

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Вахітов Раміль Азатович

УДК 678.6:667.613:66.095.26

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЛІМЕРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО
ПОКРИТТЯ РЕАКТИВНОГО ТИПУ З УДОСКОНАЛЕНИМИ
РЕОЛОГІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

Галузь знань 16 Хімічна та біоінженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

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


Р.А. Вахітов

Науковий керівник Бессарабов Володимир Іванович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Вахімов Р.А. Розроблення технології полімерного вогнезахисного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 Хімічні технології та інженерія. – Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, 2026.

Сучасні стратегії розвитку вогнезахисної галузі спрямовані на підвищення класу вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом використання засобів пасивного вогнезахисту. Аналітичні дослідження демонструють, що полімерні інтумесцентні покриття (покриття реактивного типу) займають найбільшу частку світового ринку протипожежних матеріалів. Ці покриття забезпечують високу вогнезахисну ефективність та дозволяють втілювати у сучасне будівництво складні архітектурні конструкції та дизайнерські рішення. Тому важливими та актуальними є наукові та прикладні дослідження з питань підвищення термостійкості та вогнестійкості інтумесцентних систем та покриттів, удосконалення технологічних властивостей та фізико-механічних властивостей для спрощення нанесення, зниження вартості вогнезахисної обробки, пролонгування строку експлуатації тощо.

Об'єкт дослідження – закономірності формування вогнезахисних та реологічних властивостей інтумесцентних полімерних композицій.

Предмет дослідження – технологія полімерного інтумесцентного покриття для сталевих конструкцій з удосконаленими вогнезахисними та реологічними характеристиками.

Метою дисертаційної роботи є розроблення технології вогнезахисного інтумесцентного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій не менше 150 хв.

Для досягнення поставленої мети в роботі послідовно вирішено комплекс наукових і прикладних завдань, що охоплюють розроблення рецептур покриття реактивного типу при варіюванні полімерного матеріалу та

співвідношення складових інтумесцентної системи, дослідження механізмів, фізико-механічних властивостей та умов формування коксового шару підвищеної термостійкості, оптимізацію реологічних властивостей вогнезахисної композиції. Підсумком цих досліджень є розроблення та впровадження у виробництво технології інтумесцентного покриття з удосконаленими реологічними показниками, яке забезпечує межу вогнестійкості не менше 150 хв, нанесення товщини мокрого шару фарби не менше 2 мм та має прогнозований термін експлуатації до 25 років.

Ці результати досягнуто шляхом дослідження механізму вогнезахисту базової інтумесцентної композиції складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/полімер за допомогою розробленого науково обґрунтованого алгоритму лабораторних методів, який дозволяє прогнозувати ступінь вогнезахисту покриттів реактивного типу на етапі створення рецептур захисних засобів. Достовірність та коректність запропонованого алгоритму прогнозування підтверджена результатами повномасштабних вогневих випробувань згідно з національними стандартами. Такий підхід до попереднього визначення межі вогнестійкості, яку здатна забезпечити інтумесцентна композиція, суттєво скорочує тривалість і вартість процесу розроблення нових матеріалів.

Визначені закономірності та механізми впливу структури співполімерів вінілацетату та стирол-акрилату на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит. За результатами порівняння межі вогнестійкості R сталевих конструкцій з покриттями, визначених шляхом повномасштабних випробувань за ДСТУ Б В.1.1-14:2007, виявлено, що присутні в покриттях полімери (співполімери вінілацетату, стирол-акрилату, вінілхлориду) суттєво впливають на ефективність інтумесцентного вогнезахисту. Вогневі дослідження дозволили встановити класифікацію полімерів на три групи, які відрізняються механізмами хімічних перетворень та термодеструкції в умовах пожежі, а також фізико-механічними властивостями та теплоізоляційними характеристиками утворених коксових шарів:

- негалогеновані співполімери вінілацетату, покриття з якими відзначаються тривалою стабілізаційною ділянкою сталості коефіцієнта спучення (300–600 °C), утворенням міцного та регулярного захисного коксового шару з високими фізико-механічними властивостями та найбільшими показниками вогнестійкості (R 59–62 хв) серед досліджених полімерів;
- галогеновані вінілацетатні полімерні матеріали у складі покриття демонструють скорочену стабілізацію та надмірний коефіцієнт спучення в інтервалі 350–500 °C, що призводить до передчасного руйнування вуглецевого каркасу та показника R 44–52 хв;
- стиролакрилатні полімери в покриттях також показують коротку стабілізаційну ділянку коефіцієнта спучення від 350 °C до 500 °C, стікання розплавленого коксового шару з конструкції та помірну межу вогнестійкості R 32–48 хв.

Таким чином встановлено, що негалогеновані водно-дисперсійні співполімери вінілацетатного типу здатні забезпечувати межу вогнестійкості сталевих конструкцій більше 60 хв. Доведено, що для органорозчинних стирол-акрилатних композицій ефективною є комбінація ньютонівських і неньютонівських полімерів, яка підвищує вогнестійкість до 60 хв. Галогеновмісні полімери доцільно виключити як полімерну складову інтумесцентної композиції з міркувань екологічної безпеки.

Для збільшення вогнезахисної ефективності покриття реактивного типу, що містить як полімерну матрицю співполімер етилену з вінілацетатом, визначено оптимальне співвідношення компонентів інтумесцентної системи поліфосфат амонію : меламін : пентаеритрит (3,6 : 1 : 1,8), яке забезпечує досягнення значень вогнестійкості $R > 120$ хв та формує найбільш стабільний теплоізоляційний коксовий шар з високими фізико-механічними властивостями.

Ефективним рішенням удосконалення вогнестійкості покриття реактивного типу є його модифікація нанорозмірними алюмосилікатами та сумішшю мінеральних волокон з різними температурами розкладання. Такий підхід зміцнює теплоізоляційний коксовий шар, що підвищує вогнестійкість

покриття на 10–20 %, завдяки хімічному утворенню термостійких полімерних композитів і нанокомпозитів, а також фізичному армуванню спученого шару. Виявлено, що додавання суміші мінеральних волокон Lapinus CF50 та Lapinus MS605 у водно-дисперсійну фарбу реактивного типу дозволяє застосовувати інтумесцентну систему для вогнезахисту сталевих конструкцій в жорстких умовах вуглеводневої пожежі.

Вперше використано математичне моделювання для розрахунку регуляційних параметрів реології фарби реактивного типу (межі текучості (τ_0 , Па) та в'язкості при високих швидкостях зсуву (η_∞ , Па·с) за рівнянням Кассона, що дозволило розробити простий та ефективний метод контролю в'язкості продукції. Визначення параметрів τ_0 та η_∞ на етапі виготовлення інтумесцентної композиції забезпечує виробництво реологічно удосконаленого захисного засобу реактивного типу, який може наноситися на металеві конструкції товщиною мокрої плівки від 1,0 до 2,5 мм за один прохід. Такий підхід надає можливість виготовлення інтумесцентної фарби з заданими реологічними властивостями відповідно до вимог щодо необхідної товщини покриття для досягнення певного класу вогнестійкості.

Аналіз реологічних характеристик комерційних засобів вогнезахисту, а також великої вибірки інтумесцентних композицій за власними рецептурами, показав, що для отримання бездефектного мокрого шару фарби товщиною не менше 2 мм необхідні такі орієнтовні значення основних реологічних параметрів: $\eta_0 \sim 200 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$; $\tau_0 \geq 300 \text{ Па}$; $\eta_\infty \geq 3 \text{ Па} \cdot \text{с}$, що відповідає області стабільного нанесення без дефектів.

Вперше проведено систематичне вивчення впливу загущувачів неасоціативного (гідрофобно модифіковані етери целюлози (HEMC), наноглини) та асоціативного (гідрофобно модифіковані етоксильовані уретани (HEUR) та лугорозчинні емульсії (HASE)) типів на реологічний профіль вогнезахисних інтумесцентних фарб складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/співполімер вінілацетату. Встановлено, що загальноприйняті підходи до модифікації реології інтумесцентної композиції, а саме використання окремих традиційних загущувачів для водно-дисперсійних фарб дозволяє наносити мокрий шар не більше 1 мм за один прохід.

Експериментально обґрунтовано, що використання етерів целюлози як модифікаторів реології реактивного покриття забезпечує високу стабільність фарби під час тривалого зберігання, але обмежує товщину шару до 0,5 мм.

Шляхом аналізу реологічних профілей багатоваріантного масиву інтумесцентних композицій науково обґрунтовано ефективність комбінованого підходу до модифікації їх реологічних властивостей. Продемонстровано, що тільки використання багатокомпонентних систем за обов'язкової участі етерів целюлози, наноглин та гідрофобно модифікованих поліуретанів забезпечує формування стабільної тиксотропної структури. Найбільш ефективною є комбінація загущувачів НЕМС + наноглини + НЕUR для середніх та високих зсувів у сумарній кількості 2 %, яка дозволяє досягти товщину мокрого шару не менше 2 мм за один прохід без утворення дефектів, що є суттєвою технологічною перевагою розробленого реактивного покриття.

На основі отриманих наукових та практичних результатів розроблено та промислово масштабовано технологічну схему виробництва інтумесцентного покриття з підвищеними вогнезахисними властивостями та удосконаленими реологічними характеристиками. Технологічна схема розробленого покриття впроваджена у виробництво та вироблено дослідний зразок продукту у кількості 500 кг. Нанесення отриманої фарби в умовах будівельного майданчика підтвердило, що реологічні властивості розробленої фарби на водній основі забезпечують її нанесення товщиною мокрого шару не менше 2,1 мм без дефектів, таких як провисання, стікання, розтріскування тощо. Збільшення товщини плівки при нанесенні, що перевищує традиційно рекомендовані 0,7–1,2 мм для аналогічних покриттів, дозволяє суттєво скоротити витрати на вогнезахисну обробку.

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано та розроблено технологію інтумесцентного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій не менше 150 хв та має прогнозований термін експлуатації до 25 років. При цьому вперше:

- експериментально обґрунтовано доцільність застосування моделі Кассона для визначення граничних реологічних критеріїв технологічності

інтумесцентних водно-дисперсійних фарб, що забезпечує виробничий контроль їх властивостей без використання складних реометричних приладів;

- визначено кореляційну залежність між основними реологічними параметрами інтумесцентної фарби (η_0 , τ_0 , η_∞) та технологічно допустимою товщиною мокрого шару, що забезпечує бездефектне формування покриття;
- запропоновано комбіновану систему модифікації реологічних властивостей вогнезахисної фарби, що обумовлює формування стабільної тиксотропної структури та нанесення шару товщиною не менше 2 мм за один прохід;
- встановлено, що модифікація інтумесцентного покриття сумішшю мінеральних волокон з різними температурами розкладання підвищує вогнезахисну ефективність покриття на 10-20 %. Доведено, що додавання суміші Larinus CF50 та Larinus MS605 у водно-дисперсійну фарбу реактивного типу дозволяє застосовувати інтумесцентне покриття для сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі.

Набули подальшого розвитку науково-теоретичні узагальнення щодо механізмів підвищення вогнезахисних та експлуатаційних властивостей реактивних покриттів шляхом введення наноглин, мінеральних волокон з різною термостійкістю та застосування комбінованих систем модифікації реології інтумесцентних композицій для тривалого зберігання, ресурсо- та енергоощадного виробництва та технологічного нанесення.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні та впровадженні у виробництво технології полімерного вогнезахисного покриття реактивного типу з поліпшеними реологічними властивостями, яке забезпечує вогнестійкість сталевих конструкцій не менше 150 хвилин та має прогнозований термін експлуатації до 25 років. Розроблене покриття характеризується високими показниками вогнезахисної ефективності та реологічних властивостей порівняно з наявними вітчизняними рішеннями і може бути застосоване на об'єктах критичної інфраструктури, а також в оборонному та стратегічному секторах, де існує ймовірність виникнення пожеж за вуглеводневими сценаріями. Технологія впроваджена у виробництво

на підприємстві ТОВ «Ковлар Груп», де виготовлена дослідна партія продукту.

У роботі запропоновано алгоритм контролю реологічних характеристик інтумесцентної фарби, що забезпечує її нанесення мокрим шаром 1,0–2,5 мм на металеві поверхні з отриманням заданих функціональних властивостей відповідно до необхідного класу вогнестійкості. Також розроблено алгоритм лабораторного прогнозування вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів, який дозволяє прискорити процес розроблення протипожежних засобів і зменшити витрати на повномасштабні випробування.

Теоретичні дослідження та методики з модифікації реологічних властивостей полімерних композицій естерами целюлози, наноглинами та гідрофобно модифікованими етоксильованими уретанами впроваджено в освітньо-науковий процес підготовки здобувачів спеціальності G1 «Хімічні технології та інженерія» за освітньо-професійними програмами «Інноваційна фармацевтика» та «Європейська косметика» на кафедрі промислової фармації КНУТД.

Методика дослідження вогнезахисних матеріалів за алгоритмом прогнозування ефективності інтумесцентного покриття апробована та впроваджена в лабораторії хімічних досліджень засобів вогнезахисту Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України.

Ключові слова: вогнезахисні покриття, вогнезахист, вогнезахист сталі, вогнестійкість, в'язкість вогнезахисних фарб, інтумесцентне покриття, інтумесцентна система, механічні властивості, нанокомпозит, полімерні дисперсії, полімерний композит, полімерні матеріали, реактивне покриття, реологічний профіль, термостійкість.

ABSTRACT

Vakhitov R.A. Development of a polymer-based reactive fire-retardant coating technology with enhanced rheological properties. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 161 Chemical Technologies and Engineering. – Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, 2026.

Modern research and development strategies in fire protection industry are aimed at increasing the fire resistance of building structures through the use of passive fire protection systems. Analytical studies demonstrate that polymer-based intumescent (reactive) coatings occupy the largest share of the global fire protection materials market. These coatings provide high fire-retardant efficiency and enable the implementation of complex architectural designs and innovative solutions in modern construction. Therefore, the primary focus of scientific and applied research should be on improving thermal stability and fire-retardant potential of intumescent systems and hybrid coatings. Equally relevant is enhancing technological, physical, and mechanical properties of reactive coatings in order to simplify application, reduce the cost of fire protection treatment, and extend their service life.

The object of this study is the regularities of formation of fire-retardant and rheological properties of intumescent polymer compositions.

The subject of the study is the technology of polymer fire-retardant coatings for steel structures with improved fire-retardant and rheological characteristics.

The aim of the dissertation is to develop a reactive intumescent fire-retardant coating technology with improved rheological properties capable of providing at least 150 min fire resistance class to steel structures.

To achieve this aim, a set of scientific and applied tasks was systematically addressed, including the development of reactive coating formulations by varying the polymer matrix and the ratio of intumescent system components, investigation of mechanisms and conditions of formation of thermally stable char with enhanced physical and mechanical properties, and optimization of the rheological

characteristics of the fire-retardant composition. As a result, a technology for manufacturing a reactive intumescent coating with optimized rheological properties was developed and implemented in production. The coating provides fire resistance class of at least 150 min, allows application of a wet coating thickness of at least 2 mm per single layer, and has a predicted service life of up to 25 years.

These results were achieved through investigation of the fire-retardant mechanism of the base intumescent composition consisting of ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol/polymer using a scientifically substantiated algorithm of laboratory methods developed to predict the fire-retardant efficiency of reactive coatings at the research and design stage. The reliability and validity of the proposed prediction algorithm were confirmed by full-scale fire tests according to state standards. This approach to preliminary determination of the fire resistance class provided by an intumescent composition significantly reduces the duration and cost of developing new materials.

Regularities and mechanisms of the influence of vinyl acetate and styrene-acrylate copolymer structures on the fire-retardant efficiency of intumescent systems based on ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol were determined. Based on full-scale fire tests according to DSTU B V.1.1-14:2007, it was established that the polymers present in the coatings (vinyl acetate, styrene-acrylate, and vinyl chloride copolymers) significantly affect the efficiency of intumescent fire protection. The results demonstrated that the investigated polymers can be divided into three groups differing in thermal degradation mechanisms, physicochemical transformations under fire conditions, and the physical, mechanical, and thermal insulation properties of the resulting chars.

Non-halogenated vinyl acetate copolymers were characterized by a prolonged stabilization plateau of the expansion factor (300–600 °C), formation of a strong and homogeneous protective char with strong physical and mechanical properties, and the highest fire resistance values (R 59–62 min).

Halogenated vinyl acetate polymers exhibited shortened stabilization and excessive expansion in the temperature range of 350–500 °C, resulting in premature destruction of the carbon framework and lower fire resistance values (R 44–52 min).

Styrene-acrylate polymers also demonstrated a short stabilization region (350–500 °C), flowing of the molten pre-char from the steel substrate, and moderate fire resistance values (R 32–48 min).

It was established that non-halogenated water-dispersed vinyl acetate copolymers are capable of providing a fire resistance class of steel structures exceeding 60 min. It was also proven that, for solvent-based styrene-acrylate systems, an effective approach is the combination of Newtonian and non-Newtonian polymers, which increases fire resistance up to 60 min. Halogen-containing polymers should be excluded from intumescent systems due to environmental safety considerations.

To increase the fire-retardant efficiency of reactive coatings containing ethylene-vinyl acetate as their polymer matrix, the optimal ratio of ammonium polyphosphate : melamine : pentaerythritol (3.6 : 1 : 1.8) was determined. This ratio ensures fire resistance class exceeding R120 and promotes formation of the most stable thermally insulating char with improved physical and mechanical properties.

An effective approach to improving the fire-retardant performance of reactive coatings is their modification with nanosized aluminosilicates and mixtures of mineral fibers with different decomposition temperatures. Such modification strengthens the thermally insulating char and increases fire resistance by 10–20 % due to the chemical formation of thermally stable polymer composites and nanocomposites, as well as physical reinforcement of the expanded char. It was found that the addition of Lapinus CF50 and Lapinus MS605 mineral fibers into water-dispersed intumescent coatings enables the use of such systems under severe hydrocarbon fire conditions.

For the first time, mathematical modeling was applied to determine rheological control parameters of reactive fire-retardant coatings materials, namely yield stress (τ_0 , Pa) and high-shear viscosity (η_∞ , Pa·s), using the Casson equation. This made it possible to develop a simple and effective method for viscosity control

during production. Determination of τ_0 and η_∞ during formulation preparation ensures production of a rheologically optimized fire-retardant coating capable of being applied to steel structures with a wet film thickness from 1.0 to 2.5 mm in a single pass.

Analysis of rheological properties of commercial fire-retardant coatings and a large set of experimental intumescent formulations showed that the following rheological parameters are required to obtain a defect-free wet coating layer with a thickness of at least 2 mm: $\eta_0 \approx 200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\tau_0 \geq 300 \text{ Pa}$, and $\eta_\infty \geq 3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

A systematic study of the influence of non-associative thickeners (hydrophobically modified cellulose ethers (HEMC), nanoclays) and associative thickeners (hydrophobically modified ethoxylated urethanes (HEUR) and alkali-swellaible emulsions (HASE)) on the rheological profile of intumescent coatings was carried out. It was established that conventional approaches based on the use of individual thickeners allow application of wet coating layers no thicker than 1 mm per pass.

