)
12	Готелі, торгівельно-розважальні та виставкові центри, музеї, театри, кінотеатри, будівлі НАН України, вищих навчальних закладів, шкіл, дитячих садків, лікарень, центрів громадського харчування тощо в обласних та районних центрах України

6.2. Оцінювання технічної ефективності системи протипожежного захисту об’єкта із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин

У відповідності до загальної методики виконання досліджень проведено оцінювання ефективності СППЗО із застосуваннм ВВБЗР за допомогою метода розрахунку небезпеки виникнення НС у вигляді пожежі на об’єкті, який запропоновано швейцарським спеціалістом Гретенером [186].

Основним показником небезпеки будинку (його частини), приміщення згідно з цим методом є числове значення параметра небезпеки «П» та рівня небезпеки «У», які розраховуються по наступним рівнянням:

$$П=Р\cdot А/З=О_п/З, \quad У=П/П_д, \tag{6.1}$$

де Р – потенційна небезпека, яка враховує вплив всіх основних факторів, що сприяють виникненню і розвитку пожежі; А - фактор активації, що відображає ймовірність виникнення пожежі; $О_п$ - загроза виникнення пожежі; З - фактор захисту, який враховує вплив наявних на об'єкті заходів активного і пасивного захисту; $П_д$ - допустиме значення небезпеки об’єкта, величина якого враховує загрозу для людей.

Якщо розраховане значення П не перевищує $П_д$ і, відповідно, У<1, то об'єкт вважається досить захищеним. В іншому випадку, тобто при У>1, об'єкт має підвищену небезпеку.

Потенційна небезпека «Р» розраховується як добуток наступних факторів:

$$P = q\cdot c\cdot r\cdot k\cdot i\cdot e\cdot g, \tag{6.2}$$

де q – фактор пожежного навантаження; c - фактор горючості; r - фактор димоутворення; k - фактор токсичності; i - фактор виду будівельних конструкцій; e-фактор поверховості або висоти приміщення; g - фактор розмірів і форми площі об'єкту.

Захист «З» розраховується як добуток факторів, що відображають наявність на об'єкті заходів пасивного і активного захисту:

$$З=N\ S\ F, \tag{6.3}$$

де N - нормативні заходи, розраховуються як добуток факторів, що відображають виконання заходів, передбачених діючими в країні нормативами по захисту від НС у вигляді загорань і пожеж; S - спеціальні заходи; F - будівельні захисні заходи.

$$N= n_1\cdot n_2\cdot n_3\cdot n_4\cdot n_5, \tag{6.4}$$

де n_1 - враховує наявність і стан вогнегасників; n_2 - враховує наявність і стан системи внутрішнього пожежогасіння; n_3 - враховує надійність

внутрішнього протипожежного водопроводу; n_4 - враховує наявність і стан системи зовнішнього пожежогасіння; n_5 - враховує наявність персоналу, що пройшов пожежний інструктаж.

Спеціальні заходи «S», розраховуються як добуток факторів, що відображають наявність спеціальних заходів з виявлення пожежі та боротьби з нею:

$$S= s_1 \cdot s_2 \cdot s_3 \cdot s_4 \cdot s_5 \cdot s_6, \quad (6.5)$$

де s_1 - враховує наявність засобів виявлення пожежі; s_2 - враховує наявність засобів передачі сигналу тривоги на пульт спостереження; s_3 - враховує організацію сил і засобів рятувальних підрозділів, які обслуговують об'єкт; s_4 - враховує час прибуття підрозділів на об'єкт при пожежі в залежності від відстані до об’єкту; s_5 - враховує наявність і тип систем пожежогасіння; s_6 - враховує наявність систем димовидалення.

Будівельні захисні заходи «F», розраховуються як добуток факторів, що відображають вогнестійкість будівельних конструкцій:

$$F = f_1 \, f_2 \, f_3 \, f_4, \quad (6.6)$$

де f_1 - враховує вогнестійкість несучої конструкції; f_2 - враховує вогнестійкість зовнішніх стін; f_3 - враховує вогнестійкість стель; f_4 - враховує вплив стін, дверей і вікон, що обмежують протипожежний відсік.

Допустиме значення небезпеки $П_д$, розраховується як добуток:

$$П_д = 1{,}3 \cdot К_л, \quad (6.7)$$

де 1,3 - чисельне значення «нормальної» небезпеки; $К_л$ - коефіцієнт, що враховує підвищену загрозу для людей у будинках з їх масовим перебуванням.

Розрахунок оцінювання рівня небезпеки розміщення боєприпасів в типовому військовому складі (рис. 5.7, 5.8) проведено для чотирьох варіантів:

- Варіант 1. Простір складу без застосування запропонованої СППЗО;

- Варіант 2. Дерев’яні елементи будівельних конструкцій та дерев’яна тара вогнебіозахищені поверхневим способом обробляння вогнебіозахисною речовиною ДСА-2М (підсистема пасивного захисту);

- Варіант 3. Простір складу захищено підсистемою пожежогасіння із використанням водної вогнегасної речовини ФСГ-2М (підсистема активного захисту);

- Варіант 4. Простір складу захищено запропонованою СППЗО (варіант 2 + варіант 3).

Вихідні дані та результати розрахунків наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Вихідні дані та результати розрахунку рівня небезпеки методом Гретенера

Фактор небезпеки	Значення фактору небезпеки			
	Варіант1	Варіант2	Варіант3	Варіант4
1	2	3	4	5
Параметр небезпеки «П», розраховано за рівнянням 6.1	3,7	2,0	0,6	0,3
Потенційна небезпека «Р», розраховано за рівнянням 6.2	1,3	0,9	1,3	0,8
Фактор пожежного навантаження «q» табл. 1 [186], для питомої пожежної навантаги 64 МДж/м^2	0,7	0,7	0,7	0,7
Фактор горючості «с» табл. 2 [186] залежить від наявності вогнезахисту конструкцій	1,2	1,0	1,2	1,0
Фактор димоутворення «r» табл. 3 [186] залежить від наявності вогнезахисту конструкцій	1,2	1,1	1,2	1,1
Фактор токсичності «k» табл. 4 [186] залежить від наявності вогнезахисту конструкцій	1,0	1,0	1,0	1,0
Фактор виду будівельних конструкцій «і» табл. 5 [186] як для дерев’яних конструкцій	1,3	1,3	1,3	1,3

1	2	3	4	5
Фактор поверховості або висоти приміщення «e» табл. 5 [186] прийнято висоту більше 25 м	2,0	2,0	2,0	2,0
Фактор розмірів і форми площі об'єкту «g» табл. 9 [186] прийнято як для площі відсіку 400м^2	0,4	0,4	0,4	0,4
Фактор активації «A» табл. 9 [186] прийнято невелику небезпеку активації	0,85	0,85	0,85	0,85
Фактор захисту «З», розраховано за рівнянням 6.3	0,4	0,5	2,0	2,6
Нормативні заходи «N», розраховано за рівнянням 6.4	0,3	0,3	0,9	0,9
n_1 табл. 12 [186], відсутні вогнегасники	0,9	0,9	0,9	0,9
n_2 табл. 12 [186], враховує наявність системи пожежогасіння	0,8	0,8	1,0	1,0
n_3 табл. 12 [186], враховує наявність системи пожежогасіння	0,5	0,5	1,0	1,0
n_4 табл. 12 [186], враховує наявність системи пожежогасіння	0,9	0,9	1,0	1,0
n_5 табл. 12 [186], прийнято як для наявності персоналу, що пройшов інструктаж	1,0	1,0	1,0	1,0
Спеціальні заходи «S» , розраховано за рівнянням 6.5	0,7	0,7	1,8	1,8
s_1 табл. 13 [186], відсутня система виявлення пожежі	1,0	1,0	1,0	1,0
s_2 табл. 13 [186] відсутня система передачі сигналу тривоги	1,0	1,0	1,0	1,0
s_3 табл. 13 [186] відсутня об’єктова пожежна охорона	1,15	1,15	1,15	1,15
s_4 табл. 13 [186], враховує наявність протипожежного водопроводу	0,6	0,6	0,9	0,9
s_5 табл. 13 [186], враховує наявність системи пожежогасіння	1,0	1,0	1,7	1,7
s_6 табл. 13 [186], відсутня система димовидалення	1,0	1,0	1,0	1,0

1	2	3	4	5
Будівельні заходи «F», розраховано за рівнянням 6.6	1,2	1,6	1,2	1,6
f_1 табл. 14 [186], залежить від наявності вогнезахисту конструкцій	1,0	1,2	1,0	1,2
f_2 табл. 14 [186], залежить від наявності вогнезахисту конструкцій	1,0	1,1	1,0	1,1
f_3 табл. 14 [186], відсутні міжповерхові перекриття	1,0	1,0	1,0	1,0
f_4 табл. 14 [186], відсутній поділ на протипожежні відсіки	1,2	1,2	1,2	1,2
Допустиме значення небезпеки «$П_д$», розраховано за рівнянням 6.1	1,3	1,3	1,3	1,3
Рівень небезпеки «У» , розраховано за рівнянням 6.1	2,8	1,5	0,4	0,2

Таким чином, числові значення рівня пожежної небезпеки типового військового складу з дерев'яними будівельними конструкціями та дерев'яною тарою, обчислені за методом Гретенера, є такими: 2,8 – без застосування запропонованої СППЗО; 1,5 – у разі реалізації підсистеми пасивного протипожежного захисту шляхом вогнебіозахисту дерев'яних конструкцій та тари поверхневим способом речовиною ДСА-2М; 0,4 - у разі реалізації підсистеми активного захисту шляхом застосування системи пожежогасіння з подаванням водної вогнегасної речовини ФСГ-2М; 0,2 - у разі застосування повної СППЗО (що у 14 разів нижче, ніж за відсутності запропонованої СППЗО).