It was experimentally substantiated that cellulose ethers provide high storage stability of intumescent coatings but limit the coating thickness to 0.5 mm. Analysis of rheological profiles of numerous formulations demonstrated the effectiveness of a combined approach to rheology modification. It was shown that only multicomponent systems containing cellulose ethers, nanoclays, and hydrophobically modified polyurethanes form a stable thixotropic structure. The most effective combination was HEMC + nanoclays + HEUR at a total concentration of 2 %, which enables application of wet layers with a thickness of at least 2 mm in a single layer without defects.

Based on the obtained scientific and practical results, a technological scheme for industrial-scale production of intumescent coatings with enhanced fire-protective and rheological properties was developed. The technology was implemented in production, and a pilot batch of 500 kg was manufactured. Application tests at a construction site confirmed that the developed water-dispersed coating can be applied with a wet coating layer thickness of at least 2.1 mm without defects such as sagging, flowing, or cracking. Increasing the coating thickness beyond the conventionally

recommended 0.7–1.2 mm for similar coatings almost halves the cost of fire protection treatment.

The dissertation scientifically substantiates and develops a technology of reactive intumescent coatings with improved rheological properties that provide at least a 150 min fire resistance class to steel structure and has a predicted service life of up to 25 years. At the same time, for the first time:

- the applicability of the Casson model for determining the limiting rheological criteria of processability for intumescent water-dispersed coatings has been experimentally substantiated, enabling production control of coating properties without the use of sophisticated rheometric equipment;
- a correlation between the main rheological parameters of intumescent coatings (η_0 , τ_0 , η_∞) and the technologically acceptable wet film thickness ensuring defect-free coating formation has been established;
- a combined rheology-modification system for fire-protective coatings has been proposed, providing the formation of a stable thixotropic structure and enabling the application of a coating layer with a thickness of at least 2 mm in a single pass;
- it was found that modification of intumescent coating with a mixture of mineral fibers with different decomposition temperatures increases the fire-retardant efficiency of the coating by 10-20%. It was proven that adding a mixture of Lapinus CF50 and Lapinus MS605 to a water-dispersion reactive paint allows the use of intumescent coating for steel structures in hydrocarbon fire conditions.

Scientific and theoretical generalizations concerning the mechanisms for improving the fire-protective and performance properties of reactive coatings through the incorporation of nanoclays, mineral fibers with different thermal stability, and the application of combined rheology-modification systems for intumescent compositions intended for long-term storage, resource- and energy-efficient production, and technologically effective application have been further developed.

The practical significance of the obtained results lies in the development and industrial implementation of a reactive-type polymer fire-protective coating technology with improved rheological properties, providing fire resistance of steel

structures for not less than 150 minutes and having a predicted service life of up to 25 years. In terms of fire-protective efficiency and rheological properties, the developed intumescent coating surpasses domestic analogues and can be applied at critical infrastructure facilities, as well as in the defense and strategic sectors where there is a risk of fires developing according to hydrocarbon fire scenarios. The coating has been implemented in production at Kovlar Group, where a pilot batch of the product was manufactured.

The work proposes an algorithm for controlling the rheological characteristics of intumescent paint, which ensures its application in a wet layer of 1.0–2.5 mm on metal surfaces with the obtaining of specified functional properties in accordance with the required fire resistance class. An algorithm for laboratory prediction of the fire-protective efficiency of intumescent coatings has also been developed, which allows to accelerate the process of developing fire-fighting products and reduce the costs of full-scale testing.

The developed methodology and theoretical studies concerning the modification of rheological properties of polymer compositions using cellulose ethers, nanoclays, and hydrophobically modified ethoxylated urethanes have been introduced into the educational and scientific training process for specialists in specialty G1 Chemical Technologies and Engineering within the educational programs «Innovative Pharmaceutics» «European Cosmeceutics» at the Department of Industrial Pharmacy of Kyiv National University of Technologies and Design and are used in the preparation of master's qualification theses.

The methodology for investigating fire-protective materials based on the algorithm for predicting the efficiency of intumescent coatings has been tested and implemented in the Laboratory of Chemical Research of Fire Protection Materials at the L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: *fire protection, fire protection coatings, fire protection of steel, fire resistance, intumescent coating, intumescent system, mechanical properties, nanocomposite, polymer composite, polymer dispersions, polymer materials, reactive coating, rheological profile, thermal stability, viscosity of fire-retardant paints.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Публікації у фахових виданнях України та Європи

Особистий внесок здобувача: [1, 2, 4, 5, 8–11] – планування та проведення експериментальних досліджень, [1–3, 6–8, 11] – аналіз експериментальних результатів, [3, 6, 7] – узагальнення отриманих результатів та підготовка статті до публікації.

1. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, Drizhd, V., Taran, N., & Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100544> (Наукометрична база даних Scopus).

2. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10 (14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729> (Наукометрична база даних Scopus).

3. Vakhitova, L., Drizhd, V., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, Taran, N., & Bessarabov, V. (2025). Modeling the rheology of commercial reactive fire-retardant coating materials for steel. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 6-11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334121> (Фахове видання категорії А, наукометрична база даних Scopus).

4. Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2023). Модифікація та армування епоксидних покриттів інтумесцентного типу. *Технології та інжиніринг*, 3(14), 77-88. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.8> (Фахове видання категорії Б).

5. Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Таран, Н. А., Вахітова, Л. М., & Бессарабов, В. І. (2022). Синтез та ідентифікація оксинітрату графіту. *Технології та інжиніринг*, 5(10), 67-79. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.7> (Фахове видання категорії Б).

6. Таран, Н. А., Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Раєнко, Г. Ф., Калафат, К. В., & Бессарабов, В. І. (2024). Розроблення засобів мобільного вогнезахисту – рулонних протипожежних матеріалів: огляд літератури. *Технології та інжиніринг*, 5(22), 123-146. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.12> (Фахове видання категорії Б).

7. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Вибір полімерів для застосування в промислових вогнезахисних реактивних покриттях. *Технології та інжиніринг*, 2(19), 106-116. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.10> (Фахове видання категорії Б).

8. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., Раєнко, Г. Ф., Шологон, В. І., Короткіх, М. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Етери целюлози як модифікатори реології вогнезахисних фарб реактивного типу. *Технології та інжиніринг*, 3(20), 98-109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.8> (Фахове видання категорії Б).

9. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Раєнко, Г. Ф., Шологон, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Дослідження вогнестійкості покриття реактивного типу в умовах вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(12), 59-68. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-12-59-68> (Фахове видання категорії Б).

10. Таран, Н. А., Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, & Калафат, К. В. (2025). Вплив графітових наповнювачів на ефективність інтумесцентних вогнезахисних покриттів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 351(3.1), 473-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-60> (Фахове видання категорії Б).

11. **Вахітов, Р. А.**, Шологон, В. І., Таран, Н. А., Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2025). Дослідження вогнезахисних властивостей інтумесцентних рулонних покриттів. *Український журнал природничих наук*, 12, 111-121. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.10> (Фахове видання категорії Б).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Особистий внесок здобувача: [1, 3, 5–7, 10, 11] – інформаційний пошук, [1–4, 6–12] – планування та проведення експериментальних досліджень, [1–5, 4, 9] – узагальнення отриманих результатів та підготовка статті або тез доповіді до публікації.

1. Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2022). Наносполуки для підвищення вогнезахисної ефективності епоксидних інтумесцентних систем. *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво: збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції, м. Шостка. (23 – 25 листопада 2022)*. Суми: Сумський державний університет, 2022, 117-121. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/90175>.

2. Drizhd, V., & **Vakhitov, R.** (2023). Neutralization of the simulants of vesicant/blister chemical agents in the presence of montmorillonite. 66th International conference for students of Physics and Natural sciences. *Open Readings 2023: 66th International conference for students of Physics and Natural sciences. (18 – 21 april 2023)*. Vilnius: Vilnius University, 2023, 148. <https://openreadings.eu/wp-content/uploads/2023/abstract-2023.pdf>

3. **Vakhitov, R.**, Kalafat, K., Vakhitova, L., Taran, N., & Bessarabov, V. (2023). Rheology of polymeric fire reactive coatings for steel structures. *Trends, theories and ways of improving science: the 8th International scientific and practical conference. (28 february – 03 march 2023)*. Madrid, Spain: International Science Group. 2023, 72-74. <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.8>

4. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2023). Наноглини як модифікатори реології реактивних вогнезахисних систем. *Chemical and biopharmaceutical technologies: collection of scientific papers. V. Bessarabov, V. Lubenets. (Eds.)*. Tallinn: Nordic Sci Publisher, Tallinn. Nordic Sci Publisher. 2023, 275-276. <https://www.kyivlvivpharma.com/abstract23>

5. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., & Шологон, В. І. (2023). Вплив нітрат оксиду графіту на ефективність вогнезахисних епоксидних фарб.

Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи: матеріали VII Всеукраїнської наукової конференції (19 квітня 2023 р.). Житомир, 2023, 44. https://eprints.zu.edu.ua/38093/1/azh_2023.pdf

6. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Вахітова, Л. М., & Бессарабов, В. І. (2024). Оптимальні реологічні характеристики реактивних вогнезахисних фарб. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2024)*: збірник тез доповідей VII Міжнародної (XVII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених. (19–21 березня 2024 року). м. Вінниця, 124. https://drive.google.com/file/d/1iW5iddTMOOr0yM42_5cnbdccrrq6uSrwu/view

7. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, Taran, N., & Bessarabov, V. (2024). The influence of the ratio of main components in intumescent fire-retardant coating. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2024)*: збірник тез доповідей VII Міжнародної (XVII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і молодих учених, (19–21 березня 2024 року). м. Вінниця, 125. https://drive.google.com/file/d/1iW5iddTMOOr0yM42_5cnbdccrrq6uSrwu/view

8. **Вахітов, Р. А.**, & Калафат, К. В. (2024). Вогнестійкість покриття реактивного типу в умовах вуглеводневої пожежі. *Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів ТАСХ-2024*: матеріали III Міжнародної наукової конференції. (20 травня 2024 року). м. Дніпро: «Середняк Т.К.». 80. https://drive.google.com/file/d/1zh9cwX4B138DEdauJRX54_QzL3mQDU1R/view

9. **Вахітов, Р. А.**, & Калафат, К. В. (2024). Вплив етерів целюлози на реологію вогнезахисних фарб реактивного типу. *Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи*: збірник матеріалів VIII Всеукраїнської наукової конференції. (1 травня 2024 р.). Житомир: Житомирський державний університет імені Івана Франка, 191. <https://eprints.zu.edu.ua/39902/1/AZH2024.pdf>

10. **Vakhitov, R. A.**, Sholohon, V. I., Taran, N. A., & Kalafat, K. V. (2025). Influence of graphite additives on the swelling of reactive type fire protection coatings. *Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2025)*: збірник тез доповідей VIII Міжнародної (XVIII Української) наукової конференції студентів, аспірантів і

молодих учених. (25–27 березня 2025 року). м. Вінниця, 95.
<https://sites.google.com/donnu.edu.ua/hps-2025>

11. **Vakhitov, R. A.**, Sholohon, V. I., Taran N. A., Kalafat, K. V., & Bessarabov, V. I. (2025). Modification of fire protection paints with nanographites. *Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи*: збірник матеріалів X Всеукраїнської наукової конференції. (9 квітня 2025 року). Житомир: ЖДУ імені Івана Франка. 252. <https://eprints.zu.edu.ua/43582/1/1.pdf>

12. **Vakhitov, R. A.**, Sholohon, V. I., Kalafat K. V., & Taran, N. A. (2025). Testing the fire protection efficiency of reactive roll coatings. *Львівські хімічні читання – 2025*: збірник наукових праць XX Наукової конференції. (2 – 4 червня 2025 року). Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 275.
https://drive.google.com/file/d/173NN9ppUWrwiaeVh_JgJTKzbBEHwgQUY/view

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

Особистий внесок здобувача: [1, 4, 6] – інформаційний пошук, аналіз літературних даних, [2, 3, 5] – планування та проведення експериментальних досліджень, [2–5] – узагальнення отриманих результатів та підготовка статті до публікації.

1. **Vakhitov, R.**, Drizhd, V., Vakhitova, L., Bessarabov, V., Strashnyi, V. (2022). Rheological parameters of polymer fire-retardant coatings with R120-R150 fire resistance rate. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities*: multi-authored monograph. Levytskyi, V., Plavan, V., Skorokhoda, V. Khomenko, V. (Eds.). Lviv: Lviv Polytechnic National University, 215-217.

https://drive.google.com/file/d/1nwPbZ_aibdKeKd_XAeBxz261QAeiR1MZ/view?usp=drive_link

2. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Вогнезахисні реактивні покриття для фармацевтичних підприємств. *Chemical and biopharmaceutical technologies*:

collection of scientific papers. V. Bessarabov, V. Lubenets. (Eds). Tallinn: Nordic Sci Publisher. 280-289. <https://www.kyivlvivpharma.com/abstract23>

3. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, & Drizhd, V. (2024). Fire-retardant epoxy composition modified with nano-clays. *American Journal of Engineering Research*, 13(8), 41-46. <https://www.ajer.org/papers/Vol-13-issue-8/13084146.pdf>

4. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Реологія полімерних вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання: колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції (18 жовтня 2023 року)*. м. Київ. Плаван, В., Касич, А., & Бутенко, О. (Ред.), Київ: КНУТД, 135-144. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26253>

5. **Vakhitov, R.**, Taran, N., Drizhd, V., Kalafat, K., Korotkikh, M., & Vakhitova, L. (2025). Reactive fire-retardant nanocoatings for steel structures. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10(6), 396-411. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25jun234>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	25
ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ РЕАКТИВНОГО ТИПУ	35
1.1 Склад та механізми дії інтумесцентної системи	38
1.1.1 Основні компоненти полімерного покриття реактивного типу	38
1.1.2 Хімічний механізм інтумесцентного вогнезахисту	42
1.1.3 Фізичні закономірності утворення коксового шару	47
1.2 Функціональне призначення полімерного сполучного у реактивних вогнезахисних покриттях	52
1.2.1 Полімерні інтумесцентні фарби	52
1.2.2 Полімер як компонент інтумесцентної вогнезахисної системи	54
1.2.3 Вплив полімеру на побудову коксового шару	58
1.3 Експлуатаційні властивості вогнезахисних інтумесцентних покриттів	62
1.3.1 Удосконалення реології вогнезахисних фарб	62
1.3.2 Довговічність покриттів реактивного типу	66
Висновки до розділу 1	71
РОЗДІЛ 2 ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ, ЗАСТОСОВАНИХ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ	73
2.1 Матеріали та обладнання, використані при проведенні експериментальних досліджень	73
2.1.1 Реактиви та матеріали	73

2.1.2 Обладнання та прилади	78
2.2 Приготування полімерних інтумесцентних композицій IFR	79
2.2.1 Приготування інтумесцентних композицій з водними дисперсіями полімерів	79
2.2.2 Приготування інтумесцентних композицій з органорозчинними полімерами	80
2.3 Визначення в'язкості інтумесцентних фарб за Брукфілдом	80
2.4 Визначення седиментації твердих компонентів	81
2.5 Визначення провисання фарби після нанесення	82
2.6 Визначення об'ємного коефіцієнта спучення	83
2.7 Визначення вогнезахисної ефективності покриттів	84
2.7.1 Вогневі випробування за методом «пальника Бунзена»	85
2.7.2 Вогневі випробування у міні-печі	86
2.8 Математична обробка результатів	87
Висновки до розділу 2	88
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ РЕАКТИВНОГО ТИПУ З ПІДВИЩЕНОЮ ВОГНЕЗАХИСНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ	89
3.1 Алгоритм випробувань вогнезахисної ефективності при розробці рецептури покриття	89
3.2 Вплив полімеру на вогнезахисну ефективність покриття	93
3.3 Оптимізація рецептури інтумесцентної системи з високими показниками вогнестійкості	100
3.3.1 Співвідношення основних компонентів інтумесцентної системи	100
3.3.2 Армування коксового шару	102
Висновки до розділу 3	106
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНОГО ПРОФІЛЮ ВОГНЕЗАХИСНИХ ФАРБ ІНТУМЕСЦЕНТНОГО ТИПУ	108

4.1 Реологія комерційних вогнезахисних фарб для сталевих конструкцій	109
4.1.1 Визначення параметрів реології за рівнянням Кассона	109
4.1.2 Практичні рекомендації з оптимальної реології вогнезахисних фарб	114
4.2 Етери целюлози як загущувачі фарб реактивного типу	116
4.3 Модифікація вогнезахисних інтумесцентних композицій наноглинами	125
4.3.1 Залежність динамічної в'язкості вогнезахисних фарб від природи наноглини	125
4.3.2 Розрахунки параметрів реології інтумесцентних фарб	131
4.3.3 Експериментальні дослідження з перевірки реологічної поведінки інтумесцентних систем	134
4.3.4 Вплив наноглин на вогнезахисну ефективність IFR	137
4.4 Вплив гідрофобно модифікованих етоксильованих уретанів на в'язкість полімерних сполучних та інтумесцентних фарб	142
4.4.1 Реологічні профілі вогнезахисних фарб у присутності HEUR сполук	142
4.4.2 Розрахунки за рівнянням Кассона	147
4.4.3 Тиксотропні ефекти, седиментація та провисання	149
4.5 Комбінування модифікаторів реології у вогнезахисних фарбах	156
4.5.1 Реологічні характеристики у присутності суміші загущувачів	156
4.5.2 Експлуатаційні властивості та вогнестійкість	159
4.6 Рекомендації щодо реологічних показників фарб реактивного типу для виробників засобів пасивного вогнезахисту	163
Висновки до розділу 4	165

РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОЛІМЕРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ	167
5.1 Дослідження основних характеристик вогнезахисного покриття, що розробляється	167
5.2 Технологічна схема виробництва	170
5.3. Визначення вогнезахисних та експлуатаційних характеристик полімерного інтумесцентного покриття IFR-S	174
5.3.1 Випробування вогнезахисної ефективності	174
5.3.2 Нанесення вогнезахисної фарби IFR-S на сталеві конструкції	176
5.3.3 Термін експлуатації вогнезахисного покриття	178
5.3.4 Практичні застосування результатів дослідження	179
Висновки до розділу 5	183
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	186
Додаток А Список публікацій здобувача	216
Додаток Б Акт впровадження результатів дисертаційного роботи на виробництві ТОВ «Ковлар Груп»	219
Додаток В Звіт з оцінки вогнезахисної ефективності	220
Додаток Г Акт випробувань з нанесення вогнезахисної фарби IFR-S	232
Додаток Д Звіт з досліджень стійкості до зовнішніх впливів	235
Додаток Є Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження в дослідження ІнФОВ НАН України	240
Додаток Ж Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження в освітньо-науковому процесі кафедри промислової фармації КНУТД	241