6.3. Оцінювання економічної ефективності системи протипожежного захисту об'єкта із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин

Крім оцінювання технічної ефективності запропонованої СППЗО із застосуванням ВВБЗР доцільно оцінити й економічну ефективність від її

впровадження. Для виконання повного економічного оцінювання нажаль не має необхідного набору вхідних даних (у зв'язку з відсутністю таких статистичних даних). Особливо це стосується підсистеми активного захисту. В даний час можливо провести оцінювання економічної ефективності лише підсистеми пасивного захисту.

Методичних рекомендацій щодо проведення оцінювання економічного ефекту від впровадження результатів науково-дослідних робіт з пожежної безпеки, особливо в напрямку захисту об'єктів критичної інфраструктури від пожеж на початковій стадії розвитку, досі не існує. Певний економічний ефект спостерігається із введенням в дію ДБН В.1.1-7-2002 [71]. Пункт 4.21 зазначеного стандарту вимагає, що : «У будинках, крім будинків V ступеня вогнестійкості, дерев'яні елементи горищних покриттів (крокви, лати) повинні оброблятися засобами вогнезахисту , які забезпечують I групу вогнезахисної ефективності згідно з ГОСТ 16363». Цьому в значній мірі сприяло поява на ринку вогнезахисту нових ефективних засобів вогнезахисту, до яких слід віднести й ДСА-1М та ДСА-2М.

Слід відзначити складність отримання необхідних даних з офіційних джерел про наслідки пожеж в Україні. Як зазначалось в другому розділі, при ефективному пасивному протипожежному захисті об'єкта та своєчасному застосуванні первинних засобів пожежогасіння загоряння на об'єкті швидко ліквідується. Такий алгоритм спрацювання підсистеми приводить до кваліфікації події не як «пожежі», а як «загоряння». І тоді ця подія не потрапляє до статистичних даних (обліку) про пожежі в державі [199].

Останнім часом в науковій літературі з'являються роботи, що містять нові підходи до оцінки економічного впливу впровадження науково-дослідних робіт. Так, в роботі [166] наведено, що економічний ефект можна оцінити ймовірним зменшенням збитків від пожеж за рахунок перерозподілу ймовірності ліквідації пожеж між чотирма стадіями розвитку пожежі (I – V стадії). Тобто за рахунок збільшення ймовірності ліквідації пожежі на початковій (I) стадії її розвитку. В роботі наведені розрахунки, які показують,

що за рахунок застосування заходів і засобів протипожежного захисту можливо збільшити ймовірність ліквідації пожежі на початковій стадії з базового значення 0,13 до 0,786 [166], або на 0,656.

Візьмемо за припущення, що подібних результатів можливо досягнути також і за рахунок реалізації запропонованої СППЗО. Наведемо розрахунки, що базуються на статистичних даних про пожежі в Україні за 2016-2017 рр. (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Вхідні дані для розрахунку економічного ефекту від впровадження пасивного ППЗО на основі ВВБЗР

Показник	2017 р.	2016 р.
Кількість пожеж	83 116	74 221
Прямі збитки, тис. грн.	2 038 653	1 626 531
Прямі збитки в перерахунку на один об’єкт, тис. грн.	24,53	21,91

Дані таблиці 6.3 свідчать як про збільшення кількості пожеж в Україні в 2017 р. порівняно із 2016 р., так і про збільшення прямих збитків в перерахунку на один об’єкт. Що свідчить про актуальність прискореного впровадження нових ефективних ВВБЗР, в тому числі ДСА-1М, ДСА-2М.

Враховуючи, що збитки від пожеж, ліквідованих на початковій стадії пожежі, порівняно із збитками від пожеж, ліквідованих на стадіях розвинутої пожежі, незрівнянно нижчі, їх можна не враховувати (прирівняти до 0). Тоді, відповідно до логіки економічного розрахунку за [166], прямі збитки від однієї пожежі можливо зменшити на $24,53 \cdot 0,656 = 16,09$ тис. грн. За даними додатку Г в Україні щорічно обробляються дерев’яні конструкції засобами ДСА-1М та ДСА-2М на 5 000 об’єктах. Отже, можливо оцінити економічний ефект від впровадження підсистеми пасивного захисту з використанням ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М в $16,09 \cdot 5000 = 80,45$ млн. грн. на рік [166]. Але,

оскільки деревина становить близько 80 % від пожежного навантаження на об’єктах, отримане значення слід зменшити до 64,38 млн. грн. на рік.

Одним з прикладів ефективного спрацювання підсистеми пасивного захисту є ліквідація пожежі в м. Донецьк. На об’єкті ТОВ «Готель Донбас Палас», на стадії завершення будівництва ТОВ «Захист» виконало комплекс робіт щодо пасивного захисту дерев’яних конструкцій горища із застосуванням ВВБЗР ДСА-1М. В результаті порушень правил безпеки під час проведення будівельно-монтажних робіт, виникло загоряння бітумних елементів покрівлі. Незважаючи на сприятливі умови для розвитку пожежі (температура повітря вище 30 ^{0}С, сильний вітер, наявність протягу з боку незаскленого верхнього поверху), пожежа не набула великого розвитку. Завдяки ефективному вогнезахисту дерев’яних конструкцій вона залишилась на початковій стадії розвитку. Ця пожежа була ліквідована прибувшими рятувальними підрозділами шляхом використання компактних водних струменів. Збитки від пожежі були не значними, оскільки довелося замінити лише деякі обвуглені дерев’яні елементи горища. Пошкоджень від надмірного використання вогнегасної речовини (води) також не відбулося. На теперішній час в п’ятизірковому готелі «Донбас Палас» виконано пасивний протипожежний захист із застосуванням ВВБЗР ДСА-1М.

За останні десять років нараховуються десятки об’єктів з масовим перебуванням людей, які можуть бути віднесені до категорії критичної інфраструктури (адміністративні будівлі, школи, лікарні, культові споруди тощо), на дахах яких відбувалось загорання різних матеріалів, але вогнезахищені дерев’яні конструкції унеможливлювали розвиток пожежі: поверхня конструкцій лише обвуглилась (рис. 6.2).



Рисунок 6.2 - Вигляд неопалювального горища, дерев’яні конструкції якого були вогнезахищені ВВБЗР ДСА-1М, після пожежі, ліквідованої на початковій стадії її розвитку

ВИСНОВКИ

1. Створена нормативно-технічна документація 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. Створена виробнича база ВВБЗР ДСА-1М, ДСА-2М, ФСГ-1М, ФСГ-2М на ТОВ «Вогнебіозахист», ТОВ «Захсит-Центр», яка більше десяти років забезпечує об’єкти України вогнебіозахисними засобами.

2. Проведено оцінювання технічної ефективності реалізації запропонованої СППЗО із застосуванням ВВБЗР за методом Гретенера, яке вказує на можливість зменшення пожежної небезпеки об’єкта в 14 разів в порівнянні з відсутністю такої системи. Економічний ефект від впровадження підсистеми пасивного захисту об’єкта з використанням ВВБЗР ДСА-1М та ДСА-2М може складати десятки млн. грн. на рік.

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 початкової 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 ^{o}C) товщиною в 10 мм під дією зовнішнього опромінення в 40 кВт/м^2 займається через 6,5 хв., що практично унеможливлює 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 якої 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 можливості 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 тонкорозпилених 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 ^{o}C і зменшує токсичність продуктів горіння, та метод активного захисту з використанням водних вогнебіозахисних речовин в якості заряду для первинних засобів пожежогасіння,

застосування яких унеможливлює 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 вогненезахищеної 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. // М.: ВИПТШ, 1980. 255 с.

2. Абдурагимов И.М. Несостоятельность идеи применения тонкораспыленной и «термоактивной» (перегретой) воды для целей пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность, 2011, т. 20, № 6. С. 54 – 58.

3. Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Жерноклев К.В. Исследование областей быстрого гелеобразования огнетушащих т огнезащитных систем на основе гидроксидов и карбонатов // Науковий вісник будівництва. – 2006. – Вип. 36. С.190-194.

4. Абрамов Ю.О., Кірєєв О.О., Щербина О.М. Дослідження впливу товщини шару гелю на його вогнегасні влистовості // Пожежна безпека. – 2006. - № 8. С.159-162.

5. Абрамов Ю.О., Кірєєв О.О., Щербина О.М., Бедзай А.О. Дослідження вогнегасної дії гелеутворюююючих систем на основі силікатів // Пожежна безпека. – 2007. Вип. 11. С.100-104.

6. Адлер Ю.П., Марков Е.В., Грановская Ю.В. Планирование єксперимента. М.: Наука, 1976. 312 с.

7. Айзенштейн Э.И. Полиэфиры: прогноз на завтра // Текстильная промышленность. – 2002. - № 1. С. 33-35.

8. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. – М.: Химия, - 1983. 264 с.

9. Аксельруд Г.А., Лысенский В.М. Экстрагирование (система «твердое тело – жидкость») - Л.: Химия, 1974. 256 с.

10. Аксельруд Г.А. Массобмен в системе «твердое тело – жидкость». – Львов: Из-во Львовского ун-та. – 1970. 186 с.

11. Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твёрдых веществ. –

М.: Химия, 1977. 268 с.

12. Аксенов В.П., Ройко В.М., Гришин В.В. Экспериментальные исследования тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой // Горение и проблемы тушения пожаров: Тезисы VI Всес. науч.-практ. Конф. М.: ВНИИПО, 1979. С. 240-245.

13. Андрієнко В.М., Бут В.П., Жартовський В.М., Жартовський С.В., Маладика І.Г., Цапко Ю.В. Вогнезахист деревини та виробів з неї: Навчальний посібник. Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Пожежна безпека». – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2009. 254 с.

14. Антонов А.В., Боровіков В.О.; Орел В.П., Жартовський В.М., Ковалишин В.В. Вогнегасні речовини. Посібник. - Київ: Пожінформтехніка. 2004. 176 с.

15. Антонов А.В. Інгібувальні та вогнегасні властивості тонкорозпиленних водних вогнегасних речовин на основі карбонату і нітрату калію // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2012, №1(25). С. 117 – 125.

16. Антонов А.В., Турчин А.І., Свєтлов Є.Я. Застосування технології тонкого розпилу водних вогнегасних речовин для протипожежного захисту об’єктів з масовим перебуванням людей // Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал. – К.: УкрНДІПБ МВС України, 2001. - № 2 (4). С. 65-66.

17. Антонов А.В., Турчин А.І., Слізькой О.Г., Терпігор’єв В.С. Застосування технології тонкого розпилу водних вогнегасних речовин для протипожежного захисту об’єктів з масовим перебуванням людей // Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал. – К.: УкрНДІПБ МВС України, 2002. - № 2 (6). С. 166-170.

18. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики, М., «Наука»,1969 г., 288 с. с илл.

19. Аринкин С.М., Лунева Н.К. Промышленная технология и

оборудование для огнебиозащитной пропитки древесных пиломатериалов // Пожарная безопасность: Мат. II Межнародной научн.-практ. конф: Информ. Сб. – Минск: РНПЦ ПБ, 1997. 117 с.

20. Баженов С.В., Лемешев О.А., Сысоева Э.В. Сравнение результатов контроля эффективности огнезащитных пропиток деревянных конструкций объектов с различными сроками эксплуатации и данных климатических испытаний // Пожарная безопасность. – 2006. – № 4. С. 73–77.

21. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Контроль качества огнезащищенной обработки древесины с использованием малогабаритного прибора ПМП-1 // Пожарная безопасность – 2007, - №2. С. 67 – 71.

22. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Определение срока службы огнезащитных покрытий по результатам натурных и ускоренных климатических испытаний // Пожарная безопасность. – 2005. – № 6. С. 59–67.

23. Баженов С.В. Прогнозирование срока службы огнезащитных покрытий. Проблемы и пути решения // Пожарная безопасность. 2005. № 5. С. 97–102.

24. Баратов А.Н., Вогман Л.П. Огнетушащие порошковые составы. – М.: Стройиздат, 1982. 72 с.

25. Баратов А.Н., Иванов Б.Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М., «Химия», 1971. 285 с.

26. Баратов А.Н., Молчадский И.С. Горение на пожаре. Монография. М.: ВНИИПО. 2011. 503 с.

27. Барило О.Г. Вогнебіозахист тканин і паперу просочувальною композицією. Автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук, Київ – 2005, 22 с.

28. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высш. шк. 1983, 391 с.

29. Безродный И.Ф., Меркулов В.А., Гилетич А.Н. Современные технологии пожаротушения // Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. С. 343-346.

30. Билкун Д.Г., Дубков П.Ф., Моисеенко В.М., Пешков В.В. Огнетушащие свойства воды с добавками высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений // Пожаротушение: Сб. научн. тр. – М.: ВНИИПО, 1983. С. 89-92.

31. Билкун Д.Г., Казаков М.В., Пешков В.В., Пузако М.В. Тушение древесины водой с низкомолекулярными добавками / Теоретические и экспериментальные вопросы пожеротушения: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1982. С. 99-105.

32. Болгарский А.В., Мухачёв Г.А., Щукин В.К., «Термодинамика и теплопередача» Изд. 2-е, перераб и доп. М.: «Высшая школа», 1975, 495 с.

33. Борович А.М., Кореневский А.Н., Шариков А.В. Выбор оптимальных параметров распыленной воды для тушения горючих водонерастворимых жидкостей // Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИПО, 1991. С. 58-63.

34. Брушлинский Н.Н., Гришин А.Ф., Семиков Б.Л. ЭВМ и АСУ в пожарной охране // Итоги науки и техники. Сер. Пожарная охрана. – М.: ВИНИТИ, 1977, - Т.3. С. 3-60.

35. Бутылкина Н.Г., Константинова Н.И., Тюганова М.А., Середина М.А. Оценка эффективности огнезащиты декоративно-отделочных тканей // Пожаровзрывобезопасность. – 1993.- №2. С. 17 – 19.

36. Брушлинский Н.Н. Моделирование функционирования пожарной охраны // Итоги науки и техники. Сер. Пожарная охрана, - М.: ВИНИТИ, 1977, - Т.2. С. 36 – 43.

37. Брушлинский Н.Н. О статистике пожаров и о пожарных рисках /

Н.Н.Брушлинский, С.В.Соколов // Пожаровзрывобезопасность, 2011, Т.20, №4. С. 40 - 48.

38. Брушлинский Н.Н., Кафидов В.В., Козлачков В.И. и др. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства / Под ред. Н.Н.Брушлинского. – М.: Стройиздат, 1988. 413 с.

39. Бут В.П., Жартовський В.М., Маладика І.Г. та інші. Первинні засоби пожежогасіння. Тактика використання, Навч. Пос. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля МНС України, 2008. 136 с.

40. Ван Везер. Фосфор и его соединения. Пер. с англ. Под ред.. А.И. Шерешевського. – М.: Изд. ин. лит., 1962. 670 с.

41. Ван Гиг Дж. Прикладная общая теория систем: В 2 кн.: Перевод с англ. - М.: Мир, 1981. 900 с.

42. Ванин С.И. Древесиноведение. – М.: Гослесбумиздат, 1949. С. 4-8.

43. Викторов П.П. Химическая технология волокнистих веществ. Ч.1. – М.: Гослегпром, 1953. С. 6-18.

44. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1976. 528 с.

45. Вогман Л.П., Зуйков В.А. Основные подходы к оценке уровня пожарной опасности производственных объектов // Пожаровзрывоопасность.- 2004.- №2. С.23 – 30.

46. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли: - М.: Знание. 1986. 144 с.

47. Вологдин А.И. Влияние различных антисептиков на физико-механические свойства сосны // Свойства древесины, её защита и новые древесные материалы. – М.: Наука, 1968. С. 71-76.