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AC4	Співполімер стирол-акрилату Pliolite AC4
AC80	Співполімер стирол-акрилату Pliolite AC80
AMA	Співполімер акрил-метакрилату
APP	Поліфосфат амонію
ATH	Тригідрат алюмінію
ASE	Лугорозчинна емульсія
CF50	Волокно Larpinus CF50
DA 101	Співполімер вінілацетат-етилену Dairen DA 101
EG	Графіт, що терморозширюється
EVA	Співполімер етилен-вінілацетату
EZ 3010	Співполімер вінілацетат-етилену Vinnapas® EZ 3010
EZ 3112	Співполімер вінілацетат-етилен-вінілверсатату Vinnapas® EZ 3112
HASE	Гідрофобно модифікована лугорозчинна емульсія
HES	Гідроксиетилцелюлоза
HEMC	Гідроксіетилметил целюлоза
HEUR	Гідрофобно модифікований етоксильований уретан
HMHEC	Гідрофобно модифікований етоксильований етер целюлози
HMPE	Гідрофобно модифікований поліетиленоксид
HPMC	Гідроксипропілметил целюлоза
IFR	Інтумесцентна вогнезахисна система
LDH	Шаруваті подвійні гідроксиди
LOI	Граничний кисневий індекс
MA	Меламін
MS605	Волокно Larpinus MS605
PA6	Поліамид 6
PE	Пентаеритрит

pHRR	Швидкість тепловиділення
pVA	Полівінілацетат
pMMA	Поліметилметакрилат
R	Клас вогнестійкості сталевих конструкцій
R255	Загущувач Rheolate 255
R278	Загущувач Rheolate 278
R600	Загущувач Rheobuk H 600 VF
TGA	Термогравіметричний аналіз
V2209	Співполімер вінілацетат-етилен-вінілверсатату Exodisp V2209
VAGH	Співполімер вінілхлорид-вінілацетат-вінілового спирту
VAVV	Співполімер вінілацетат-вінілверсатату
VTAC	Співполімер вініл-толуолакрилату
HV 80	Загущувач Rheobuk HV 80
SEM	Скануюча електронна мікроскопія
SbA	Співполімер стирол-бутилакрилату

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Пожежі становлять серйозну загрозу для здоров'я та життя людей, а також спричиняють значні матеріальні збитки й негативні екологічні наслідки. Забезпечення пожежної безпеки будівель та інфраструктури відповідно до національних стандартів є пріоритетним завданням сучасного будівництва. Особливо це актуально для України, де питання протипожежного захисту набуває великого значення у контексті забезпечення безпеки стратегічних об'єктів та критичної інфраструктури, а також у процесі відновлення будівель і споруд, пошкоджених внаслідок військових дій.

Сучасні стратегії вдосконалення протипожежного захисту зосереджені на підвищенні класу вогнестійкості будівельних конструкцій шляхом використання пасивних вогнезахисних засобів. Лакофарбові, штукатурні та конструктивні матеріали, які підвищують несучу, теплоізолюючу здатність та цілісність конструкцій під час пожежі, стають дедалі популярнішими. Згідно з аналітичними дослідженнями, найбільшу частку на ринку вогнезахисних матеріалів займають полімерні інтумесцентні покриття, які забезпечують високу вогнезахисну ефективність та дозволяють втілювати у сучасне будівництво витончені архітектурні форми та дизайнерські рішення.

Проте, незважаючи на значні успіхи, досягнуті в технологіях інтумесцентного вогнезахисту за останні 50 років, існують певні проблеми, що обмежують їх використання. Серед них: висока вартість, необхідність нанесення від 2 до 10 шарів для досягнення регламентованої товщини, а також токсичність продуктів горіння через наявність галогеновмісних компонентів і сполук бору. Крім того, існує проблема забезпечення класу вогнестійкості R150 та більше для сталевих колон, що зазвичай використовуються у будівлях I ступеню вогнестійкості.

У відповідь на зростаючі нормативні вимоги до вогнестійкості несучих конструкцій, за останні десять років вогнезахисна ефективність

інтумесцентних покриттів значно зростає. Клас вогнестійкості (R) підвищився з R90 до R300 хвилин, при цьому товщина покриття на сталевих конструкціях збільшилась з 2–3 мм (для R90) до 10–15 мм (для R180–300). Це суттєво підвищує вартість робіт з вогнезахисної обробки, оскільки кількість шарів, необхідних для досягнення рекомендованої товщини покриття, значно зростає. Зменшення числа нанесених шарів можливо досягнути шляхом удосконалення реологічних властивостей фарби, що дозволить наносити її товстими шарами, перевищуючи рекомендовані виробниками 0,7–1,2 мм.

Огляд сучасних досліджень у галузі пасивного вогнезахисту дозволив сформулювати основний напрямок – створення інтумесцентного покриття реактивного типу з підвищеною вогнезахисною ефективністю та вдосконаленими реологічними властивостями. Такий підхід є актуальним для розробки конкурентоспроможних вітчизняних інтумесцентних покриттів, що сприятиме мінімізації фінансових навантажень під час будівництва. Розроблення регламентованих вогнезахисних засобів є одним із пріоритетних завдань у сфері пожежної безпеки будівель і споруд, оскільки витрати на усунення наслідків пожеж значно перевищують витрати на їх профілактику.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконана у відповідності з планами науково-дослідних тем №39/24 «Створення волокнистих композиційних матеріалів на основі природних полімерів та дослідження їх властивостей» Київського національного університету технологій та дизайну; НДР III-04-24 «Розробка хімічних рішень з удосконалення реологічних властивостей засобів вогнезахисту» ІнФОВ НАН України (№ держреєстрації 0124U000208); НДР II-01-23 «Розроблення засобів хімічної та пожежної безпеки об'єктів оборонного призначення» ІнФОВ НАН України (№ держреєстрації: 0123U100783); III-04-26 «Розроблення нових засобів вогнезахисту на основі органо-неорганічних композитів» ІнФОВ НАН України (№ держреєстрації: 0125U004338).

Мета та завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розроблення технології вогнезахисного інтумесцентного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій не менше 150 хв.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

- розробити алгоритм лабораторних досліджень для прогнозування вогнезахисних властивостей покриття реактивного типу;
- встановити вплив структури водно-дисперсійних та органорозчинних полімерів у складі вогнезахисного покриття на клас вогнестійкості сталевих конструкцій;
- оптимізувати співвідношення основних компонентів інтумесцентної системи (поліфосфат амонію, меламін, пентаеритрит) для досягнення межі вогнестійкості сталевих конструкцій R150;
- дослідити вплив армування наноглинами та мінеральними волокнами на фізико-механічні властивості коксового шару;
- обґрунтувати систему контрольованої реологічної модифікації полімерних інтумесцентних фарб з метою підвищення товщини мокрого шару, який може бути нанесений за один прохід;
- розробити та впровадити у виробництво технологію вогнезахисного інтумесцентного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями з підтвердженням межі вогнестійкості R150 хв та терміну експлуатації до 25 років.

Об'єкт дослідження – процеси формування вогнезахисних та реологічних властивостей інтумесцентних засобів вогнезахисту.

Предмет дослідження – технологія полімерного інтумесцентного покриття для сталевих конструкцій з вдосконаленими вогнезахисними та реологічними характеристиками.

Методи дослідження. Дослідження фізико-хімічних характеристик, ідентифікацію складу композицій та продуктів термолізу здійснювали за

допомогою методів інфрачервоної спектроскопії з Фур'є перетворенням, рентгеноструктурного аналізу та скануючої електронної мікроскопії. Вивчення реологічних властивостей полімерних композицій здійснювали на ротаційному реометрі Brookfield DV-III. Вогневі випробування інтумесцентних покриттів для будівельних конструкцій проводили згідно з ДСТУ Б В.1.1-14:2007, ДСТУ EN 1363-1:2023, ДСТУ EN 16623:2015 та ДСТУ EN 60332-3-21:2013. Термін та умови експлуатації інтумесцентних покриттів визначали за ДСТУ EN 16623:2015.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертаційній роботі науково обґрунтовано та розроблено технологію інтумесцентного покриття реактивного типу з поліпшеними реологічними властивостями, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій не менше 150 хв та має прогнозований термін експлуатації до 25 років. При цьому вперше:

- експериментально обґрунтовано доцільність застосування моделі Кассона для визначення граничних реологічних критеріїв технологічності інтумесцентних водно-дисперсійних фарб, що забезпечує виробничий контроль їх властивостей без використання складних реометричних приладів;
- визначено кореляційну залежність між основними реологічними параметрами інтумесцентної фарби (η_0 , τ_0 , η_∞) та технологічно допустимою товщиною мокрого шару, що забезпечує бездефектне формування покриття;
- запропоновано комбіновану систему модифікації реології вогнезахисної фарби, що обумовлює формування стабільної тиксотропної структури та нанесення шару товщиною не менше 2 мм за один прохід;
- встановлено, що модифікація інтумесцентного покриття сумішшю мінеральних волокон з різними температурами розкладання підвищує вогнезахисну ефективність покриття на 10-20 %. Доведено, що додавання суміші Larinus CF50 та Larinus MS605 у водно-дисперсійну фарбу реактивного типу дозволяє застосовувати інтумесцентне покриття для сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі.

Набули подальшого розвитку науково-теоретичні узагальнення щодо механізмів підвищення вогнезахисних та експлуатаційних властивостей реактивних покриттів шляхом введення наноглин, мінеральних волокон з різною термостійкістю та застосування комбінованих систем модифікації реології інтумесцентних композицій для тривалого зберігання, ресурсо- та енергоощадного виробництва і технологічного нанесення.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та впроваджено у виробництво технологію полімерного вогнезахисного інтумесцентного покриття реактивного типу з покращеними реологічними властивостями, яке забезпечує вогнестійкість сталевих конструкцій не менше 150 хвилин та має прогнозований термін експлуатації до 25 років. За показниками вогнезахисної ефективності та реологічними властивостями розроблене інтумесцентне покриття не поступається аналогам вітчизняного виробництва і після сертифікаційних випробувань може бути застосоване на об'єктах критичної інфраструктури, а також в оборонному та стратегічному секторах, де існує ймовірність виникнення пожеж за вуглеводневими сценаріями. Технологію впроваджено у виробництво на підприємстві ТОВ «Ковлар Груп», де виготовлена дослідна партія продукту (акт впровадження додається).

У роботі запропоновано алгоритм контролю реологічних характеристик інтумесцентної фарби, що забезпечує її нанесення мокрим шаром 1,0–2,5 мм на металеві поверхні з отриманням заданих функціональних властивостей відповідно до необхідного класу вогнестійкості. Також розроблено алгоритм лабораторного прогнозування вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів, який дозволяє прискорити процес розроблення протипожежних засобів і зменшити витрати на повномасштабні випробування.

Теоретичні дослідження та методики з модифікації реологічних властивостей полімерних композицій естерами целюлози, наноглинами та гідрофобно модифікованими етоксильованими уретанами впроваджено в освітньо-науковий процес підготовки здобувачів спеціальності G1 «Хімічні

технології та інженерія» за освітньо-професійними програмами «Інноваційна фармацевтика» та «Європейська косметика» на кафедрі промислової фармації КНУТД. Отримані науково-практичні напрацювання використовуються під час виконання магістерських кваліфікаційних робіт та в навчальному процесі (акт впровадження додається).

Методика дослідження вогнезахисних матеріалів за алгоритмом прогнозування ефективності інтумесцентного покриття апробована та впроваджена в лабораторії хімічних досліджень засобів вогнезахисту Інституту фізико-органічної хімії і вуглекімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України (акт впровадження додається).

У дисертаційній роботі також надано практичні рекомендації виробникам засобів пасивного вогнезахисту у вигляді простого та ефективного алгоритму контролю реології фарби. Це дозволяє виготовляти якісний продукт, який можна наносити на металеві поверхні з товщиною мокрого шару від 1,0 до 2,5 мм. Такий підхід забезпечує можливість виробництва інтумесцентної фарби з заданими реологічними властивостями відповідно до вимог щодо необхідної товщини покриття для досягнення певного класу вогнестійкості.

Нанесення розробленої фарби на металеві конструкції здійснюється з середньою товщиною мокрого шару ($2,14 \pm 0,18$) мм без виникнення провисань та інших дефектів (акт з вогнезахисної обробки додається). Збільшення товщини мокрого шару при нанесенні, що перевищує традиційно рекомендовані 0,7–1,2 мм, дозволяє суттєво скоротити витрати на вогнезахисну обробку.

Особистий внесок здобувача полягає у постановці мети та реалізації розробки нової технології інтумесцентного вогнезахисного покриття, а також у проведенні наукового пошуку та аналізі літературних даних за темою дисертації. Здобувач самостійно виконав серію експериментальних досліджень, які включали аналіз фізико-хімічних характеристик полімерного інтумесцентного покриття, реологічні вимірювання та вогневі випробування,

що підтвердили ефективність розробленого покриття. Крім того, здобувач провів детальний аналіз та математичну обробку отриманих результатів, брав активну участь у впровадженні розробленої технології покриття у виробничий процес, а також в організації натурних експериментів щодо нанесення вогнезахисних фарб на будівельних майданчиках.

Положення та результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, були отримані здобувачем особисто в межах виконання відповідних науково-технічних тем. Він також здійснив аналіз, інтерпретацію та теоретичне обґрунтування одержаних результатів. За участю здобувача підготовлено ряд наукових статей, які висвітлюють результати досліджень, а також тези доповідей на національних і міжнародних конференціях, що сприяло поширенню знань у галузі вогнезахисту. Внесок здобувача в обґрунтування положень, що виносяться на захист, є вирішальним.

Постановку наукових завдань, обговорення результатів, формулювання основних положень та висновків дисертаційної роботи було проведено спільно з науковим керівником. Особистий внесок здобувача у працях, опублікованих у співавторстві, наведено в розділі «Список публікацій здобувача». Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, з якими проводилися експериментальні дослідження, зазначені у спільних публікаціях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях різного рівня: VI Міжнародній науково-практичній конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво» (Шостка, 2022 р); IV International Conference «Advanced Polymer Materials and Technologies» (Kyiv, 2022); 66th International conference for students of physics and natural sciences «Open Readings 2023» (Vilnius, 2023); 8th International scientific and practical conference «Trends, theories and ways of improving science» (Madrid, 2023); VI Міжнародній науково-практичній конференції «KyivLvivPharma-2023», (Київ 2023); VII Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні задачі хімії: дослідження та

перспективи» (Житомир, 2023); VII Міжнародній (XVII Українська) науковій конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2024)» (Вінниця, 2024); III Міжнародній науковій конференції «Теоретичні та експериментальні аспекти сучасної хімії та матеріалів (ТАСХ-2024)» (Дніпро, 2024); VIII Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи» (Житомир, 2024); VIII Міжнародній (XVIII Українська) науковій конференції студентів, аспірантів і молодих учених «Хімічні проблеми сьогодення (ХПС-2025)» (Вінниця, 2025); X Всеукраїнській науковій конференції «Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи», (Житомир, 2025); XX Науковій конференції «Львівські хімічні читання – 2025», (Львів, 2025).

Публікації. Результати дослідження опубліковано у 28 наукових роботах, з них 2 – статті у закордонних журналах, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, 9 статей у наукових фахових виданнях України, у т. ч. 1 стаття у фаховому виданні України категорії А, що індексується у науково-метричній базі даних Scopus, 5 статей в інших виданнях, з яких – 1 стаття у зарубіжному виданні та 12 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (222 найменувань на 28 сторінках), 7 додатків (на 26 сторінках), містить 50 таблиць та 65 рисунків. Основний текст роботи викладено на 215 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 241 сторінка.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УДОСКОНАЛЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ РЕАКТИВНОГО ТИПУ

Використання сталевих і дерев'яних конструкцій у будівництві допускається лише за умови забезпечення ними встановленого рівня пожежної безпеки та відповідності вимогам щодо захисту життя і здоров'я людей, а також особового складу пожежно-рятувальних підрозділів у випадку пожежі [1, 2]. Одним із найбільш ефективних підходів до підвищення вогнестійкості будівельних елементів є застосування засобів пасивного вогнезахисту, які сприяють збереженню несучої здатності та конструктивної цілісності в умовах високотемпературного впливу [3, 4]. У сучасній науковій і технічній літературі значна увага приділяється різним типам пасивних вогнезахисних матеріалів і покриттів, серед яких цементні та гіпсові штукатурні системи [5, 6], композитні панелі, плити й волокнисті теплоізоляційні матеріали [7], а також інтумесцентні (реактивного типу) покриття [8–11].

Інтумесцентні покриття для сталевих конструкцій є найбільш розповсюдженими засобами пасивного вогнезахисту будівельних конструкцій у світовій практиці пожежної безпеки [12, 13]. За даними аналітики світового ринку з 2020 по 2027 роки для інтумесцентних покриттів очікується річний темп зростання на 5,2% [14]. Така ситуація пояснюється, перш за все, тим, що саме тонкошарові покриття реактивного типу дозволяють втілити архітектурні форми та дизайнерські проекти, які реалізуються завдяки конструктивним та естетичним перевагам сталевих конструкцій [14, 15].

Інтумесцентні вогнезахисні системи (IFR) є найбільш вивченими в науковому плані, як у частині механізмів реакцій між основними компонентами, так і у плані допоміжних реагентів, що збільшують протипожежну ефективність. Основними історичними досягненнями хімії інтумесцентного вогнезахисту слід вважати прототип рецептури покриттів, що спучуються, вперше запропонований два століття тому Gay-Lussac [16],

перший патент Tramm із співавт. [17] від 1938 р. та найбільш повну збірку робіт з інтумесцентної тематики в огляді Vandersall [18], який було опубліковано у 1971 р.

За останні 50 років вивчення хімії та фізики IFR накопичено значний за обсягом та асортиментом об'єктів досліджень експериментальний матеріал, який дозволяє вибудовувати теоретичні основи інтумесцентного вогнезахисту. Слід зазначити основоположні праці з вивчення механізмів хімічних взаємодій між компонентами IFR в умовах високих температур авторських колективів Camino [19], Bourbigot [20], Jimenez [21]. Фундаментальні принципи зі створення ефективних інтумесцентних полімерних композицій, забезпечення їх термостійкості та регулювання цільових теплових перетворень викладено в оглядах літератури [8–11, 22, 23].

Загальною тенденцією наукової літератури останніх років з питань оптимізації реактивного вогнезахисту є досконале вивчення механізмів перетворення інтумесцентної системи в умовах пожежі чи дії високих температур [24, 25], пошук дизайнерських хімічних рішень із залученням унікальних компонентів IFR [26–28], розробка методик інтелектуального моделювання для прогнозування вогнезахисної ефективності [29, 30]. Як способи підвищення вогнестійких властивостей IFR, що рекомендуються сучасною науковою літературою, слід виділити наступні: використання комплексних сполук – продуктів конденсації фосфорних чи фосфонієвих речовин з похідними меламіну та пентаеритриту [31, 32]; попередня модифікація компонентів IFR полімерами чи органічними антипіренами [33, 34]; застосування у складах IFR висушених композитних гідрогелів [35], нанокompозитів [36], природних матеріалів [37], безгалогенних органічних антипіренів [38] тощо. Відносно новими ідеями удосконалення інтумесцентного вогнезахисту є концепція керамізації спученого вуглецевого шару [39], а також застосування у покритті полімерних антипіренів, органічних та неорганічних композитів [40, 41]. Зазначені ідеї та результати наукових пошуків можуть бути застосовані в прикладних технологіях

інтумесцентних фарб, але більшість запропонованих рішень не є бюджетними чи простими щодо технологічних втілень.

Сучасні тенденції розвитку промислових засобів вогнезахисту реактивного типу дозволяють сформулювати основні вимоги до якості фарб та покриттів інтумесцентного типу, які представлені на рис. 1.1 [42].



Рисунок 1.1 – Вимоги до вогнезахисних фарб та покриттів інтумесцентного типу [42]

Як основні сучасні напрямки розробки та удосконалення полімерних інтумесцентних покриттів, що можуть промислово вироблятися, слід визначити:

- підвищення ефективності для забезпечення межі вогнестійкості сталевих конструкцій 150–180 хв із мінімізацією товщини та вартості вогнезахисного засобу [42, 43];

- підбір полімерної матриці інтумесцентної композиції, яка є реактивною в процесі побудови коксового шару, та сприяє підвищенню строку служби [8, 9, 44–46];
- поліпшення технологічності нанесення за рахунок удосконалення реологічних властивостей вогнезахисної фарби [43, 47];
- підвищення екологічних характеристик інтумесцентної композиції та покриття шляхом переважного застосування водно-дисперсійних засобів з виключенням із складу галогенових антипіренів та інших токсичних компонентів відповідно до вимог регламенту REACH [8–10, 28, 48].

У цьому розділі дисертаційної роботи здійснено узагальнення щодо складу традиційних інтумесцентних систем з розглядом впливу полімерної складової на вогнезахисну ефективність та експлуатаційні властивості покриттів реактивного типу.

1.1 Склад та механізми дії інтумесцентної системи

1.1.1 Основні компоненти полімерного покриття реактивного типу

Вогнезахисна функція інтумесцентного полімерного покриття в умовах пожежі полягає в утворенні теплоізолюючого коксового шару, який є результатом хімічних взаємодій між компонентами IFR [8, 10, 49–51]. Вперше поділ компонентів інтумесцентного покриття на 4 групи згідно з безпосереднім призначенням в IFR було здійснено в роботах Vandersall [18] та Кау [51] зі співавт.: неорганічна кислота або речовина, що утворює кислоту при нагріванні до температури 100–250 °С; вуглецева багатоатомна сполука; органічний амін або амід; органічний галогеновий компонент.

В сучасних публікаціях ця класифікація є дещо зміненою [15, 42, 49], а основні складові IFR мають усталені назви: донор кислоти – зазвичай це сіль нелетучої неорганічної кислоти, наприклад, борної, сірчаної або фосфорної кислот; карбонізуючий агент – вуглецева сполука з великою кількістю

гідроксилів, яка зневоднюється під час реакцій етерифікації та карбонізації; газоутворювач – компонент, який під впливом тепла виділяє велику кількість негорючих речовин – газів, що утворюють піну з карбонізованого матеріалу на підкладці.

Ці три компоненти є основою хімічних перетворень в інтумесцентному покритті, що призводять до утворення спіненого теплоізоляційного коксу [24, 52, 53]. Інтумесцентне покриття для вогнезахисту будівельних конструкцій представляє собою термічно реакційноздатний матеріал, що складається з комбінації обов'язкових компонентів для інтумесценції (тріада – кислота/поліол/амін), органічних та неорганічних сполук (для корегування вогнезахисних та експлуатаційних властивостей вогнестійкого покриття), пов'язаних у полімерній матриці (табл. 1.1) [54, 55]. Полімер у складі IFR слід розглядати, як четвертий необхідний компонент інтумесцентного реакційного середовища, який відіграє іноді критичну роль у значеннях вогнезахисної ефективності трійної системи донор кислоти/карбонізуючий агент/газоутворювач [15, 42].

Відомо [56–58], що випадковий вибір складових IFR, які наведені у табл. 1.1, не забезпечує побудову міцного коксового шару з очікуваним вогнезахисним ефектом. Лише при певному підборі як хімічних структур, так і співвідношення активних речовин інтумесцентного покриття можливо забезпечити хімічну функціональність IFR, (послідовність перетворень, співвідношення компонентів, їх реакційна здатність, режим термодеструкції) та фізичні параметри коксового захисного каркасу (міцність, структурування, адгезія до підкладки) [8, 57].

Як основний фактор сумісності донора кислоти, карбонізуючого агента та газоутворювача в IFR, пропонується узгодженість термічних властивостей, а саме температур початку деградації, які повинні відповідати конкретному температурному режиму [8, 26, 56].

Таблиця 1.1 – Компоненти вогнезахисного покриття реактивного типу [54, 55]

Компонент	Речовина	Призначення
Донор кислоти	Фосфорна кислота, її амонійні солі та складні етери; фосфати меламіну, диціандіаміду та карбаміду; поліфосфати амонію та органічних амінів. Борна кислота та її солі.	Виділення кислоти для етерифікації гідроксильних груп карбонізуючої сполуки.
Карбонізуючий агент	Багатоатомні спирти – пентаеритрит, ди- та трипентаеритрит, сахариди, полісахариди, багатоатомні феноли.	Етерифікація кислотами, з утворенням вуглецевого матеріалу – основи коксового шару
Газоутворювач	Органічні аміни та аміді – меламін, диціандіамід, карбамід. Хлоровані парафіни.	Термічне розкладання з утворенням негорючих газів для формування спіненої структури теплозахисного вуглецевого шару.
Полімер	Акрилати, співполімери вініл ацетату, рідше – епоксиди, силікони, поліуретани	Формування покриття та участь у процесах коксоутворення.
Добавки	Загусники, піногасники, пігменти	Покращення експлуатаційних властивостей інтумесцентної композиції при виробництві, зберіганні та нанесенні
Наповнювачі	Оксиди та гідроксиди металів, природні та модифіковані глинисті матеріали, неорганічні та синтетичні волокна	Підвищення вогнестійкості полімерної матриці, стабілізація коксу, пригнічення димовиділення

В дослідженні Nazgun зі співавт. [8] представлено огляд ключових інгредієнтів та наповнювачів, що зазвичай використовуються в сучасних інтумесцентних покриттях (табл. 1.2). В табл. 1.2 наведено можливий вміст у рецептурі (%) та температури розкладання кожного компонента (T_d , °C), що є

критично важливими для прогнозування механізмів взаємодій в умовах пожежі чи високих температур. Слід зауважити, що, як походить з даних табл. 1.2, наповнювачі можуть кардинально змінювати значення T_d у більш високотемпературну область. Ця обставина може бути причиною пригнічення спучення інтумесцентної системи амоній поліфосфат (APP)/меламін (MA)/пентаеритрит (PE), особливо у випадку надмірних концентрацій наповнювача чи неорганічного антипірену [10, 43].

Таблиця 1.2 – Ключові матеріали інтумесцентного покриття з діапазоном використання та температурою формування обвугленого шару [8]

Компонент	Речовина	%	T_d , °C
Джерело кислоти	Поліфосфат амонію	5,76–45	250–450
Карбонізуючий агент	Пентаеритрит	6,5–13	187–189
	Терморозширюваний графіт (EG)	5,5–45	150–300
Газоутворювач	Меламін	5,5–15	250
Полімер	Співполімер вінілацетату	45–50	180–380
	Акрилова смола	20–60	–
	Епоксидна смола	39,8–70,6	–
Наповнювачі	$Mg(OH)_2$	0,5–20	350
	$Al(OH)_3$	2,5–7,4	260–400
	Глинозем	0,1–5	700–1200
	Ценосфера	1–10	–
	Борна кислота	0–11,76	500–650
Пігмент	TiO_2	2–10	–

Загальноприйнято [10, 57–59], що в умовах високих температур донор кислоти має розкладатися першим до температури деградації багатоатомного спирту. Розкладання газоутворювача має відбуватися при високій температурі

під час обвуглювання карбонізуючої сполуки та формування в'язкого (ще не затверділого) коксового шару, здатного до спінення негорючими газами, що виділяються – NH_3 , CO_2 , HCl (у разі присутності галогенованих інгредієнтів) тощо. Виділені гази відводять тепло від субстрату, що захищається, та є відповідальними за розширення розплавленого вуглецевого шару, який при затвердінні створює ізолюючий багатоклітинний теплозахисний коксовий екран, що запобігає структурній деградації будівельних конструкцій під час пожежі.

1.1.2 Хімічний механізм інтумесцентного вогнезахисту

Послідовність стадій хімічних перетворень та взаємодій компонентів IFR вперше була визначена в дослідженні Vandersall [18] та знайшла подальший розвиток в роботах Camino зі співавт. [19, 60] на прикладі термічної деградації суміші APP/MA/PE та окремих її інгредієнтів чи парних комбінацій. З того часу запропонований «робочий» механізм інтумесцентного вогнезахисту в загальних рисах не зазнав змін, незважаючи на численні дослідження трійної системи донор кислоти/карбонізуючий агент/газоутворювач [23, 49, 50, 61, 62].

Механізм утворення коксового шару в системі APP/MA/PE/неорганічні домішки в залежності від температурного режиму (T , $^{\circ}\text{C}$) виглядає наступним чином [8, 49, 50, 63]:

1) $T = 150\text{--}215$ $^{\circ}\text{C}$, донор кислоти розкладається з утворенням мінеральної кислоти – з донора кислоти вивільняється поліфосфорна кислота та аміак. У разі використання монофосфату амонію температура розплаву і початку розкладання відповідає 115 $^{\circ}\text{C}$, для системи APP/PE – 215 $^{\circ}\text{C}$.

2) $T = 215\text{--}280$ $^{\circ}\text{C}$, кислота реагує з гідроксильними групами поліолу з утворенням складних етерів – реакція етерифікації PE поліфосфорною кислотою з формуванням проміжних структур теплозахисного фосфор-вуглецевого каркасу.

3) $T = 280\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, утворені етери розкладаються та трансформуються в циклічні структури. Формується каркас, що являє собою розплав смолистого вуглецевого матеріалу, в склад якого можуть входити елементи неорганічних наповнювачів.

4) $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, газоутворювачі виділяють гази, які викликають спучення вуглецевого шару – МА розкладається з виділенням NH_3 , CO_2 , H_2O , NO_2 , які спінюють розплавлений коксовий шар і організують пористу структуру покриття.

5) $T = 550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$, починається затвердіння розплаву вуглецевої спіненої маси з утворенням тугоплавких структур та сполук, наприклад, пірофосфату титану.


Представлений механізм інтумесцентного вогнезахисту (1) – (5), хоч і є предметом постійного вивчення, має досить умовний та неусталений характер. Тим не менш, послідовність стадій (1) – (5) є орієнтиром для підбору складу IFR саме за термічною стабільністю. Згідно з запропонованим механізмом температура початку розкладання основних компонентів IFR має зростати в ряду: донор кислоти < карбонізуючий агент < газоутворювач [8].

Вогнезахисна ефективність покриттів реактивного типу залежить від реакційної здатності компонентів, вибраних для рецептури, узгодженості стадій (1) – (5) за часом перетворень [64] з урахуванням синергетичних ефектів, що виникають в суміші сполук, а також оптимального співвідношення між усіма компонентами [65].

Nasir і співавт. [66] дослідили вплив наповнювачів TiO_2 , $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 на вогнестійкість водорозчинної полімерної композиції складу APP/MA/PE/співполімер вінілацетату з акрилатом (табл. 1.3). Було встановлено різнопланову дію домішок на вогнезахисні характеристики покриття. Карбонат кальцію CaCO_3 значно поліпшував характеристики протипожежного захисту, про що свідчать коефіцієнти спучення (d – товщина

спученого шару, мм, табл. 1.3) та рівноважна температура під час випробувань пальником Бунзена (T_q , табл. 1.3). В свою чергу внесення в інтумесцентну композицію покриття $Al(OH)_3$ демонструє найвищий кисневий індекс (LOI) 35% (табл. 1.3), що свідчить про відмінну стійкість покриття до горючості.

Таблиця 1.3 – Характеристики коксового шару інтумесцентного полімерного покриття з різними неорганічними домішками [66]

Параметри	Характеристики коксового шару			
	TiO_2	$Al(OH)_3$	$Mg(OH)_2$	$CaCO_3$
Зовнішній вигляд				
d, мм	28,9	17,3	14,8	31,2
T_q , °C	294	345	390	264
LOI, %	29	35	33	34

Багатокомпонентність системи, високотемпературні умови здійснення цільових реакцій, широкий асортимент домішок створюють додаткові, а іноді й непереборні, труднощі при вивченні та встановленні закономірностей термічного розкладання IFR. Тим не менш, в результаті численних досліджень накопичено значний емпіричний матеріал [8, 49, 50, 56, 67, 68], який використовується як база для розробки теоретичних концепцій на рівні гіпотез, узагальнень тощо.

В дослідженні Nazrun [8] представлені основні рецептури IFR, що використовуються в різних типах інтумесцентних покриттів (табл. 1.4). Автори роблять умовний поділ IFR за типами, які розрізняються за температурами активації (T_a , °C) – температурою початку спучення та обуглювання покриття реактивного типу.

Таблиця 1.4 – Порівняння складів та властивостей різних типів інтумесцентних покриттів [8]

Тип покриття	Склад покриття	T _a , °C	Посилання
1	2	3	4
Покриття на водній основі			
Тип 1	Дисперсія вінілацетат/вініловий естер, АРР, РЕ, поліоли, МА, TiO ₂ , вермикуліт, цеоліт, Al(OH) ₃ , реологічні домішки, загущувач	< 250 °C	[69]
Тип 2	Дисперсія вінілацетат/етилен або вінілацетат-версатат, ценосфери СІL30, РЕ, МА, борна кислота, TiO ₂ , АРР, реологічні домішки, загущувач	330 °C	[8]
Тип 3	Акрилова емульсія HS-6121, полівінілпіролідон, К90, поліфосфат меламіну, крохмаль, ізопропоксид алюмінію, СаСО ₃ , пластівці слюди, скляні мікросфери НGM, реологічні домішки	410 °C	[70]
Покриття на основі розчинника			
Тип 1	Акрилова смола, АРР, МА, РЕ, Mg(OH) ₂ , TiO ₂	188 °C	[71]
Тип 2	Епоксидна смола, АРР, МА, РЕ, Mg(OH) ₂ , TiO ₂	285 °C	[71]
Тип 3	Акрилова смола, АРР, МА, РЕ, TiO ₂ , графіт, що розширюється, борат цинку, силікат кальцію	190 °C	[72]

Продовження таблиці 1.4

Епоксидні покриття			
1	2	3	4
Тип 1	Епоксидна смола, циклоаліфатичний поліамін, АРР (Exolit AP 750), борат цинку, борна кислота, МА	800 °С	[73]
Тип 2	Епоксидна смола, поліамідамін, АРР, графіт, що розширюється, борна кислота, МА, базальтове волокно, етанол	–	[74]
Гібридні покриття			
Тип 1	2,2'-біс(4-ціанатофеніл) ізопропіліден, графіт, що розширюється, РОСІ ₃ , РЕ, 1,3,5-тригліцидилізоціанурат	700 °С	[75]
Тип 2	4,4'-діамінодифеніловий етер, 4,4'- діаміноди-фенілметан, гексахлорциклотрифосфазен, МА, піридин, АРР, епоксидна смола	–	[76]

Слід розуміти, що підбір складів IFR у табл. 1.4 є дещо узагальненим. Тим не менш, можна констатувати (рис. 1.2), що температура початку спучення для водно-дисперсійних [69, 70] та органорозчинних [71, 72] інтумесцентних покриттів відрізняються не суттєво. В той же час найвищі температури початку спучення характерні для спеціальних інтумесцентних покриттів: 700 °С – для гібридних та 800 °С – для епоксидних [73–75]. Викладені в науковій літературі результати щодо ймовірних механізмів хімічних перетворень в IFR [8, 67, 68] дозволяють зробити висновки, корисні для розробки ефективних рецептур полімерних інтумесцентних покриттів:

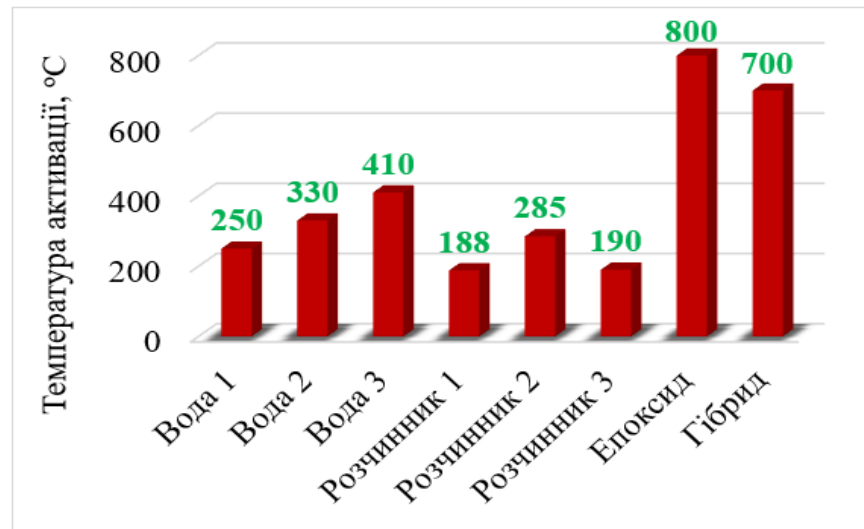


Рисунок 1.2 – Температура активації різних типів інтумесцентних покриттів

- найнижчу температуру деградації повинен мати донор кислоти, оптимально біля 150–200 °C. Температура розкладання карбонізуючої сполуки має бути не набагато більшою за температуру розкладання донора кислоти. Газоутворювач повинен розкладатися при температурі, вищій аніж вище перелічені компоненти IFR, оптимально в час утворення в'язкого шару вуглецевої основи 280–350 °C. Вказані температурні інтервали є дещо умовними й відносяться до системи APP/MA/PE;
- якими б не були деталі механізму IFR, головна її функція – утворення в умовах пожежі об'ємного коксового шару з високою в'язкістю піролізуючого розплаву та низькою здатністю до теплопередачі.