48. Гембицкий П.О., Воинцева И.И. Полимерный биодизный препарат полигетаметил.// Пособие.- Запорожье.: Полиграф. 1998. 44 с.

49. Горшин С.Н. Консервирование древесины. – М.: Лесн. Пром-сть, 1977. 335 с.

50. ГОСТ 12.1.005–88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

51. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

52. ГОСТ 12.1.044-89 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

53. ГОСТ 16363-98 Межгосударственный стандарт. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств.

54. ГОСТ 16588-91 Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности.

55. ГОСТ 20022.0-93 Защита древесины. Параметры защищенности.

56. ГОСТ 20022.1 Защита древесины. Термины и определения.

57. ГОСТ 20022.2 Защита древесины. Классификация.

58. ГОСТ 20022.6-93 Защита древесины. Способы пропитки.

59. ГОСТ 2084-77 Бензины автмобильные. Технические условия.

60. ГОСТ 2140-81 Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения. Способы измерения.

61. ГОСТ 21650-76 Средства скрепления тарно-штучных грузов в транспортных пакетах. Общие требования.

62. ГОСТ 26603-1985 Полотна нетканые (подоснова) антисептированные из волокон всех видов для теплоизоляционного линолеума. Метод определения биостойкости.

63. ГОСТ 28815-90 Растворы водные защитных средств для древесины. Технические условия.

64. ГОСТ 30219-95 Межгосударственный стандарт. Древесина огнезащищенная. Общие технические требования. Методы испытания. Транспортирование и хранение.

65. ГОСТ 9.048-98 ЕСЗКС Изделия технические. Методы лабораторних испытаний на способность к воздействию плесневых грибов.

66. ГОСТ 9078-84 Подоны плоские. Общие технические условия.

67. ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия.

68. ГОСТ 9685-61 Заготовки из древесины хвойных пород. Технические условия.

69. ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний.

70. Дашевкий В.Г. Конформационный анализ органических молекул. М.: Химия, 1982. 270 с.

71. ДБН В.1.1-7-2016 Пожежна безпека об’єктів в будівництві. –К., 2016 (Держбуд України).

72. ДБН В.2.5-13-98* Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд.

73. Деклараційний патент на корисну модель № 8963 Україна, МПК В 27 К 3/50 Композиція для вогнезахисту деревини / Жартовський В.М., Жартовський С.В., Борисов П.Ф. - №200700253, опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. 3 с.

74. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. – 2-е узд. перераб. – М.: Химия. 1981. 272 с.

75. Довбыш А.В., Новак С.В., Дивень Ю.В. Методи оцінювання якості вогнезахищеного обробляння будівельних конструкцій // Науковий вісник УкрНДІПБ Науковий журнал. - К. 2010, №1 (21). С. 39 – 46.

76. Дрейк Дж. Мл., Ривс В. Огнезащищенные целюлозные текстильные материалы // Целюлоза и ее производные / под. ред. Н.Бейнеза и Л.Сегала. – М.: Мир, 1974. 481 с.

77. ДСН 3.3.6.042–99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

78. ДСТУ 3413-96 Порядок проведення сертифікації продукції. Система сертифікації УкрСЕПРО.

79. ДСТУ 3675-98 Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань.

80. ДСТУ 3789-98 Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань.

81. ДСТУ 3734-98 Пожежна техніка. Вогнегасники пересувні.

82. ДСТУ 4155-2009 Захист від пожеж. Матеріали текстильні. Метод випробування на займистість (IMO-RES, A. 471(XII) NEG).

83. ДСТУ 4297:2004 Пожежна техніка. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги.

84. ДСТУ Б В.1.1-2-97 (ГОСТ 30402-96) Матеріали будівельні. Метод випробування на займистість.

85. ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244-94) Матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість.

86. ДСТУ ГОСТ 15.001:2009 СРПП. Продукция производственного назначения.

87. Дудеров Н.Г., Мелковский С.С. Идентификация огнезащитных покритий с помощью методов дифференциального термического анализа // XX Междунар. научн.-практ. Конференція, посвят. 70-летию ВНИИПО.- М., 2007. С. 230 – 232.

88. Душкин А.Л., Янышев С.С., Карпышев А.В. Мобильные и стационарные системы пожаротушения тонкороспыленной водой // Крупные пожары: предупреждение и тушение: Мат. XVI научно-практической конференции. Ч. 2. – ВНИИПО МВД России, 2001. С. 30-33.

89. Дымов С.М., Цариченко С.Г., Лотоцкий Н.А. Перспективы использования мелкораспыленой воды при тушении пожаров // Пожарная безопасность – история, состояние, перспективы: Материалы XIV всерос. науч.-практ. конф., Ч.2.-М.: ВНИИПО, 1997. С.23-27.

90. Еремин В.И., Подкользин Г.П., и др. Водные огнетушители: новые возможности // Пожаровзрывобезопасность, 1995, № 1. С. 33-36.

91. Жарков А.С., Жаринов Ю.Б., Жуков А.П. и др. Методические вопросы отработки установок пожаротушения тонкораспыленной водой с

пиротехническим источником рабочего газа // Крупные пожары: предупреждение и тушение: Мат. XVI научно-практической конференции. Ч. 3. – ВНИИПО, 2002. С. 57-59.

92. Жартовский В.М., Каганюк Д.С. Теоретические исследования процессов ингибирования горения галогенидами металлов // Средства порошкового пожаротушения: Сб. научн. тр. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1989. 149 с.

93. Жартовський В.М., Цапко Ю.В. Профілактика горіння целюлозовмісних матеріалів. Теорія та практика. – Київ, 2006. 248 с.

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

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

96. Жартовський В.М., Жартовський С.В., Шеверєв Є.Ю. Експериментальні дослідження з визначення групи горючості та індексу поширення полум’я за ГОСТ 12.1.044 зразків фанери та соснових брусків різної товщини, оброблених вогнебіозахисним засобом ДСА-2 // Об’єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів: Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Х.: НУЦЗУ, 2013. С. 338 – 341.

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

(23). С. 143 – 149.

98. Жартовський В.М. Жартовський С.В., Добростан О.В., Коваленко В.В., Шеверєв Є.Ю. Вибір методу оцінювання якості вогнезахисного оброблення дерев'яних конструкцій // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2012, №1(25). С. 137-144.

99. Жартовський В.М., Жартовський С.В., Добростан О.В., Коваленко В.В. Аналіз методів оцінювання якості вогнезахисту деревини, обробленої вогнезахисними речовинами // Матеріали 14-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників 26-27 вересня 2012, с. 176-179.

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

101. Жартовський В.М., Магльована Т.В., Жартовський С.В. Застосування полімерної поверхнево-активної речовини гуанідинового ряду з метою підвищення вогнегасних властивостей води // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2012. – № 12. С. 35-40.

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

103. Жартовский В.М., Нижник В.В., Жартовский С.В., Добростан А.В. Пассивная противопожарная защита деревянных конструкций куполов церквей с применением пропиточных составов // Пожаровзрывобезопасность: научн.-техн. журнал, «Пожнаука», Москва, 2013, т. 22, №3. С.31 – 37.

104. Жартовський С.В. Системний підхід до забезпечення активного і

пасивного протипожежного захисту об’єктів / Жартовський С.В. // Матеріали 14-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників. Київ, ІДУЦЗ, 2012. С.180 – 183.

105. Жартовский С.В., Жартовський В.М. Вогнебіозахист целюлозовмісних матеріалів в системі безпеки життєдіяльності людини / Збірник тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека - 2009». Львів, 2009, ЛДУБЖД. С. 170-172.

106. Жартовський С.В. Шляхи створення та використання просочувальних вогнебіозахисних засобів ДСА-1, ДСА-2 для деревини і фанери. / Пожежна безпека: теорія і практика: Збірник наукових праць. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2010. - № 5. С. 36-55.

107. Жартовський С.В., Нетреба А.В., Ніжник В.В., Добростан О.В. Модель процесу висолювання антипіренів з деревини при застосуванні комплексних водних вогнебіозахисних речовин // Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. праць – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2013. - №14. С. 15 – 20.

108. Жартовський С.В., Нетреба А.В., Ніжник В.В., Уханський Р.В. Удосконалення емпіричного методу розрахунку енергетичних параметрів іон-радикальних комплексів активних центрів горіння з продуктами термічного розкладу водної вогнегасної речовини // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2013. – № 1 (27). – С. 1 – 8.

109. Жартовський С.В. Дослідження пожежовибухонебезпечності вогнезахищених матеріалів з деревини вогнебіозахисними засобами ДСА-1 та ДСА-2 // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2010. – № 1 (21). С. 84–94.

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

111. Жартовський С.В., Добростан О.В. Феноменологічна модель

вогнезахисту деревини із застосуванням водної вогнебіозахисної речовини ФСГ-2 // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2012. – № 2 (26). С. 42 – 49.

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

113. Жартовський С.В., Добростан О.В., Уханський Р.В., Копильний М.І. Теоретична обґрунтування використання водних вогнегасних речовин для протипожежного захисту об'єкта // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2012, №1 (25). С. 145 – 151.

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

115. Жартовський С.В., Уханський Р.В., Ніжник В.В., Копильний М.І., Антонов А.В. Методика визначення вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин під час гасіння модельних вогнищ класу А // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека: теорія і практика» - Черкаси. АПБ ім. Героїв Чернобиля МНС України. С. 82-85.

116. Жартовский С.В., Нижник В.В., Уханский Р.В. Активная противопожарная защита деревянных куполов церквей с применением водных огнетушащих веществ // Пожаровзрывобезопасность: научн.-техн. журнал, «Пожнаука», Москва, 2013, т. 22, №4. С.65 – 71.

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

118. Жартовський В.М., Жартовський С.В. Активний і пасивний

протипожежний захист об’єктів з пожежним навантаженням із целюлозовмісних матеріалів // Пожежна безпека: теорія і практика. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. С. 58 – 65.

119. Жартовский С.В. Системный подход к обеспечению противопожарной защиты объектов с пожарной нагрузкой из целлюлозосодержащих материалов // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института: Москва, ВНИИПО, 2012. С.129 – 131.

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

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

122. 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 – 28.

123. Жартовський С.В., Добростан О.В. Дослідження ефективності вогнезахисту дерев’яних конструкцій дахів в полігонних умовах // Науковий журнал. Науковий вісник УкрНДІПБ, - К.: 2013, - №2(28). С.210 – 213.

124. Жартовський С.В., Ніжник В.В., Тищенко О.М. Економічна ефективність підсистеми протипожежного захисту об’єктів із застосуванням водних вогнебіозахисних речовин на початковій стадії розвитку пожежі // Матеріали VI міжнародної науково-практичної

конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуації» 12-13 грудня 2014 р. Черкаси. С. 135 – 137.

125. Жартовський С.В. Проблемні питання створення системи протипожежного захисту об’єкта критичної інфраструктури з пожежною навантагою із целюлозовмісних матеріалів // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27.10. С. 101-105.

126. Жартовський С.В. Технічні методи аудиту пожежної безпеки об’єктів з пожежною навантагою із дерев’яних будівельних конструкцій // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2018. – Вип. 28.1. С. 85-90.

127. Жартовський С.В. Використання солей полігексаметиленгуанідину в складах водних вогнегасних речовин для протипожежного захисту об’єктів із целюлозовмісних матеріалів // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2018. – Вип. 28.6. С. 93-98.

128. Жерноклев К.В., Киреев А.А., Карпулин А.Б. Исследование огнетушащего действия отдельных компонентов гелеобразующих огнетушащих систем при тушении пожаров класса А / Материалы XI Международной науч.-практ. Коеференции «Пожарная безопасностьи аварийно-спасательное дело: состояние, проблемы и перспективы» 25-26 сентября 2013 г., Киев. С. 376 – 378.

129. Жестяников В.М., Прусе-Жуковская И.Н. Электротехнология в деревообрабатывающей промышленности. – Л.: ЛТА, 1972. 35 с.

130. Жидкостные средства пожаротушения (обзор зарубежных изобретений). М.: ВНИИПО МВД СССР. 1979. 66 с.

131. Каганюк Д.С., Жартовский В.М. Полуэмпирический метод расчета ряда физико-химических параметров. Монография. – К.: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2006. 273 с.

132. Казаков М.В., Моисеенко В.М., Одинец М.В. Влияние добавок высокомолекулярных соединений на огнезащитные свойства воды // Пожарная техника и тушение пожаров: Сб. науч. Тр. – М.: ВНИИПО, 1981. С. 112-116.

133. Казаков М.В. Применение поверхностно-активных веществ для тушения пожаров. – М.: Стройиздат, 1977. 56 с.

134. Кірєєв О.О., Муравйов С.Д., Бабенко О.В. Можливість використання гелеутворюючих систем попередження, локалізації та ліквідації пожеж і загорянь // Хранение и переработка зерна. – № 12 (54), 2003. С.52-54.

135. Кірєєв О.О., Бабенко О.В. Обґрунтування вибору систем для дослідження явища гелеутворення при розробці нових рідинних засобів пожежогасіння // Проблемы пожарной безопасности. Харків: Університет цивільного захисту України, 2002. –Вып.12. С.107-110.

136. Кірєєв О.О., Жернокльов К.В., Савченко О.В. Определение показателя огнетушащего способности гелеобразующих огнетушащих составов при тушении модельного очагапожара 1А // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2010. – Вып. 28. С.74 – 80.

137. Киреев А.А., Бондаренко С.Н. Исследование огнетушащего действия гелеобразующих огнетушащих составов // Проблемы пожарной безопасности. – 2008.-вып.24. С.44-49.

138. Киреев А.А., Бондаренко С.Н. Исследование повторного воспламенения древесины, обработанной гелеобразующими составами. / Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2009, - вып. 25. С.65-72.

139. Киреев А.А., Кириченко А.Д. Совершенствование средств оперативной защиты от теплового воздействия пожара. / Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков. 2010. – Вып. 28. С.81-85.

140. Киреев А.А., Жерноклев К.В., Савченко А.В. Перспективные

направления снижения экономического и экологического ущерба пи тушении пожаров в жилом секторе / А.А. Киреев, // Науковий вісник будівництва: Зб. Наук. Праць – Харків ХДТУБА, ХОТВ, АБУ, 2005. Вип.31. С.295-299.

141. Киреев А.А. Термогравиметрические исследования огнетушащих и огнезащитных гелей // Проблемы пожарной безопасности. – 2006.-вып.20. С.81-85.

142. Кирюхін О.Л. Удосконалення функціональних властивостей систем утримання та стабілізації валопроводів судових турбінних установок. // Афтореф. дис. доктора техн. наук. Одеса. 2001. 36 с..

143. Кодекс цивільного захисту України.

144. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов. – М.: Химия, 1980. 274 с.

145. Константинова Н.И., Молчадский О.И., Болодьян Г.И., Прогнозирование поведения текстильних материалов на начальной стадии пожара // Пожарная безопасность. – 2004.- №6. С. 42 – 50.

146. Константинова Н.И. Проблемы огнезащиты текстильных материалов из смесевых волокон // Пожарная безопасность.- 2003.- №2. С. 109 – 118.

147. Константинова Н.И. Г.И. Болодин, Зубцова Н.С., Бутылкина Н.Г. Снижение горючости тканей и смеси хлопчатобумажной пряжи и полиэфирного волокна // Химическая технология. – 2001. - № 8. С. 17-20.

148. Концепція Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2011 – 2015 роки. Схвалено розпорядженням КМ України від 29.12.2010 №2348-р.

149. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров // М., 1973 г., 832 с. с илл.

150. Корольченко Д.А. , Громовой В.Ю., Воргушин О.О. применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях.//

Пожаровзрывобезопасность, 2011, т. 20, № 9. С. 54 – 57.

151. Коршак В.В. Химия высокомолекулярных соединений. – М.: Изд. АН СССР, 1950. С. 31-39.

152. Краткий справочник физико-химических величин под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя, Л. Химия, 1974 г. 200 с.

153. Ксандопуло Г.И. Химия горения, М.: Химия, 1980, 202 с.

154. Кузьмин В.Г., Никулин В.С., Безродный И.Ф., Гилетич А.Н. Огнетушащая эффективность перегретой воды при объёмном пожаротушении // Тактика и процессы пожаротушения: Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИПО. 1989. С. 51-55.

155. Культові будинки та споруди різних конфесій. Посібник з проектування (за загальною редакцією Куцевича В.В.) Київ ЗНДІЕП, 2002. С. 15 – 24.

156. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.:Атомиздат, 1979. 416 с.

157. Лебедев М.Н. Влияние характеристической вязкости полиакритамида на пороговый эффект при снижении гидравлического сопротивления // Пожарная техника и тушение пожаров: Сб. науч. Тр. – М.: ВНИИПО, 1980. С. 85-87.