1.1.3 Фізичні закономірності утворення коксового шару

Як основні фізичні характеристики інтумесцентного вогнезахисту слід визначити: адекватне розширення реактивного покриття, утримання утвореного вуглецевого шару на підкладці та його вогнезахисні і фізико-механічні властивості [13, 28, 49].

Процес спучення вогнестійкого покриття з утворенням коксового шару описується в роботі Lucherini зі співавт. [13], як перебіг послідовних стадій, який показано на рис. 1.3.

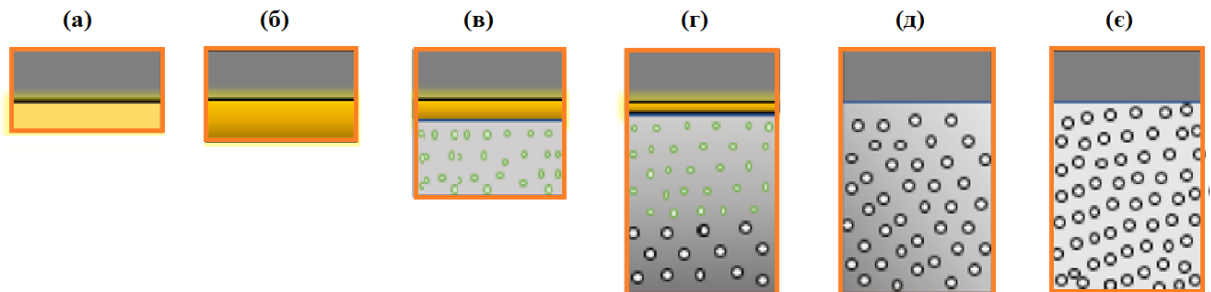


Рисунок 1.3 – Стадії спучення інтумесцентного покриття [13]

Численні дослідження закономірностей терморозширення коксового шару IFR підтверджують ідентифікацію окремих фаз спучення інтумесцентного покриття [8, 12, 13, 50, 56] та дозволяють визначити такі стадії фізичних перетворень (рис. 1.3.).

а) Вихідне покриття на поверхні, що захищається від вогню.

б) Термічна деструкція (зона плавлення) – покриття піддається впливу джерела тепла і досягає температури, коли донор кислоти починає термічно розкладатись, поверхня вогнестійкого покриття розплавляється та перетворюється на в'язку рідину.

в) Спучення (реакційна зона) – піноутворювач активується і розкладається з виділенням великої кількості газоподібних продуктів, спостерігається ендотермічна реакція, поглинається тепло від субстрату.

г) Спучення та початок обуглення спученого шару – бульбашки газу затримуються в покритті, через що розплавлена матриця спучується до 100 разів від початкової товщини. Утворюється пористе середовище з низькими щільністю та теплопровідністю, яке виконує функцію теплового бар'єру для підкладки. Процес спучення продовжується до вичерпання піноутворювача або до затвердіння вуглецевої матриці.

д) Обвуглювання (зона обвуглювання) – затвердіння пористого середовища та вивільнення залишкових летких речовин. На цьому етапі структура коксового шару є високовуглецевою та має чорний або темно-сірий колір на відкритій поверхні.

є) Утворення та структурні зміни компактного коксового шару з підвищеною термостійкістю (зона деградації вуглецевого каркасу) – коксовий шар окислюється з виділенням CO_2 . Чорний і компактний вуглецевий спінений шар перетворюється на білу крихку пилову піну.

Межі температурного режиму стадій спучення, що визначені та узагальнені із залученням робіт [8, 13, 28, 76–78], представлені на рис. 1.4.

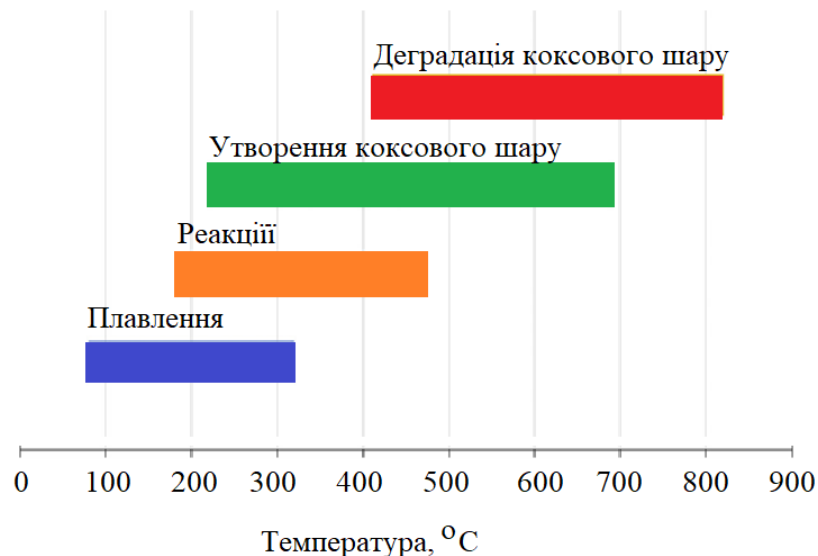


Рисунок 1.4 – Температурний режим для стадій процесу спучення

Очевидно, що температурні інтервали у запропонованих вище механізмах коксоутворення є умовними та можуть зсуватись в залежності від складу та співвідношення компонентів IFR [8]. Еволюція визначених етапів побудови коксового шару [62] залежить від складу хімічних речовин в IFR, однак, механізм і відповідність хімічних і фізичних процесів мають критичне значення й повинні відбуватися у відповідній послідовності в заданих температурних інтервалах. Якраз ця вимога і є причиною підбору трьох

основних сполук IFR (донора кислоти, карбонізуючого агенту та газоутворювача) згідно з їх термічною поведінкою.

Існує усталена думка, що вогнезахисна ефективність інтумесцентного покриття пропорційно залежить від його здатності до спучення [10, 13, 62], яка розраховується як приріст у відсотках товщини спученого від товщини вихідного покриття.

Ступінь фіксації газу у розплавленому середовищі, а також адгезія розплаву до поверхні залежить від показників в'язкості розплавленого шару покриття. В дослідженні Zeng і співавт. [80] були визначені та проаналізовані перехідні реологічні характеристики розплавів та термічної деградації покриттів (табл. 1.5) в інтервалі температур 100–600 °С.

Таблиця 1.5 – Склад інтумесцентної епоксидної композиції [80]

Назва	APP	MA	CaCO ₃	Волокно	TiO ₂	Борат цинку	Епоксидна смола
ZB0	15,79	12,63	1,44	10,18	3,44	0,00	56,52
ZB5	15,79	12,63	1,44	10,18	3,44	5,00	51,52
ZB10	15,79	12,63	1,44	10,18	3,44	10,00	46,52
ZB15	15,79	12,63	1,44	10,18	3,44	15,00	41,52
ZB20	15,79	12,63	1,44	10,18	3,44	20,00	36,52

Результати вогневих випробувань, проведених за стандартним температурним режимом пожежі, показали, що найкращі показники демонструє композиція, що містить 15 мас.% борату цинку. В свою чергу, визначення спучення вуглецевого шару та відповідні реологічні виміри, показали, що регулювання вмісту борату цинку від 0 до 20 мас.% збільшує мінімум динамічної в'язкості початкового обвуглювання з 6,2 до 5671,4 Па·с.

На рис. 1.5 наведена залежність динамічної в'язкості розплавлених шарів досліджених покриттів (табл. 1.5) від температури.

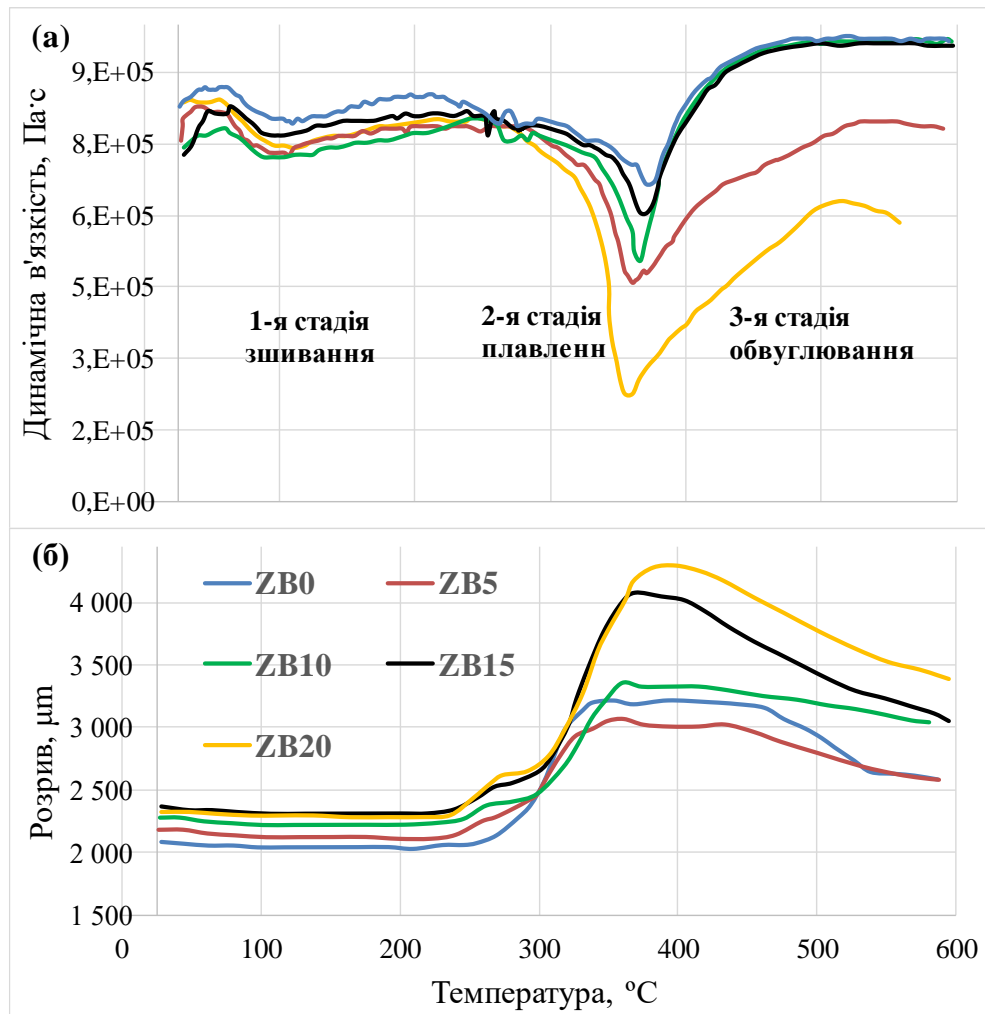


Рисунок 1.5 – Динамічна в'язкість (а) та висота спучення (б) протягом зміни температури для інтумесцентних епоксидних композицій [80]

Усі склади (табл. 1.5) демонструють однотипну зміну в'язкості в залежності від температури, яка здійснюється у три стадії: $T=100\text{--}235\text{ °C}$; $T=235\text{--}375\text{ °C}$; $T=375\text{--}600\text{ °C}$. Перелічені три стадії відповідають основним станам інтумесцентного чи гібридного покриття в умовах підвищення температури – зшиванню полімерної композиції, плавленню з утворенням в'язкопружної речовини та обуглювання з побудовою захисного каркасу [4, 81, 82].

Інтумесцентні покриття є ключовою стратегією пасивного вогнезахисту завдяки своїй значній здатності до опору теплопередачі, яка зумовлена зниженням теплопровідності утвореного обугленого шару [83, 84]. Теплопровідність захисного каркасу визначає ефективність IFR і має значний

вплив на їх вогнезахисні властивості [85, 86]. При температурах нижче 200°C процес спучення є практично відсутнім, тоді як теплопровідність зростає через наявність дрібнопористих структур, які забезпечують передачу тепла через реактивне вогнестійке покриття. При температурах, що перевищують 375 °C, спостерігається збільшення теплопровідності внаслідок часткового руйнування вуглецевого шару. Понад 500°C значення теплопровідності залишається практично сталим протягом певного часу, що обмежує тепловіддачу від джерела тепла до захищеного субстрату [87–89].

У дослідженні, проведеному Сіррісі зі співавт. [90], показано, що для оцінки ефективної теплопровідності реактивного гібридного покриття, що застосовується в інженерії будівельних конструкцій, необхідно визначати параметри в'язкості розплавленого шару, швидкість втрати маси та інші показники через дрібномасштабні хімічні аналізи, комбінуючи їх з наявними результатами натурних випробувань на вогнестійкість інтумесцентного покриття. Комплексні дослідження фізичних (розширення вуглецевого шару, міцність, реологічні параметри) і хімічних (термічна реактивність, механізм взаємодій, каталітична дія) властивостей є важливими етапами на шляху до створення ефективних рецептур полімерних інтумесцентних композицій.

1.2 Функціональне призначення полімерного сполучного в реактивних вогнезахисних покриттях

1.2.1 Полімерні інтумесцентні фарби

За характеристиками дисперсійного середовища полімерної складової інтумесцентні покриття поділяються на водні та органорозчинні (у склад яких входить розчинник) [9, 91]. Традиційні вогнестійкі покриття на основі розчинників виділяють велику кількість летких органічних сполук (ЛОС) під час виробництва та нанесення, спричиняючи забруднення навколишнього середовища, та спричиняють ризики для здоров'я людини [92, 93]. Крім того, висока вартість органічних розчинників збільшує витрати на виробництво,

обмежуючи їх практичне застосування [94]. З екологічних міркувань виробництво інтумесцентних покриттів на основі розчинників поступово припиняється, що в останні роки стимулює розвиток водно-дисперсійних покриттів реактивного типу [95–97].

За складом інтумесцентної системи вогнезахисні фарби можна розділити на три умовних групи [9, 10, 49, 98]: поліфосфатні композиції, що містять полімер у вигляді водної полімерної дисперсії або його розчину в сольвенті (водно-дисперсійні та органорозчинні відповідно); композиції на основі інтеркальованого графіту; силікатні композиції. Поліфосфатні IFR [8, 9, 50, 99], що містять у своєму складі тріаду APP/MA/PE чи їх аналоги (табл. 1.6), є найбільш поширеними серед полімерних фарб реактивного типу та придатними до промислового виробництва з урахуванням цінових і технологічних аспектів.

Таблиця 1.6 – Характеристики основних видів інтумесцентних фарб

Властивості	Водні поліфосфатні	Органорозчинні поліфосфатні	Епоксидні
Експлуатація	у внутрішніх приміщеннях	у внутрішніх приміщеннях	в умовах внутрішньої та зовнішньої експлуатації
Летючі органічні сполуки (ЛОС)	Ні	До 35%	До 20%
Час висихання, год	8	8	24
Токсикологія	Мінімальний шкідливий вплив	Шкідливо для здоров'я та довкілля	Середній рівень впливу
Рекомендовані умови номінальної пожежі	Стандартна	Стандартна	Стандартна та вуглеводнева

Для умов пожежі, які потенційно відрізняються від целюлозного режиму (стандартної пожежі), а також для умов целюлозної пожежі на стратегічних об'єктах рекомендується застосувати поліуретанові [100, 101], силіконові [26, 102] або епоксидні [26, 103] вогнезахисні покриття. Ці захисні засоби, як правило, не часто знаходять застосування на українському ринку з причини їх високої ціни.

Як демонструє інформація табл. 1.6, основні види інтумесцентних покриттів мають свої переваги та недоліки. Відповідно до цього їх застосування має відповідати вимогам та умовам нанесення, експлуатації, екологічності та передбачуваних вогневих впливів [104–106].

Роль полімерного сполучного у складі реактивного вогнезахисного покриття залишається недостатньо дослідженою. Особливо це стосується хімічних процесів утворення однорідної структури коксу, термостійкості та ступеню розширення обугленого шару [8, 9, 49, 99].

Такі полімери, як дисперсія етиленвінілацетату (EVA), вінілхлоридний латекс, акрилова смола, знаходять широке використання в інтумесцентних композиціях. Однак, існує думка, що ці сполучні є перспективними при подоланні полум'я, але вони є джерелом великої кількості токсичних газів та диму в процесі горіння [9, 107]. Тому вважається, що використання епоксидних полімерів є більш екологічним у частині зменшення димовиділення при збереженні якості та ефективності вогнезахисту [108, 109]. Нижче оглянуто полімерні матеріали, які використовуються у виготовленні ефективних систем реактивних вогнезахисних матеріалів.

1.2.2 Полімер як компонент інтумесцентної вогнезахисної системи

Згідно з відомими закономірностями механізму інтумесценції, викладеними в наукових роботах Camino зі співавт. [110] та Jimenez зі співавт. [59], полімер має розкладатися в необхідному температурному діапазоні, бути реакційноздатним для утворення полімерних композитів та негорючим, щоб

забезпечити побудову якісного теплоізоляційного коксового шару. Важливо, щоб полімерна матриця надавала належну в'язкість розплаву в умовах високих температур. Це запобігає сповзанню розплавленого вогнестійкого покриття в процесі коксоутворення і не заважає формуванню піни [80–82]. Механізм побудови вуглецевої коксової структури, міцність її адгезії до підкладки та інтенсивність руйнування в умовах вогневого впливу напряму залежать від термостійкості полімерного зв'язуючого інтумесцентної композиції [9, 46, 111–114].

В літературі відсутні систематичні огляди та порівняльні експериментальні дослідження впливу полімерів різної природи, виконані в комплексі з однією інтумесцентною системою (наприклад, APP/MA/PE) в однакових умовах теплового впливу [28, 115, 116]. Дослідники зазвичай вважають, що основною функцією полімерного сполучного матеріалу є забезпечення плівкоутворення, достатньої адгезії до різних підкладок, необхідного терміну служби інтумесцентного чи гібридного покриття та екологічних властивостей. Тим не менш, деякі роботи [15, 20, 117, 118] показали, що полімерна речовина іноді робить вирішальний внесок у вогнезахисну дію потрійної системи «джерело кислоти/карбонізуючий агент/газоутворювач». Враховуючи уявлення про температурні етапи процесу коксоутворення в інтумесцентних системах IFR [13, 15, 78], можна сформулювати низку гіпотетичних вимог до полімерної складової:

- температура розм'якшення/плавлення полімеру не повинна бути занадто низькою чи занадто високою порівняно з температурою початку реакцій між APP та PE (200–300 °C);
- в'язкість розплаву полімеру має бути оптимальною для процесу спучення: вона повинна не дозволяти обвугленому шару стікати з підкладки, але при цьому сприяти спіненню;
- затвердіння вуглецевого шару деградованого полімеру має відбуватися гармонізовано з температурним режимом спучення IFR;

- позитивним внеском є участь полімеру як джерела вуглецю в побудові захисного коксового шару та утворенні полімерних композитів.

Більша частина вогнезахисних полімерних покриттів, що застосовуються на практиці [8, 9, 11], містять водні полімерні матеріали: переважно вінілацетатні та акрилові, рідше – аміноформальдегідні, поліуретанові та епоксидні. Ці полімери здатні утворювати полімерно-олігомерні структури, які беруть участь у загальному процесі карбонізації та виділяють негорючі гази (аміак, оксиди вуглецю, водяну пару), що сприяють спінюванню вуглецевого каркасу. У промислово вироблюваних композиціях як полімери зазвичай використовують дисперсійні системи на основі вінілацетату [9, 11, 50, 51]: співполімери з етиленом, акрилатами та іншими мономерами.

Детальний огляд водорозчинних плівкоутворювальних матриць представлений у дослідженні Li зі співавт. [9]. Як основні вимоги до полімерного сполучного IFR-систем автори розглядають: здатність утворювати суцільну плівку з забезпеченням адгезії до поверхні [119]; екологічну безпеку [120]; вирішальне значення для досягнення ефективного вогнезахисту [121]; відмінну водостійкість, атмосферостійкість та термічну стабільність [122]. При цьому в'язкість розплаву, температура плавлення та температура деградації полімеру повинні бути сумісними з реакцією піролізу джерела кислоти, щоб забезпечити утворення рівномірного та компактного інтумесцентного шару вуглецю [123]. Наразі вінілацетатні співполімери, акрилові, силіконові та епоксидні смоли, поліуретани повністю чи частково задовольняють ці вимоги та використовуються як водорозчинні полімерні матриці покриттів реактивного типу [124–126].

Найбільш поширеними у промисловому виробництві є інтумесцентні покриття, що містять співполімери вінілацетату (EVA – вінілацет з етиленом, VAVV – вінілацетат з вінілверсататом, VA/E/VV – вінілацетат з етиленом та вінілверсататом) [42, 46, 56, 127]. Завдяки механізму термодеградації та здатністю до утворення полімерних композитів ці полімерні дисперсії є майже

ідеальними для побудови теплозахисного коксового шару у складі IFR. Однак низька водостійкість вінілацетатних інтумесцентних покриттів, пов'язана з водочутливістю сполучних речовин, обумовлює певні обмеження на їхнє використання [8, 9, 26, 45].

Інтумесцентні вогнезахисні покриття на основі акрилових смол є більш стійкими до впливу факторів навколишнього середовища, але менш ефективними у забезпеченні протипожежних властивостей покриття [9, 26]. Для покращення вогнезахисної ефективності водорозчинних акрилових IFR використовують їх інтеграції з іншими матеріалами. Наприклад, Zhan зі співавт. [128] розробили IFR на основі акрилової смоли з використанням меламінполіфосфату та графітових нанопластин, що значно покращило вогнестійкість покриттів. У дослідженнях [65, 129] для підвищення термостійкості та вогнестійкості акрилового полімеру до інтумесцентної системи APP/MA/PE додавали розширюваний графіт чи змішані вуглецеві матеріали (вуглецеві нанотрубки та графен). Результати показали, що синергетична взаємодія вуглецевих нанодомішок з класичною інтумесцентною тріадою значно підвищило ефективність захисту від вогню та термічну стабільність акрилових IFR.

Для оптимізації комплексних характеристик, особливо вогнестійкості, вогнезахисних покриттів на основі водорозчинних епоксидних смол ефективними підходами є спеціальна структурна конструкція, модифікація щеплення, модифікація змішування та регулювання вмісту затверджувача [9, 130]. До таких модифікацій належить введення у водорозчинну епоксидну смолу основ Шиффа [131], модифікованого гексагонального нітриду бору [132], оксиду графену та багатостінних вуглецевих нанотрубок [133].

Підводячи підсумок аналізу вогнезахисних та експлуатаційних характеристик полімерних інтумесцентних засобів для сталевих та дерев'яних будівельних конструкцій, як основні стратегії подальшого удосконалення ефективності інтумесцентного вогнезахисту слід визначити [9, 42, 46, 134]:

- підвищення вогнезахисної ефективності, яка полягає в зростанні значення надійної межі вогнестійкості в інтервалі 120-180 хв;
- збільшення терміну експлуатації реактивного покриття за рахунок збільшення стійкості до зовнішніх факторів шляхом вибору полімерної складової та підвищення хімічної стійкості компонентів IFR;
- виключення зі складу інтумесцентних композицій шкідливих та заборонених до застосування речовин.

1.2.3. Вплив полімеру на побудову коксового шару

Pimenta зі співавт. [118] вивчали вплив різних полімерних сполучних в складі IFR APP/MA/PE на термічну стабільність систем та досліджували внесок полімеру у формування вуглецевих каркасів. Для проведення дослідження вибрали наступні полімери: водно-дисперсійні – полівінілацетат (pVA), співполімери вінілацетату з вініловим етером версатикової кислоти з різним ступенем полімеризації (VAVV1 та VAVV2), а також органорозчинні акрилати – співполімер акрилової та метакрилової кислот (AMA), стиролу з бутилакриловою кислотою (SbA) та стиролу з акриловою кислотою (SA). За результатами TGA-аналізу для вінілових смол термічна деградація значною мірою відбувається близько 315 °C. Максимуму термічного розкладання акрилатні полімери AMA, SbA, SA досягають в інтервалі 380–400 °C. Результати дослідження термічної деградації полівінілацетату (pVA), опубліковані в роботі Kovtun і співавт. [135], де також було визначено дві основні стадії деградації полімеру, підтверджують результати, отримані в [118].

На відміну від вінілових полімерів стирол-акрилатні демонструють низьку термостійкість та один основний пік деградації в інтервалі 340–450 °C за рахунок ланцюгових механізмів розщеплення на леткі мономери [136]. Результати досліджень [46, 134] не суперечать гіпотезі, що механізм деградації полімеру є відповідальним за міцність та інші фізико-механічні властивості

утвореного коксового шару: розкладання до летких мономерів і горючих газів негативно впливає на коефіцієнт спучення та структуру коксового шару, а ступінчата деградація полімеру з можливістю подальшого зшивання в сітчастій структурі, скоріш за все, додає коксовому шару додаткових позитивних характеристик. На рис. 1.6 візуалізовано спучені вогнестійкі покриття на основі системи APP/МА/РЕ/полімер [118].

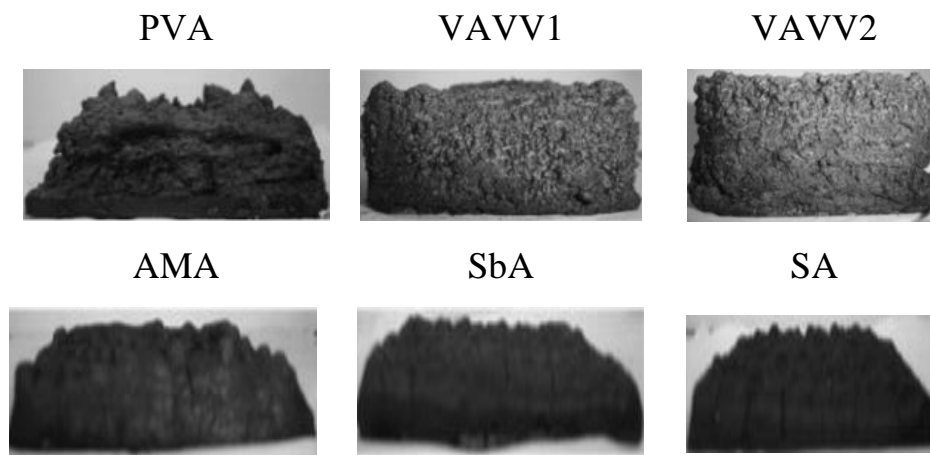


Рисунок 1.6 – Вигляд спучених інтумесцентних покриттів [118]

Як і в дослідженні [46], покриття на основі стиролакрилатних полімерів відповідно до свого механізму деструкції (розпад на горючі мономери) характеризуються незначним спученням, яке не може забезпечити високих показників вогнезахисної ефективності при пожежі.

Деградацію співполімеру етилену з вінілацетатом (EVA) у присутності APP було детально розглянуто в роботі Lou і співавт. [137]. Криві TGA дозволяють констатувати, що термічна деградація чистого EVA перебігає в дві стадії. Перший етап ($T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$) відбувається з виділенням оцтової кислоти, внаслідок розпаду вінілацетатних груп. Другий етап ($T=468\text{ }^{\circ}\text{C}$) перебігає шляхом деградації поліетиленових ланцюгів, що призводить до повної деструкції полімеру. У випадку зразку EVA, який містить тільки APP, початкова температура розкладання знижується до $330\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналогічні результати взаємодії EVA з APP отримані в роботі Bourbigot і співавт. [20], де розглянуто два типи інтумесценції систем на основі EVA:

фізичне спучення суміші EVA/терморективний графіт (EG,) та хімічне спучення суміші EVA/модифікований поліфосфат амонію (AP760). На рис. 1.7 представлені залежності температури від часу нагрівання за методом конус калориметрії для полімеру EVA та його сумішей з EG та AP760 (10 мас.%) – AP760/EG (по 5 мас.%) та тригідратом алюмінію (ATH) (65 мас.%).

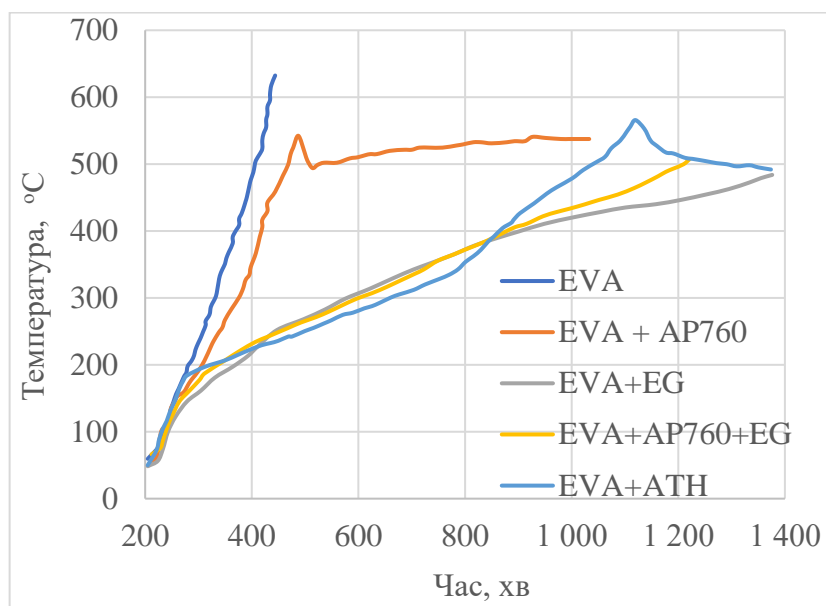


Рисунок 1.7 – Залежність температури інтумесцентних сумішей від часу нагрівання в конус калориметрі [20]

Дані рис. 1.7 свідчать, що добавка AP760 не зменшує пік швидкості виділення тепла (pHRR) в порівнянні з даними, отриманими для вихідного EVA, але забезпечує підвищення часу займання з 20 с до 40 с. Візуально спучення суміші не відбувається, а вуглецевий шар залишається плоским до тих пір, поки не згасне. Навпаки, композиція EVA/EG демонструє зниження pHRR на 65% й утворює спучений «волосатий» кокс під час експерименту. Інтеркальовані сполуки, що містяться в EG, швидко розкладаються на газоподібні продукти, які спучують розплав EVA. Поєднання EG і AP760 в композицію EVA/AP760/EG забезпечує зниження pHRR лише на 54%. ATH знижує pHRR на 70% порівняно з чистим EVA. У всіх випадках на поверхні

матеріалу при горінні утворюється коксовий шар, який захищає підкладку з різним рівнем ефективності.

Порівняння поширених сполучних речовин в інтумесцентних фарбах на водній основі співполімерів на основі вінілацетату та їх модифікацій, а також деяких видів акрилових співполімерів представлено в роботі Eremina і співавт. [138]. Результати досліджень показують, що при постійному кількісному співвідношенні IFR та полімеру обидва параметра (K та R) залежать від хімічної природи використовуваного сполучного: акрилові співполімери традиційно демонструють гірший результат за обома показниками. Підвищити вогнезахисну ефективність акрилових полімерів можливо, на думку Ng зі співавтор. [65], оптимізацією співвідношення компонентів в системі APP/MA/PE.

В літературі присутня інформація щодо визначення оптимального вагового співвідношення між компонентами IFR. Запропоновані співвідношення 3:1:1 в суміші APP:MA:PE для поліаміду [139], 2,7:1:1,1 в суміші APP:MA:PE для акрилатів, 3:1 та 2:1 в суміші APP:PE для поліпропілену (PP) [140]. Samino і співавт. [141] розробили діаграму, яка встановлює зв'язок між співвідношенням APP:MA:PE в суміші з PP та значенням граничного кисневого індексу (LOI). Максимальне значення LOI було досягнуто при співвідношенні 1:0,5:0,3 (APP:MA:PE) при загальній кількості IFR в PP 30 % (за мас).

Короткий огляд з порівняння поширених в промисловому виробництві полімерів – вінілацетатних та акрилових, свідчить про те, що останні значно програють в питаннях вогнезахисної ефективності та термічної стабільності при побудові захисного коксового шару. Тим не менш, акрилатні полімери є ефективними для рішення експлуатаційних проблем [140]: більша швидкість висихання при нанесенні, більша стійкість до дії зовнішніх факторів тощо. Тому сучасні дослідження акрилових та стирол акрилових полімерів в інтумесцентному вогнезахисті пов'язані, перш за все, с удосконаленням акрилових IFR шляхом розробки нових сполучних, призначених спеціально

для IFR, застосування суміші полімерів, підбір ефективних антипіренових систем [8, 9, 26, 142].

1.3 Експлуатаційні властивості полімерних інтумесцентних покриттів

1.3.1 Удосконалення реології вогнезахисних фарб

Інтумесцентні покриття комерційно представлені на світовому ринку з 90-х років минулого століття. Висновки та дискусії з наукових праць, а також огляд патентної літератури, дозволяють скласти більш-менш достовірну рецептуру сучасного покриття інтумесцентного типу. Тим не менш, у відкритому доступі практично відсутня інформація щодо компонентів, які забезпечують реологічні властивості, у тому числі загущення та в'язкість вогнезахисних фарб.

Реологія засобів вогнезахисту в літературі обговорюється у зв'язку з реологічними властивостями розплаву покриття на перших етапах формування коксового шару [143, 144]. Дійсно, цей аспект загальної реологічної поведінки, і вплив на нього різних наповнювачів, і природи полімерної матриці, є важливим для побудови функціонального теплоізоляційного коксу [145]. Проте, якщо розглядати не лабораторні зразки вогнезахисних матеріалів, а комерційні суміші, формування основи ефективності інтумесцентного покриття починається задовго до того, як воно піддається впливу підвищених температур. Джерелом протипожежних властивостей є рівномірний розподіл цільових компонентів у полімерній матриці під час виробництва інтумесцентної фарби. Ефективність вогнезахисту залежить від стабільності рецептури матеріалу, відсутності осідання чи розшарування при зберіганні і транспортуванні матеріалу до місця проведення робіт. Важливим фактором є також вирівнювання шару вогнестійкого покриття з рівномірним розподілом в ньому діючих речовин

[146, 147]. Усі ці важливі аспекти зумовлені одним фізичним явищем – різною мірою зсуву, що, своєю чергою, викликає реологічну відповідь інтумесцентної композиції [148, 149].

Важливі процеси, що відбуваються з покриттям під час його життєвого циклу, від виробництва лакофарбового матеріалу до нанесення і висихання покриття, можуть бути описані комплексом реологічних параметрів. Традиційно, в якості таких параметрів використовують напругу зсуву (τ , Па); граничну напругу зсуву чи межу текучості (τ_0 , Па); в'язкість за нульової швидкості зсуву (η_0 , Па·с); в'язкість за визначеної швидкості зсуву (η , Па·с); та в'язкість за високих швидкостей зсуву (η_∞ , Па·с) [149]. В наукових дослідженнях Rabasco зі співавт. [150], He зі співавт. [151] було встановлено кореляційний характер залежності між реологічними параметрами комерційних фарб і їх стабільністю під час виробництва, зберігання, нанесення, вирівнювання покриття, провисання, стійкості до розбризування тощо. Зокрема, ці параметри описують усереднені діапазони швидкостей зсуву та напруги зсуву, що присутні на різних етапах життєвого циклу лакофарбових матеріалів, а також в'язкість, що робить матеріал технологічно придатним, щоб успішно проходити ці етапи. Згідно з рекомендаціями [149–150] визначається ряд аналітичних параметрів, що можуть мати прямий вплив на реологічну поведінку (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 – Критичні аналітичні параметри, що враховуються для реологічних випробувань

Тест	Аналітичний параметр
Крива в'язкості	В'язкість при нульовому зсуві (η_0 , Па·с) В'язкість при нескінченному зсуві (η_∞ , Па·с) Межа текучості (τ_0 , Па)
Тиксотропія	Відносна тиксотропна площа (S_R , Па·с)
Частотна розгортка	Модуль пружності (G' , Па)/ Модуль втрат (G'' , Па)

Загалом, для модифікації реології фарб на основі водних полімерів використовуються різноманітні модифікатори неорганічної чи органічної природи. Неорганічні модифікатори реології здебільшого включають глини, наноглини та кремнеземи [9, 43], які здатні утворювати полімерні композити та нанокомпозити. Органічні реологічні добавки є більш різноманітними за своїм хімічним складом і включають целюлозні етери (HEC), гідрофобно модифіковані етери целюлози (HMHEC) [36, 37], лугорозчинні емульсії (ASE), гідрофобно модифіковані лугорозчинні емульсії (HASE) [151, 152], гідрофобно модифіковані етоксильовані уретани (HEUR) та гідрофобно модифіковані поліетери (HMPE) [153, 154]. Органічні модифікатори реології зазвичай класифікуються за способом загущення покриття – неасоціативний (HEC, HMHEC, ASE, HASE) та асоціативний (HMHEC, HASE, HEUR, HMPE) [153, 155].

Неасоціативний ефект загущення фарб на водній основі досягається завдяки механізму виключення об'єму води [151, 153]. У цьому випадку високомолекулярні, водорозчинні полімери розширюються (набухають) всередині рідкої фази фарби шляхом поглинання молекул води, займаючи гідродинамічний об'єм. Типовими прикладами таких загусників є реологічні модифікатори HEC та ASE [156, 157]. У свою чергу, асоціативні загусники – це водорозчинні полімери, модифіковані гідрофобними групами, здатними взаємодіяти один з одним та з іншими компонентами у рецептурі, особливо з полімерною матрицею. Ці взаємодії призводять до утворення тимчасової мережі, яка обмежує рухливість частинок, тим самим збільшуючи в'язкість. До поширених асоціативних загусників належать гідрофобно модифіковані уретани HEUR та поліетери HMPE загусники [158, 159]. Деякі модифікатори реології, завдяки своїй хімічній структурі, можуть використовувати як асоціативні, так і неасоціативні механізми для підвищення в'язкості; помітними прикладами є гідрофобно модифіковані емульсії (HASE), та гідроксиетилцелюлоза HMHEC. Зазвичай для конструювання необхідних реологічних ефектів та задоволення конкретних вимог до експлуатаційних

характеристик фарби чи покриття використовуються комбінації загущувачів різного типу [155, 160, 161]. В будь-якому випадку основне функціональне призначення індивідуальних загущувачів чи їх сумішей полягає у забезпеченні комплексу реологічних параметрів для належного виготовлення, зберігання та нанесення лакофарбових матеріалів. В дослідженні Richards зі співавт. [162] представлені основні напрями впливу найбільш поширених органічних згущувачів на якісні характеристики лакофарбових матеріалів (табл. 1.8).