158. Леонова Д.І., Жартовський С.В. Взаємозв’язок між вогнезахисними і токсичними властивостями просочених антипіренами целюлозовмісних матеріалів // Актуальні проблеми транспортної медицини. Науковий журнал, №2 (8).-2007. С. 79–84.

159. Лопатников Л.И. Краткий экономико-математический словарь. - М.: Наука, 1979. С. 257.

160. Лунева Н.К., Трофимова И.В., Опутина А.Г., Воробьев В.К., Тычино Н.А. Способ придания устойчивой огне (био) защищенности целлюлозосодержащим матеріалам путем их химической модификации: Информ. листок / Бел НИИНТИ. - №220. – 1989. Серия 61.59.37. – Минск,

1989. 2 с.

161. Лупша А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. – М.: Машиностроение, 1981. 240 с.

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

163. Максименко Н.А. Изыскание комплексных препаратов для защиты древесины от возгорания и биоразрушения применительно к старым ценным постройкам: Автореф. дисс. канд. техн. наук: МЛТИ. – М., 1979. 22 с.

164. Максименко Н.А. Невымываемый огнезащитный препарат // Механическая обработка древесины: Экспресс-информ. – ВНИПИЭ-ИЛуспром «Защита древесины», 1981. – Вып. 1. С. 5-6.

165. Максименко Н.А. Система биозащитных, огнезащитных и биоогнезащитных средств для конструкций // Биоповреждения в строительстве – М.: Стройиздат, 1984. 320 с.

166. Мамаєв В.В. Розвиток наукових основ оцінки пожежної небезпеки вугільних шахт / Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук – Макіївка. – 2011. 36с.

167. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров. – Л.: Химия. 1970. 155 с.

168. Мацукова В. и др. Исследование способа защиты от пламени пожаров при помощи водяного тумана // Себо качаку консюсе. – 1974, № 11. С. 16-24.

169. Методические указания к лабораторному спецпрактикуму по методам исследования структуры полимеров / Пелешенко С.С., Нуждина Ю.А., Демченко О.В., Баранова А.И. – К.: Киевский університет, 1988. 57 с.

170. Методичний посібник з питань експлуатації та застосування

вогнегасників. – К.: УкрНДІПБ МВС України, ДПТ України, 1997.119 с.

171. Методы количественной оценки уровня пожаровзрывоопасности объектов: Обзорная информация / В.М. Гаврилей, А.П. Шевчук, А.В. Матюшин, В.А. Иванов //.- М.: ГИЦ МВД СССР, 1987. 55 с.

172. Мигальцо И.И., Третьякова Л.И., Эндре Нэмет, Богларка Эперьеши. Термические процессы в швейной промышлености. – К.: Техника; Будапешт: Muszaki, 1987. 213 с.

173. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент. – М.: Наука. 1979. 38 с.

174. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. - М.: Наука, 1981. 487 с.

175. Моисеенко М.В., Дубков П.Ф. Влияние добавок высокомолекулярних соединений на огнетушащие и огнезащитные свойства воды // Теоретические и экспериментальные вопросы пожеротушения: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1982. С. 106-113.

176. Моравиц Г. Макромолекулы в растворе. М.: Мир, 1967. 534 с.

177. Морозов К.Е. Математическое моделирование в научном познании. – М.: 1969. 430 с.

178. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических координационных соединений: Пер. с англ.. – М.: Мир, 1991. 536 с.

179. НАПБ В.03.003–2000. Норми пожежної безпеки для пасажирських вагонів.

180. Ніжник В.В., Жартовський В.М., Жартовський С.В., Гутник О.П. Вогнебіозахист деревини та дерев’яних конструкцій куполів культових споруд // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2011. – № 2 (24). С. 1 – 8.

181. Ніжник В.В., Жартовський В.М., Жартовський С.В., Гутник О.П. Застосування вогнебіозахищеної деревини для підвищення протипожежного захисту куполів культових споруд // Матеріали X

Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека - 2011». – Харків: НУЦЗ України, 2011. С. 109 – 110.

182. Ніжник В.В., Тимошенко О.М., Жартовський С.В., Рихліцький І.А., Гутник О.П. Обґрунтування застосування деяких водних вогнегасних речовин для систем пожежогасіння підкупольних дерев'яних конструкцій культових споруд // Науковий вісник УкрНДІ ПБ: Науковий журнал. – 2010. – № 2 (22). С. 131 – 134.

183. Нижник В.В., Нижник Т.Ю. Фізична хімія полімерів. – К.: Фітосоціоцентр, 2009. 424 с.

184. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. – М-Л.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 43-65.

185. НПБ 251–98. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытаний.

186. Осипова М.Н. Методическое пособие по оценке пожароопасности помещений различного назначения методом Гретенера. – М.: НОУ «Такир», 1998. 68 с.

187. Оценка качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах. Руководство. Утверждено ФГУ ВНИИПО МЧС России 15.11.2010 г.

188. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыления жидкостей. - М.: Химия. 1984. 517 с.

189. Панова Р.Г. Использование регрессивных моделей для количественной оценки пожарной опасности объектов // Пожарная профилактика: сб. тр. /ВНИИПО.- М., 1980.- Вып. 16. С.34 – 42.

190. Пат. 60882 Україна, МКІ 7А62С1/00. Способ гасіння пожежі та склад для його здійснення / Борисов П.Ф., Росоха В.О., Абрамов Ю.О., Кірєєв О.О., Бабенко О.В. (Україна).-№ 2003032600. Заявл. 25.03.2003; опубл. 15.10.2003, бюл. № 10, 2003

191. Пат. 253187, ГДР. Смачиватель. Wassriges Feuerloschmittel. Porst

P., Hanino G., Kwietkowski H., Bamberg G., VEB Kombinat Feuerloschgerate Neuruppin; Заявл. 06.10.86; № 2950181; опубл. 13.01.88, МКИ A 62 D 1/100.

192. Патент на корисну модель № 3025 України, МПК (2006), Д06М 11/68. Композиція просочувальна для поверхневого вогне- та біозахисту тканин і паперу/ В.М.Жартовський, О.Р.Каптур, С.М.Сташевська (№20040706162), опубл. 15.09.2004 р. Бюл. № 9. 4 с.

193. Патент на корисну модель № 23802 Україна, МПК (2006) ДО6М 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.

194. Патент на корисну модель № 23803 Україна, МПК (2006) ДО6М 11/00 Просочувальний розчин для поверхневого вогнебіозахисту тканин та паперу / В.М. Жартовський, С.В. Жартовський - №U200700253, опубл. 11.06.2007 р., Бюл. № 8. 3 с.

195. Первушин Ю.В., Ивченко А.И., Чарков В.П. – В сб.: Проблемы горения и тушения пожаров. М. ВНИИПО, 1975. 165 с.

196. Первушин Ю.В. Тушение распыленной водой и порошками диффузионных пламен. Физика горения и взрыва. Т. 15, №1, 1979. С. 77 – 83.

197. Пожарная безопасность. Общие требования: Межгосударственный стандарт. ГОСТ12.1.004-91.-М.: Госстандарт России: Из-во стандартов, 1992. 77 с.

198. Правила з вогнезахисту, які затверджені Наказом МНС України від 02.07.2007 № 460, зареєстровано в Міністерстві Юстиції України 24 липня 2007 р. за № 849/14116.

199. Правила обліку пожеж. Затверджені постановою Кабінету Міністрів України від 26 липня 1994 р. №508.

200. Провести дослідження і розробити програмне забезпечення щодо визначення сітки покриття підрозділами місцевої пожежної охорони в

сільських населених пунктах: Звіт про НДР/ УкрНДІПБ; № 0106U005414.- К.2006. 45 с.

201. Провести дослідження та розробити проект правил пожежної безпеки для культових споруд: Звіт про НДР/ УкрНДІПБ МНС України. - № 0107U010370; інв. № 0209U005559. – К. 2008. 23.с.

202. Проектування дерев'яних конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1995-1-2:2004, MOD) ДСТУ-Н-П В.2.6-157:2010 / П.Бокін, В.Поклонський, Р.Расюк, В.Тарасюк, О.Фесенко, С.Фомін, С.Жартовський, Л.Нефедченко, С.Новак, І.Харченко, О.Гладшино, О.Євсеєнко, С.Мусійчук, В.Сокіл, А.Поздєєв, С.Поздєєв, В.Жартовський, Ю.Цапко, Б.Демчина, Т.Шналь, М.Савицький. [Чинний від 2010-28-12] – Київ, Мінрегіонбуд України, - 2011. 65 с.

203. Регламент робіт з вогнезахисту «Композиція просочувальна для поверхневого вогне- та біозахисту тканини, паперу, очерету згідно ТУ У 24.6-32528450-002-2004».

204. Рекомендации по обработке результатов прямых и косвенных измерений. – ВНИИПО. – М.: 1983. 34 с.

205. Роговин З.А., Шорыгина Н.Н. Химия целлюлозы и её спутников. – М.: Госхимиздат, 1953. С. 6-18.

206. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.

207. Розработка огнетушащего состава на основе фосфорно-аммонийных солей / Е.С. Арцыбашев, В.Т. Лорбембаум, Т.Г. Пирогова, И.Н. Седина // Лесные пожары и борьба с ними. – Л.: 1989, № 1. С. 61-69.

208. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1991. 320 с.

209. Роценс К.А. Современные подходы к улучшению технических свойств древесины // Комплексное использование древесного сырья. – Рига, 1984. С. 132-156.

210. Руководство к практическим занятиям по гигикне труда. Под ред. проф. Шевченко А.М. – К.: Вища шк., Голов изд., 1986. С. 301 – 303.

211. Савченко А.В., Киреев А.А. Перспективы применения гелеобразующих составов при ликвидации чрезвычайных ситуаций со взрывами, в условиях недостатка воды // Проблеми надзвичайних ситуацій: Сб. наук. пр. УЦЗ України – Вип. 8 – Харків: УЦЗУ, 2008. С. 157 – 162.

212. Савченко О.В. Визначення економічного ефекту від використання гелеутворюючої системи для гасіння пожеж у житловому секторі // Пожежна безпека: Теорія і практика: Зб. наук. праць. – АПБ, 2010. – Вип. 5. С.138 – 140.

213. Савченко О.В. Вплив гелеутворюючих систем на матеріали, поширені у житловому секторі // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2010. – Вып. 27. С.186 – 191.

214. Савченко О.В. Експериментальне визначення вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворювальної системи $CaCl_2$ – Na_2O•2,95 SiO_2 – H_2O // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів, 2010. – Вип. 16. С.109 – 113.

215. Савченко О.В. Результати натурного випробування оптимізованого кількісного складу гелеутворюючої системи у типових умовах пожежі житлового сектору // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. УГЗ Украины - Вып. 26 – Харьков: УГЗУ, 2009. С.121 – 125.

216. Савченко О.В., Кірєєв О.О., Альбощий В.М., Данильченко В.А. Дослідження вогнезахисної дії солевих плівок на матеріалах, розповсюджених у житловому секторі // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. АГЗ Украины – Харьков, 2006. Вып. 19. С.127-131.

217. Савченко О.В., Кірєєв О.О. Оптимізація кількісного складу гелеутворюючої системи для гасіння пожеж об’єктів житлового сектору // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. УГЗ Украины - Вып. 25 –

Харьков: УГЗУ, 2009. С.162 – 166.

218. Савченко О.В., Кірєєв О.О., Тригуб В.В., Жерноклев К.В. Попередження надзвичайних ситуацій при горінні полівінілхлориду // Проблеми надзвичайних ситуацій: Сб. наук. Праць УЦЗ України – Харків, 2007. Вип. 5. С.177-181.

219. Савченко О.В., Кірєєв О.О., Шаршанов А.Я. Модель гасіння пожежі постійної площі з урахуванням часу повторного займання, кількісного та якісного складу горючого завантаження // Проблемы пожарной безопасности. – 2007.-вып.22. С.161-165.

220. Савченко О.В., Островерх О.О., Ковалевська Т.М., Волков С.В. Дослідження часу займання зразків ДСП, оброблених гелеутворюючою системою $CaCl_2$ – Na_2O•2,95 SiO_2 – H_2O // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2011. – Вып. 30. С.209 – 215.

221. Савченко О.В., Островерх О.О., Семків О.М. Визначення вогнегасної здатності гелеутворювальної системи $CaCl_2$ – Na_2O•2,95 SiO_2 – H_2O у лабораторних умовах // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2013. – Вып. 33. С.162 – 168.

222. Савченко О.В., Островерх О.О., Семків О.М., Волков С.В. Використання гелеутворюючих систем для оперативного захисту конструкцій та матеріалів при гасінні пожеж // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – Вып. 32. С.180 – 188.

223. Савченко О.В., Островерх О.О., Семків О.М., Волков С.В. Дослідження розповсюдження полум’я по поверхні зразків ДВП, оброблених ГУС // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. – Харьков, 2012. – Вып. 31. С.181 – 186.

224. Саенко А.И. Повышение огнезащиты древесины глубокой пропиткой антипиренами на основе электрогидравлического эффекта: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков, 1998. 20 с.

225. Сизиков А.А., Жартовский С.В., Нижник В.В. Противопожарная

защита подкупольных деревянных конструкций культовых сооружений. // Материалы XXIV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института: Москва, ВНИИПО, 2012. С.120 – 123.

226. Смачиватель для тушения лесных пожаров. Forest fire agent // «Fire chief», 1987.— №10. P. 72-74.

227. Смирнов Н.В., Булага С.Н., Дудеров Н.Г. Контроль качества огнезащитных работ // Пожарная безопасность – 2004, № 6. С. 51 – 56.

228. Смирнов Н.В. Способы и средства огнезащиты древесины: руководство. 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: ВНИИПО. 2011. 79 с.

229. Собурь С.В. Огнезащита материалов и конструкций: Справочник / 2-е изд., доп. (с изм.). – М.: Спецтехника, 2003. 240 с.

230. Соколенко К.І. Підвищення ефективності протипожежного захисту об’єктів із застосуванням вогнезахищеної деревини. Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук, Київ – 2006. 23 с.

231. Справочник химика, под ред. Б.П.Никольского, т. II, Л., Ленинградское отделение из-ва «Химия». 1168 с.

232. Справочное руководство по древесине / Пер. с англ. – М.: Лесная промышленность, 1979. 544 с.

233. Степовая Л.П., Шутов Г.М. Огнестойкая модифицированная древесина // Механическая технология древесины: Республиканский межведомственный сб. – Минск: Вышэйшая школа, 1980. 165 с.

234. Стоецкий В.Ф., Дранишников Л.В., Есипнко А.Д., Жартовский В.М., Найверт А.В. Управление техногенной безопасностью объектов повышенной опасности / В.Ф.Стоецкий, // Тернополь, Из-во Астон, 2006. 424 с.

235. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. М.: Химия, 1978, 370 с.

236. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи

використання води в пожежній справі. Навчальний посібник.- Харків. 2004. 252 с.

237. Таубкин С.И. Основы огнезащиты целлюлозных материалов. – М.: Минкомунхоз РСФСР, 1960. 346 с.

238. Тищенко А.М. Огнетушащая эффективность пожаров при подавлении углеводородного пламени с переменным содержание кислорода // Материалы научн. конфер. «Совмещенные проблемы тушения пожаров». М.: МИПБРФ. 1999. С. 38 – 40.

239. Тищенко О.М., Жартовський С.В., Тищенко Є.О. Вогнегасні порошки та умови їх застосування: навч. посібник. - Черкаси: ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ, 2014. 252 с

240. Токсиколого-гігієнічний паспорт продукту, що планується до використання в народному господарстві, - суміші просочувальні для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини. Затверджено Головою Комітету з питань гігієнічного регламентування МОЗ України. 26.04.2003 р., м. Київ. 5 с.

241. Томас Г.О. Применение, механизмы и эффективность использования распыленной воды для взрывозащиты объектов большого объёма // Пожаровзрывозащита веществ и взрывозащита объектов: Международный семинар. – М.: ВНИИПО, 1995. С. 44-45.

242. Тропинов А.Г., Жартовский В.М., Антонов А.В., Баратов А.Н. Взаимодействие смесей диаммонийфосфата и хлорида калия с активными радикалами пламен. – Кинетика и катализ. – 1988. - № 1. С. 176-179.

243. Тропинов А.Г., Жартовский В.М., Антонов А.В., Краснянский М.Е. О совершенствовании методов исследования ингибирующей способности огнетушащих порошков. – Донецк: ЦНИИУголь, 1987. 8 с.

244. Тропинов А.Г., Жартовский В.М. Взаимодействие углеводородных пламен с огнетушащими порошками // Огнетушащие порошковые средства: Сб. науч. Тр. – М.: ВНИИПО СССР, 1985. С. 80-84.

245. Трофимов В.А., Яхно О.М., Губарев А.П., Солонин Р.И. Рабочие жидкости систем гидропривода. – К.: НТУУ «КПИ», 2009. 184 с.