Таблиця 1.8 – Вплив органічних реологічних добавок на якісні характеристики лакофарбових матеріалів [162]

Параметр	НЕС	НМНЕС	НАСЕ	НЕUR
Стійкість до розбризкування	Слабка/ помірна	Висока	Висока	Висока
Стійкість до стікання	Висока	Висока	Висока	Висока
Здатність до вирівнювання	Слабка/ помірна	Помірна/ висока	Висока	Висока
Вологостійкість	Висока	Висока	Слабка/ помірна	Висока
Стійкість до дії інших компонентів	Висока	Висока	Помірна	Висока
Чутливість до рН	Висока	Висока	Помірна	Слабка

Тема впливу реологічних домішок на різноманітні аспекти використання водорозчинних лакофарбових матеріалів досить детально розглянута в наукових оглядах [153, 155, 161, 163]. Проте, у відкритому доступі практично відсутня інформація щодо компонентів чи формул, які забезпечують реологічні властивості, а саме загущення, вогнезахисних фарб.

В науковій літературі наявні лише поодинокі приклади формул загущувачів інтумесцентних покриттів: альгінат натрію [9], карбоксиметилцелюлоза та каолін [160], алюмосилікатні стабілізатори в'язкості типу Betolin [164] наночастинки гексагонального нітриду бору для

покращення стабільності та в'язкості покриття [165]. Важливо зазначити, що перераховані загущувачі [9, 160, 164, 165] не відносяться до класичних систем реологічної модифікації латексних фарб на водній основі [153, 155]. Водночас вогнезахисні фарби з високим рівнем наповнення (зміст нелетких речовин 70–75 %), які є об'єктом даного дослідження, характеризуються реологічним профілем [43], типовим для неньютонівських рідин [162, 166]. Через повну відсутність експериментальних даних щодо в'язкості та напруги зсуву фарб реактивного типу (складу АРР/МА/РЕ/полімер) неможливо здійснити будь-яке достовірне прогнозування оптимальних реологічних параметрів для цих матеріалів.

1.3.2 Довговічність покриттів реактивного типу

Зберігання вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів протягом строку їх служби має першорядне значення. Деградація покриття від факторів навколишнього середовища може критичним чином вплинути на співвідношення компонентів IFR, що змінить механізм очікуваних реакцій для побудови коксового шару [45]. Серед цих вражаючих факторів, які суттєво можуть зменшити працездатність покриття реактивного типу, слід зазначити ультрафіолетове (УФ) випромінювання, вологість та атмосферні впливи, агресивні середовища, перепад температур [44, 45, 94, 140]. На європейському рівні довговічність IFR-покриттів оцінюється відповідно до ЕАД 350402-00-1106, де застосовуються виключно прискорені кліматичні випробування та визначені категорії атмосферних впливів [167].

Інтумесцентні покриття, як правило з причини рецептурних особливостей (низький вміст полімеру та високий вміст твердих речовин) є чутливими до вологих середовищ та вивітрювання [168]. Разом з впливом УФ-випромінювання та перепадами температури ці фактори можуть призвести до розтріскування поверхні, набухання та зниження адгезії [140, 168].

Стосовно механізму старіння вогнезахисного покриття вважається, що основна причина полягає в тому, що активні компоненти покриття піддаються впливу навколишнього середовища та зазнають хімічних та фізичних змін, таких як гідроліз та міграція, або хімічні реакції, що відбуваються у присутності кислот та солей [169, 170].

На рис. 1.8 представлені основні напрями деградації компонентів IFR-покриття під дією УФ випромінювання, кисню, води та високої температури [168]. Очікувані реакції окиснення, розкладу та гідролізу змінюють склад нативного покриття, а гідрофільні компоненти покриття мігрують до поверхні та можуть вимиватися, що додатково знижує їх концентрацію в системі [171]. При цьому товщина та щільність захисного коксового шару зменшуються, що призводить до погіршення вогнезахисних функцій покриття.

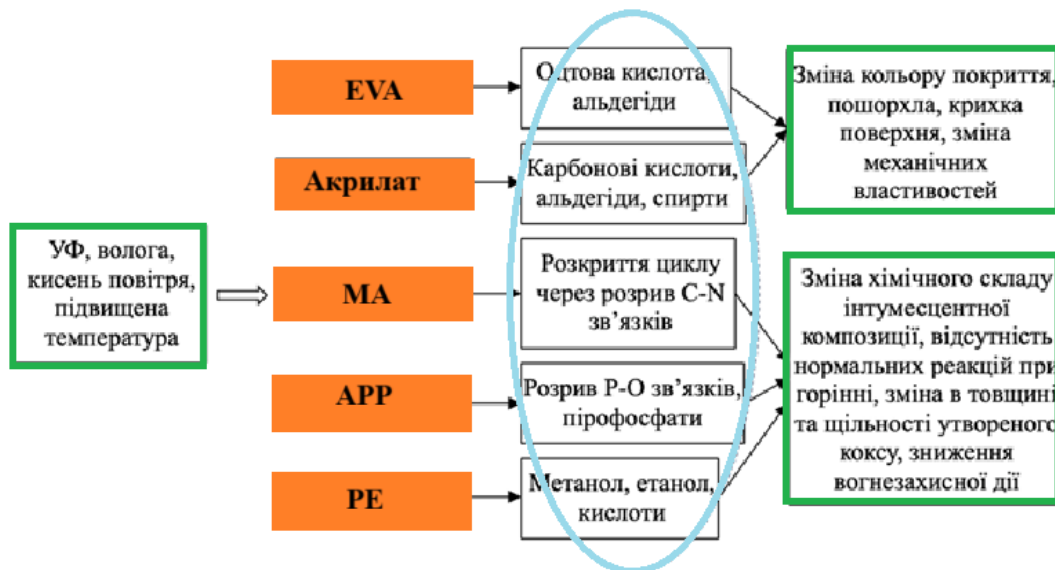


Рисунок 1.8 – Зміни хімічного складу інтумесцентного покриття під впливом атмосферних чинників [171, 172]

Протягом останніх років з'явилися дослідницькі проекти, присвячені вивченню довговічності інтумесцентних покриттів в умовах різних типів природних [169, 173] та штучних [174] сценаріїв впливу. Пропонуються також вдосконалені рецептури IFR-покриттів з пролонгованим строком служби

шляхом використання мікрокапсульованого АРР [175], АРР з високим ступенем полімеризації [174], неорганічних домішок, що зменшують проникнення води [176]. Позитивний вплив на збільшення довговічності покриття спостерігали Wang зі співавт. [177] при заміні АРР на розширюваний графіт (EG).

Дослідження прискореного штучного вивітрювання дрібномасштабних сталевих пластин, покритих двома різними інтумесцентними покриттями на основі розчинників, були опубліковані Wang зі співавт. [178]. Для оцінки збереження властивостей покриття застосовувався дворазовий сценарій атмосферного впливу типу Z1 згідно з EAD 350402-00-1106. Випробування на вогнестійкість показали, що спучення та теплозахисні характеристики зменшувалися зі збільшенням часу витримки.

В роботах [179–181] було проаналізовано деградацію компонентів інтумесцентних покриттів на водній основі шляхом прискорених кліматичних та відповідних вогневих випробувань. Визначено, що найбільші зміни протягом штучного старіння відбуваються з АРР, МА та сполучною речовиною. Для вдосконалення початкової рецептури інтумесцентного покриття, що досліджувалося, АРР був замінений на інкапсульований АРР для уповільнення реакції МА та АРР. В свою чергу, замість РЕ використали дипентаеритрит, що, за твердженням авторів, покращило довговічність інтумесцентного вогнезахисту.

Gaston зі співавт. [182] встановили, що полімер у складі IFR-покриття першим зазнає негативних змін під впливом атмосферних чинників, з чого починається загальний процес деградації покриття. Розклад вінілацетатних і акрилових сполучних відбувається під впливом термічної енергії, енергії УФ випромінювання за рахунок радикальних механізмів окиснення з руйнуванням полімерних ланцюгів [183]. Процес деградації полімерного плівкоутворювача призводить до вимивання цільових компонентів IFR (АРР, МА, РЕ) та до зміни морфологічних властивостей покриття з утворенням мікро-, а згодом і видимих тріщин [184–186].

В дослідженні Häßler зі співавт. [44] вивчали зміни, що відбуваються в інтумесцентному покритті в умовах старіння Z₁. В умовах впливу помірних

температур та високої вологи, зі збільшенням циклів старіння (від 1 до 6), покриття зазнає візуальних змін, як це продемонстровано на рис. 1.9.

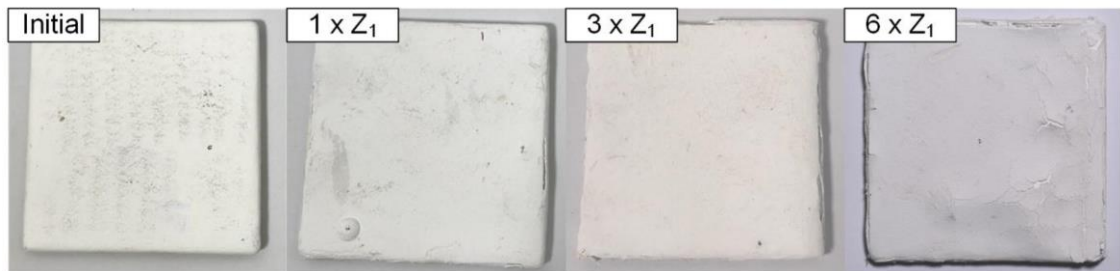


Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд водородчинного інтумесцентного покриття до та після штучного старіння [44]

Поява тріщин у покритті призводить до змін в хімічному складі та адгезії покриття, що відображається на вогнезахисній ефективності (зниження часу до досягнення критичної температури у вогневих випробуваннях), та характеристиках утвореного коксового шару (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд коксу водородчинного інтумесцентного покриття до та після штучного старіння [44]

Стимування процесу деградації інтумесцентних покриттів протягом експлуатації є комплексним завданням через їхню складну морфологію та багатоконпонентний склад [186, 187]. Існує два основних підходи подовження строку служби покриттів:

- модифікація рецептури покриття для збільшення його власної стійкості до атмосферних чинників;

- використання зовнішнього захисного покриття, яке служить бар'єром для впливу факторів середовища.

Практикується введення у склад покриття домішок (здебільшого неорганічної природи), які потенційно можуть підвищити термостійкість та стійкість покриття до атмосферних факторів [42, 176, 188]. З огляду на потенційний вплив таких змін в рецептурі інтумесцентного покриття на його вогнезахисну ефективність, такий підхід має обмежене застосування. Окрім того, правильний підбір полімерної матриці покриття може підвищити його стійкість до атмосферного впливу. Наприклад, використання полімерів, які при утворенні плівки покриття формують ковалентну сітку, розглядається як перспективний метод підвищення стійкості покриття до атмосферних впливів [177].

Використання захисних покриттів як фінішного шару для інтумесцентного вогнезахисту є розповсюдженою концепцією для підвищення бар'єрних властивостей і стійкості до атмосферних впливів [178, 189]. Фінішні покриття вважаються незамінними для забезпечення довгострокової вогнестійкості сталевих конструкцій при застосуванні на відкритому повітрі, де атмосферні умови більш жорсткі [189, 190].

Новітні технології виробництва інтумесцентних покриттів мають враховувати такий важливий аспект, як гарантування збереження вогнезахисних властивостей протягом тривалого строку експлуатації. Цей фактор значно знижує вартість обробки будівельних конструкцій. Тим не менш, інновації щодо пролонгування довговічності вогнезахисту залишаються на початковій стадії та потребують подальших досліджень для оптимізації рецептур матеріалів та компонентів покриття з метою збереження функціональних протипожежних характеристик [26]. Крім того, зростає необхідність розробки стандартизованих протоколів оцінки, які виходять за рамки випробувань показників вогнезахисної ефективності. Майбутні системи оцінки повинні охоплювати такі параметри, як трансформація складу покриття в процесі експлуатації, екологічний вплив на навколишнє середовище та

тестування на завершення терміну служби. Такі комплексні критерії оцінки є важливими для підтвердження довгострокової стійкості, безпеки, функціональності вогнестійких покриттів та забезпечують успішний перехід від лабораторної розробки покриттів реактивного типу до реального впровадження.

Висновки до розділу 1

Полімерна інтумесцентна система на основі поліфосфату амонію, меламіну та пентаеритриту є найбільш поширеною, економічно обґрунтованою та технологічно виправданою для ефективного вогнезахисту сталевих конструкцій. Механізм дії інтумесцентного вогнезахисту полягає у здатності в умовах високих температур формувати спінений коксовий шар, який зберігає конструкцію від впливу пожежі. Подальший розвиток та удосконалення вогнезахисної та техніко-економічної ефективності систем реактивного типу спрямовано за такими аспектами:

- підвищення ефективності для забезпечення межі вогнестійкості сталевих конструкцій 150–180 хв із мінімізацією товщини та вартості;
- підбір полімерної матриці, яка є реактивною в процесі формування коксового шару, забезпечує високу вогнезахисну ефективність і пролонгує строк служби;
- поліпшення технологічності нанесення шляхом удосконалення реологічних властивостей фарби;
- забезпечення екологічної безпеки композицій шляхом переважного використання водно-дисперсійних засобів вогнезахисту з виключенням галогенових антипіренів та інших токсичних компонентів відповідно до вимог регламенту REACH.

Механізм інтумесценції є гармонізованим процесом, що включає термічний розклад донора кислоти з подальшою дегідратацію поліолів та формуванням карбонізованого коксового шару. Виділення газоутворювачем

інертних та негорючих газів забезпечує утворення пористої теплоізоляційної структури. Ефективність та надійність інтумесцентного вогнезахисту визначається збалансованістю компонентного складу покриття як за природою хімічних сполук, так і за їх кількісним співвідношенням, що впливає на кінетику взаємодій в умовах пожежі.

Полімерна матриця є важливим компонентом інтумесцентної системи, що відіграє ключову роль у побудові стабільного коксового шару, регулюванні в'язкості розплаву та забезпеченні адгезійної міцності покриття до підкладки в умовах високих температур. Тип полімеру, його термічна стабільність та фізико-хімічні характеристики, а також наявність ковалентної сітчастої структури суттєво впливають на вогнестійкість, здатність до коксоутворення та атмосферостійкість інтумесцентного покриття.

Подальші дослідження з питань удосконалення вогнезахисних покриттів реактивного типу доцільно спрямувати на комплексну оптимізацію складу, регулювання реологічних характеристик, підвищення довговічності та експлуатаційної стійкості. Важливим напрямом є також розроблення та апробація стандартизованих лабораторних методик оцінювання вогнезахисної ефективності та експлуатаційних властивостей засобів вогнезахисту, що сприятиме прискоренню процедур впровадження продукції у виробництво та зменшенню витрат на повномасштабні випробування.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ, ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ, ЗАСТОСОВАНИХ В ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

Об'єкт дослідження – процеси формування вогнезахисних та реологічних властивостей інтумесцентних засобів вогнезахисту.

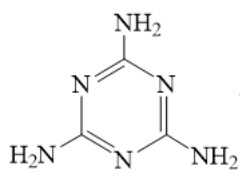
Предмет дослідження – технологія полімерного інтумесцентного покриття для сталевих конструкцій з вдосконаленими вогнезахисними та реологічними характеристиками.

2.1 Матеріали та обладнання, використані при проведенні експериментальних досліджень

2.1.1 Реактиви та матеріали

При проведенні експериментальних досліджень, як компоненти інтумесцентної системи, були використані реактиви, зазначені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Компоненти інтумесцентної системи

№	Назва/виробник	Формула	Рег. CAS №
1	2	3	4
1	Поліфосфат амонію Exolit AP 422 (Clariant, Німеччина)	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\ \parallel \quad \parallel \\ \text{O}-\text{P} \left[\text{O}-\text{P} \right]_n \text{O}- \\ \quad \\ \text{O}^- \quad \text{O}^- \\ \text{NH}_4^+ \quad \text{NH}_4^+ \end{array}$	68333-79-9
2	Пентаеритрит мікронізований Charmor PM40 (Perstorp Holding AB, Швеція)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{HOH}_2\text{C}-\text{C}-\text{CH}_2\text{OH} \\ \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$	115-77-5
3	Меламін (Borealis Agrolinz Melamine GmbH, Австрія)		108-78-1

Перелік полімерів, які були використані при виконанні експерименту, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Полімерні матеріали досліджених інтумесцентних систем

Хімічна структура співполімеру	Торгівельна назва	Скорочена назва	Рег. CAS №
Полімерні дисперсії			
Вінілацетат-етилен (Wacker, США)	Vinnapas® EZ 3010	EZ 3010	24937-78-8
Вінілацетат-етилен (Dairen Chemical Corporation, Китай)	Dairen DA 101	DA 101	24937-78-8
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат (Wacker, США)	Vinnapas® EZ 3112	EZ 3112	68604-30-8
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат (EOC Group, Бельгія)	Exodisp V2209	V2209	68604-30-8
Вінілацетат-етилен-вінілхлорид (Wacker, США)	Vinnapas® CEZ 3031	CEZ 3031	25085-46-5
Стирол-акрилат (Omnova Solutions, США)	Hydro Pliolite 211	H211	25085-34-1
Органорозчинні полімери			
Стирол-акрилат (Omnova Solutions, США)	Ньютонівський Pliolite AC80	AC80	25085-34-1
Стирол-акрилат (Omnova Solutions, США)	Неньютонівський Pliolite AC4	AC4	25085-34-1
Вінілхлорид-вінілацетат-вініловий спирт (Dow UCAR, США)	VAGH	VAGH	25086-48-0
Вінілхлорид-вінілацетат (Dow UCAR, США)	VYHH	VYHH	9003-22-9

Наноглини виробництва фірми ВУК Additives & Instruments (Німеччина) представлені бентонітовими силікатами (табл. 2.3). Класифікація наноглин проведена за технічними описами фірми-виробника ВУК-Chemie GmbH, Німеччина.