246. Тычино Н.А. Огнезащита и биозащита древесины и материалов на основе целюлозы. Практическое пособие. Минск. ИООО «Право и экономика». 2008. 134 с.

247. ТУ У 24.6-13672801.002-1999 із змінами. Суміші просочувальні для поверхневої вогнебіозахисної обробки деревини.

248. ТУ У 24.6-32528450-001-2003 із змінами. Суміші просочувальні для поверхневої вогнебаозахисної обробки деревини.

249. ТУ У 24.6-32528450-002-2004 із змінами. Композиція просочування для поверхневого вогне- та біозахисту тканин, паперу, очерету ФСГ-1.

250. ТУ У 24.1-21088370-001:2009 Полігексаметиленгуанідингідро-фосфат.

251. ТУ 2499-048-98536873 Средство для огнезащиты древесины Неомид 450-1.

252. ТУ У В.2.7 – 24.1 – 31911658.001 – 2002 Смеси «Силол».

253. Турчин А.І. Антонов А.В. Теоретичні і практичні питання застосування технологій точного розпилювання водних вогнегасних речовин. // Науковий вісник УкрНДІПБ, 2008, № 1/17. С.138-145.

254. Тычино Н.А. Высокоэффективные огнезащитные средства комбинированного действия для обработки древесины: Автореф. на соискание учёной степени д-ра техн. наук. – М., 2005. 42 с.

255. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина. Химия, ультраструктура, реакции, пер. с англ.. – М.: Лесная промышленость, 1988. 512 с.

256. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов, М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.

257. Харитонов Ю.Я. Аналітична хімія (Аналітика). В 2 кн. Кн. 1. Общие теоретические основы. Качественный анализ. – 2-е изд. испр. – М.:

Высш. шк. 2003. 615 с.

258. Харченко І.О. Бєгун В.В., Денисова О.О. Аспекти застосування ризик орієнтованого підходу до оцінювання ймовірності виникнення пожежі // Науковий вісник УкрНДІПБ.- 2005.- №1. С. 43-51.

259. Химия: Справ. Изд./В. Шретер, К.-Х. Лаутеншрегер, Х. Бибрак и др.: Пер. с нем.-М.:Химия, 1989.-Пер. изд.: ГДР,1986. 648 с.

260. Чижиков В.П., Кулев Д.Х. Физико-химические способы борьбы с задымленностью при пожарах. – М.: ГИЦ, 1989, Вып. 6/89. 59 с.

261. Численные методы: Учеб. пособ./ Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. – М.: Наука, 1987. 600 с.

262. Чумаченко С.М., Жартовський С.В., Тітенко О.М. Методика розроблення математичної моделі охолоджувального ефекту в процесі нагрівання зразка деревини, просоченого водною вогнебіозахисною речовиною // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.8. С. 337-347.

263. Чумаченко С.М., Жартовський С.В., Тітенко О.М., Троцько В.В. Методика створення математичної моделі розподілу антипіренів всередині вогнезахищеної деревини // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.5. С. 378-385.

264. Штабский Б.М., Федоренко В.И. Методология гигиенической оценки смесей вредных веществ // Гигиена и санитария, - 1987. - №9. С. 60 – 63.

265. Advanced Fireeproofing Systems Ltd. Improvements of relating to fire proofing compositions. – Brit. Pat. № 1570604, С09Д5/18, С 3 В, 4 III. 1977, 2. VII. 1980.

266. A formula for the assessment of fire risk categories // Fire.- 1974.- Vol. 64, №830. P.141.

267. Beninate J., Harper R. Imparting Durable Press and Flame Retardancy to Cotton Fabrics // J. Fire Retardant Chemistry.- 1980, V5. P. 57 – 69.

268. Beninate J., Morean J., Drake Jr. Incorporation of N-methylol Compounds in THPS-NH_3 Flame Retardant Treatments for Cotton // J. Fire Retardant Chemistry.- 1980, V7. P. 36 – 46

269. Bodamer M. Waterschung der Loschwirrung verschiedener Loschmittel und Loschmethoden bei unterschiedlichen Brandgutern. VFDB – Zeitschrift. – 1986, № 3.122125, 11, 0042-1804.

270. Brushlinsky N.N., Hall J.R., Sokolov S.V., Wagner S.V. World the statistics: Report №13, CFS of CTJF, - Moscow – Berlin, 2008.

271. CEN/TS 14972:2008 Fixed firefightirg systems – Watermist systems – Design and installation.

272. Charles W. George and Ronald A. Sussott. Effects of ammonium sulfate ammonium phosphate on the pyrolysis and combustion of cellulose. USDA Forest Service Research Paper INT-90 April 1971. Intermounain Forest and Range Experiment Station Forest Service U.S. Department of Agriculture Ogden, Utah 84401 Joseph F. Pechanec, Director.

273. 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

274. Crank J. The Mathematics of Diffusion – Oxford: Claredon Press, 1956. 348 p.

275. Crystallographic properties of fertilizer compounds. // Chemicall engineering bueletin, № 6, May 1967. Tennessee valley authority.

276. Cullen A.C. Measures of compounding conservatism in probabilistic risk assessment = Про можливість поєднання детерміністичного та імовірного підходів до оцінки ризику / A.C. Cullen// Risk Anal.- 1994.- Vol14, №4. P.389 – 393.

277. Escande J., Jannoy A. Probabilistic and deterministic risk assessment methods // World Conf. Chem. Assidents, Rome, July, 1987.- Edinburgh, 1987.

P. 113 – 120.

278. Flame retarding of paper and board. – Pater, 1976. P. 69-70.

279. Levchik S.V., Weil E.D. Owerview of recent developments in flsme retardancy of policarbonates, Polim. Int., 54(2005). P. 981-998.

280. Hydrospray Extinguishers. Fire Surveyor, 1993, vol. 22, №5, P.29.

281. Mathez M. Approches envisageables en matiere d'evaluation de la securite // Rev/ generale de la securite.- 1983.- №29. P. 40 – 42.

282. Mawhinney J.R., Dlygogorski B.Z., Kim A.K. A closer look at the fire extinguishing properties of water mist // Fire Saf. Sci. Proc. 4th Int. Symp. – 1994. P. 47-60.

283. McKay R.S. Fine water spray – halon replacement option // Fire Surveyor, 1993, 23, № 3. P. 16-20.

284. Parchwitz W. Methode der Brangefahrenanalyse // Fertigungstechn und Betr.- 1984.- Vol.34. P. 240 – 241.

285. Pradyot Patnaik, Ph.D. Handbook of Inorganic Chemicals/McGraw-Hill, 2002

286. Procede de protection d'une zone notamment contre l'incendie et appareilage pour sa mise en oeuvre; заявка 0514610 ЕПВ, МКИ5 А 62 С 3/02. Kaidonis A., Issartel E., Zeus Chemin Des Bastidnnes. - № 914013313. Заявл. 23.5.91; опубл. 25.11.92.

287. Ramsen N. Watermist – a status update. Fire Prev., 1996, № 287. P. 16-20.

288. Rasbash D.J. Analytical approach to fire safety // Fire Surv.- 1980.- Vol.9.- №4. P.20 – 34.

289. Rasbash D.J. Fire Res Abstr. Rev., 1962, 4, 28.

290. Revolution von Quantersprung beim Loschmittel Wasser. Brandschutz. – 1995, 49, № 8, P.534-537

291. Smith D.R. Water mist fire suppression systems // Fire Saf. Eng., 1995. – V.2, № 2. P. 10-15.

292. Special underground facilities (UGF-s) serving for the critical infrastructure // New challenges in the field of military science : international scientific conference. – 2006. – November 7-8: http://hadmernok.hu/kulonszamok/newchallenges/szalai.html#12

293. The New York State Comptroller. Fire Safety: https://www.osc.state.ny.us/localgov/audits/swr/2015/firesafety/global.pdf

31. Vlatnovic J.J. Improwed fire and static resistant coating. Austral. Pat. №474627. D 06 M 11/08, C09 K 3/16. 11/14/73, 12 VIII. 1976.

85. Wighus R. Extinguishment of encloset gas fires with water spray // Fire Saf. Prog. 3rd Int. Symp., 1991. P. 997-1006.

296. Yamashika S. et al., Burning Rate of Wood Crib, Report of Fire Research Institute of Japan, No.41, 1976.

297. Zatielska J., a.o. Synteza i zastosowanie zywic Jostorowoaminowyct do zatezpieczenia drewna sosnowego pzzed dzialaniem ognia i gzzylow. – Pz. Inst technol. drew., 1979. – 26, № 1-2. P. 179-194.