Таблиця 2.3 – Наноглини, використані в дослідженні

Наноглина	Опис
Гідрофобні глини	
Garamite 7305	Суміш алкілбензилдиметиламоній монтморилоніту $[Mg \cdot nH_2O](Al_{4-x}Mg_x) Si_8O_{20}(OH)_4$ та алкілбензилдиметиламоній сепіоліту $Mg_4(Si_6O_{15})(OH)_2 \cdot 6H_2O$
Tixogel MP 250	Бензил(гідрогенізований таловий алкіл)диметил амоній бентоніт $Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$
Clayton HY	Біс(гідрогенізований таловий алкіл)диметил амоній монтморилоніт $[Mg \cdot nH_2O](Al_{4-x}Mg_x) Si_8O_{20}(OH)_4$
Гідрофільні глини	
Laponite EP	Синтетичний силікат магнію, аналог гекторіту $CaO_3(Cr^{3+}, Mg^{2+}, Fe^{2+})_2 (Si, Al)_4 O_{10} (OH)_2 \cdot 4H_2O$
Optigel WA	Активований смектит – $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$
Optibent 987	Активований природній філосилікат (натрієвий монтморилоніт)
Optigel WX	Суміш активованої смектитової глини $Si_8Al_4O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$ з ксантановою смолою $(C_{35}H_{49}O_{29})_n$

Як целюлозні загусники досліджували етери целюлози, що наведені у табл. 2.4. Були досліджені найбільш поширені у виробництві фарб на водній основі целюлозні загусники: гідроксіетилметил целюлоза (HEMC-1 та HEMC-2) та гідроксипропілметил целюлоза (HPMC-1 та HPMC-2). Характеристика продукції наведена за технічними описами фірм-виробників.

Таблиця 2.4 – Етери целюлози, використані в дослідженні

Назва/Виробник	Формула	pH	В'язкість ¹⁾ , Па с
Bermocoll M 30, НЕМС-1 (Nouryon Chemicals AG, Нідерланди)	Гідроксиетилметил целюлоза	7,0–8,0	2,5–3,5
Bermocoll EM 7000 FQ, НЕМС-2 (Nouryon Chemicals AG, Нідерланди)	Гідроксиетилметил целюлоза	5,0–7,0	6,0–8,0
Wekcelo MAT 2024, НРМС-1 (April Manufacturer, Китай)	Гідроксипропілметил целюлоза	5,0–8,0	3,5–5,0
Mecellose FMC 8821, НРМС- 2 (Lotte Fine Chemical Co., Ltd, Південна Корея)	Гідроксипропілметил целюлоза	7,0–10,0	4,5–5,5

Примітка. ¹⁾ При 20 °С, 1 % розчин.

Властивості асоціативних загущувачів за даними відкритої та доступної технічної документації виробників продукції представлені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Асоціативні загущувачі, використані в дослідженні

Торгова назва (скорочення)	Виробник	Тип/Інтервал зсуву
Rheobuck-H 600 VF (R600)	ВУК-Chemie GmbH, Німеччина	HEUR, низький
Rheolate 255 (R255)	Elementis Specialties, Inc, США	HEUR, середній
Rheolate 278 (R278)	Elementis Specialties, Inc, США	HEUR, високий
Rheobuck-HV 80 (HV 80)	ВУК-Chemie GmbH, Німеччина	HASE, середній

Табл. 2.6 містить перелік пігментів, антипіренів, наповнювачів, реологічних домішок, які застосовувалися при створенні інтумесцентних композицій.

Таблиця 2.6 – Матеріали та реактиви, використані в дослідженні

Реактив	Виробник	Призначення
Діоксид титану Ti-Pure R-902	DuPont, США	Пігмент
Графіт, що термо- розширюється EG-250	Beijing Great WallCo Ltd, Китай	Інтумесцентна домішка
Мінеральні волокна Larinus FC-30, MS-605	Rockwool BV, Нідерланди	Армуюча домішка
Disperbyk 192	ВУК-Chemie GmbH, Німеччина	Диспергатор для водних фарб
Disperbyk 108	ВУК-Chemie GmbH, Німеччина	Диспергатор для органорозчинних фарб
Вук-035	ВУК-Chemie GmbH, Німеччина	Піногасник для фарб на водній основі
Mergal K14	Troy Corporation, США	Біоцид для водних фарб

Як об'єкт дослідження були також використані вогнезахисні фарби реактивного типу відомих світових брендів, які забезпечують клас вогнестійкості не менше R120 та імпортувалися в Україну останні 5 років (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Характеристики комерційних вогнезахисних фарб¹⁾

Фарба	Вміст нелетких речовин, %	Товщина покриття, мм ²⁾	L, мм ³⁾	N ⁴⁾ , не менше
Steelguard 651	70±3	5,79	1,00	8
Hensotherm 421 KS	72±3	4,47	0,70	9
Nullifire – SC801	69±2	5,20	1,20	7
Promapaint SC3	71±3	5,54	1,02	7

Примітка. ¹⁾З технічних специфікацій виробників. ²⁾Товщина покриття для забезпечення класу вогнестійкості R120 сталевих колон з коефіцієнтом перерізу $A_m/V=200 \text{ м}^{-1}$, зведена товщина $\sigma=5 \text{ мм}$. ³⁾Максимальна товщина мокрого шару фарби за один прохід, рекомендована виробником. ⁴⁾Кількість шарів фарби для забезпечення класу вогнестійкості R120

Фарби, що представлені у табл. 2.7 відносяться до водно-дисперсійних вогнезахисних засобів реактивного типу з практично ідентичним складом, що було доведено методом ІЧ-спектроскопії (рис. 2.1).

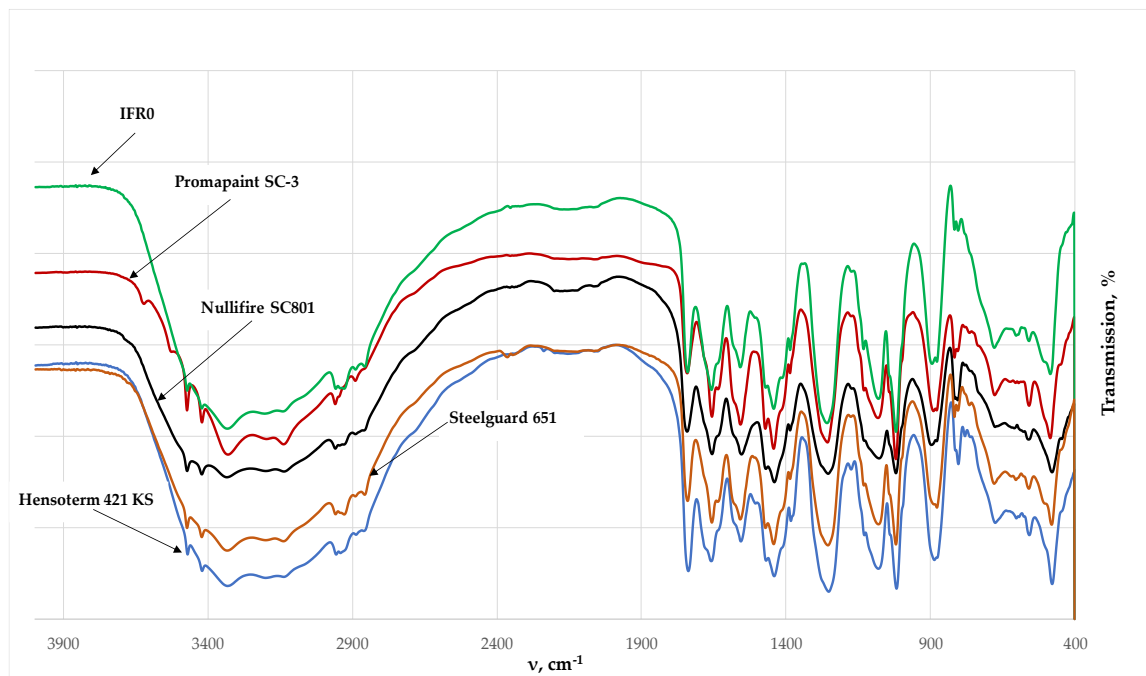


Рисунок 2.1 – ІЧ-спектри інтумесцентних покриттів (табл. 2.7).

На рис. 2.1 наведено також ІЧ-спектр базового інтумесцентного покриття складу APP/PE/MA/TiO₂/EVA (IFR0), що розробляється у цій роботі. За даними ІЧ-спектрів, представлених на рис. 2.1, очевидно, що склад IFR0 є максимально наближеним до рецептур комерційних покриттів реактивного типу (табл. 2.7). Більш детально вогнезахисні та реологічні властивості комерційних фарб на водній основі розглянуто в роботі [47].

2.1.2 Обладнання та прилади

Для виконання експериментальних досліджень застосовували наступне обладнання та допоміжні матеріали: шафа сушильна-термостатична СТ-100С (ТОВ «Ріва-Сталь», Україна, сертифікат калібрування UA/24/241120/4166 від 20.11.2024 р. ДП «Укрметртестстандарт»); рН-метр SevenCompact pH/Ion S220

(Mettler-Toledo AG, Швейцарія, сертифікат калібрування UA/36/241211/004348 від 11.12.2024 р. ДП «Укрметртестстандарт»); лабораторну установку водопідготовки RO-4 (Werner, Німеччина); скануючий електронний мікроскоп (SEM) четвертого покоління Tescan Mira 3 LMU (Tescan, Чехія). ІЧ-спектроскопічні випробування проводили на приладі Bruker Tensor 37 FT-IR (Bruker, Німеччина) в області 400–4000 cm^{-1} . Термогравіметричні дослідження здійснювали на приладі для диференційно-термічного (ДТА) та термогравіметричного (ТГА) аналізу на приладі «Thermoscan-2» (TA Instruments, Китай). Дослідження реологічних властивостей інтумесцентних фарб здійснювали на ротаційному реометрі Brookfield DV-III («Brookfield Engineering Laboratories, Inc., США). Визначення товщини реактивного покриття здійснювалось з використанням магнітного товщиноміру Qnix1500 (Automation Dr.Nix GmbH & Co, Німеччина). Для вогневих випробувань використовувався автоматичний вимірювально-реєструючий комплекс АВРК «TEST-1».

Вогневі випробування та визначення строку експлуатації розроблених покриттів були проведені за державними стандартами ДСТУ Б В.1.1-14:2007, ДСТУ EN 60332-3-21:2013, ДСТУ EN 1363-1:2023 та ДСТУ EN 16623:2015.

2.2 Приготування полімерних інтумесцентних композицій IFR

Методики приготування полімерних інтумесцентних композицій та їх дослідження наведені в роботах [42, 43].

2.2.1 Приготування інтумесцентних композицій з водними дисперсіями полімерів

Для приготування інтумесцентних композицій в лабораторний дисольвер об'ємом 1 дм^3 додавали воду, диспергатор та TiO_2 . Суміш перемішували протягом 15 хв. Додавали компоненти інтумесцентної системи: АРР, РЕ, МА, піногасник в передбачених кількостях. Суміш перемішували

протягом 30 хв при швидкості фрези 900–1000 об/хв. До отриманої пасти додавали відповідну водну дисперсію полімеру та перемішували при швидкості фрези 500–600 об/хв. протягом 30 хв. Готову інтумесцентну фарбу зберігали у герметичній ємності.

Порядок додавання загущувача був таким. Етери целюлози та наноглини додавали у суміш на першій стадії разом з водою та перемішували 15 хв до утворення прозорої рідини. Потім у суміш додавали диспергатор та TiO_2 і отримували інтумесцентну фарбу згідно з методикою.

HEUR та HASE загущувачі додавали в інтумесцентну композицію дуже повільно на останній стадії після додавання водної дисперсії полімеру. Потім фарбу перемішували при швидкості фрези 500–600 об/хв протягом 30 хв.

2.2.2 Приготування інтумесцентних композицій з органорозчинними полімерами

В лабораторний дисольвер об'ємом 1 дм³ поміщали компоненти інтумесцентної системи: APP, PE, MA, TiO_2 за необхідних співвідношень та необхідну кількість 30 % розчину співполімеру Pliolite (чи суміші полімерів). Суміш перемішували протягом 60 хв за швидкості фрези 900–1000 об/хв. Готову інтумесцентну композицію (IFR) зберігали у герметичній ємності.

При приготування інтумесцентних композицій з наноглинами останні додавали в композицію разом з твердими компонентами. Органорозчинні інтумесцентні композиції, які використовували для вогневих випробувань готували із застосуванням додатково диспергатора, загущувача та інших необхідних домішок.

2.3 Визначення в'язкості інтумесцентних фарб за Брукфілдом

Вимірювання динамічної в'язкості здійснювали на ротаційному реометрі Brookfield DV-III. Визначення були проведені із залученням

шпинделей №6 або №7 (sp N6 або sp N7 відповідно) при 20 °С в металевому циліндрі ємністю 1000 см³ (діаметр 9,5 см, висота 15 см). Перед вимірюваннями фарбу у кількості 900 г ретельно перемішували, наливали у циліндр, який поміщали у термостат. Після досягнення фарбою 20 °С шпиндель занурювали у зразок фарби до маркувальної лінії. В режимі поступового збільшення швидкості обертів шпинделя від 1 до 250 об/хв фіксували значення динамічної в'язкості на кожному кроці вимірювань. Після досягнення максимальної швидкості поступово зменшували швидкість обертів шпинделю до початкової, знову фіксуючи значення динамічної в'язкості.

Прилад Brookfield DV-III, на якому проводилися вимірювання, забезпечує максимальну швидкість обертів шпинделю 250 об/хв, що в перерахунку на швидкість зсуву γ відповідає 52,25 с⁻¹. Мінімальне значення швидкості зсуву γ (с⁻¹), яке забезпечує прилад Brookfield DV-III, складає 0,209 с⁻¹. Необхідно стандартизувати час і швидкість попереднього перемішування перед кожним виміром, та застосовувати шпиндель однієї конфігурації.

В'язкість при нульовій швидкості зсуву (η_0 , Па·с) є теоретичним параметром, який характеризує стан матеріалу в умовах мінімального зсуву (стан спокою). Значення η_0 оцінювали при швидкості обертів шпинделю N=3 об/хв ($\gamma=0,627$ с⁻¹). Отримане в таких умовах значення в'язкості є наближеним до η_0 . При зменшенні швидкості обертів шпинделю до 1 чи 2 об/хв результати вимірювань відтворюються з великою похибкою. Для кожного зразка фарби реологічні випробування проводили два рази, кінцеві графіки та розрахунки є результатом обробки усереднених даних.

2.4 Визначення седиментації твердих компонентів

В пластикovu ємність поміщали 500 г вогнезахисної фарби та залишали на зберігання протягом 6 міс. в затемненому місці при температурі 20±5 °С.

Після витримки зразків визначали висоту прозорої рідини l_1 (мм), що збирається над поверхнею основної маси фарби. Деякі приклади цього експерименту представлені на рис. 2.2.



IFR без загущувача



IFR з НЕМС

Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд зразків вогнезахисних фарб після витримки протягом 6 місяців

2.5 Визначення провисання фарби після нанесення

Провисання фарби після нанесення визначали згідно з методикою, описаною [191]. Металевим аплікатором наносили фарбу заданою товщиною на дві біло-чорні картонні картки. Після чого картки миттєво переводили у вертикальне положення під кутом 90° та через 5 год вимірювали довжину максимальної відстані, яку проходить нанесена фарба по поверхні картону (l_2 , мм – середнє значення, отримане з двох зразків).

Візуалізація експерименту з визначення довжини провисання фарб наведена на рис. 2.3 для фарби Steelguard 651, що була нанесена товщинами 1,5, 2,0 та 2,5 мм.

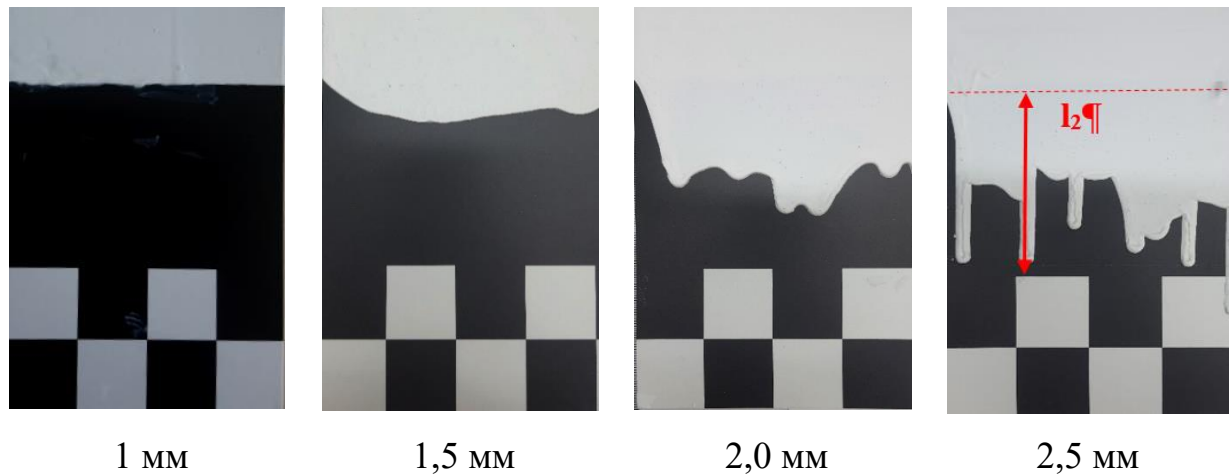


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд експериментальних зразків з визначення провисання фарби Steelguard 651, що була нанесена з різною товщиною мокрого шару (1,0-2.5 мм)

2.6 Визначення об'ємного коефіцієнта спучення, K (см³/г)

Вогнезахисну фарбу масою 2 г розміщували у металевій формі. Фарбу висушували при температурі не вище 40 °С до постійної маси. Форму з покриттям вносили до електрошафи, нагрітої до температури (340±5) °С, та витримували протягом 20 хв. Визначали середнє значення висоти спученого шару матеріалу (h) у кожному зразку.

За отриманими результатами розраховували об'ємний коефіцієнт спучення K (см³/г) за формулою:

$$K = 0,125 \pi d^2 (h_1/m_1 + h_2/m_2) \quad (2.1),$$

де d – діаметр форми, см; h_1, h_2 – середня висота спученого шару першого та другого зразку, см; m_1, m_2 – маса першої та другої наважки матеріалу, г.

У разі поетапного вивчення формування коксового шару в інтервалі температур 200-800 °С зразок інтумесцентного покриття витримується при фіксованій температурі протягом 20 хв, визначається значення K та втрата маси зразка (Δm). Наступні визначення K та Δm цього ж зразка здійснюють при більш високій температурі.

2.7 Визначення вогнезахисної ефективності покриттів

2.7.1 Вогневі випробування за методом «пальника Бунзена»

Цей тест застосовується для порівняння швидкості зростання температури сталевієї пластини, на яку нанесені різні інтумесцентні склади (IFR), під впливом полум'я газового пальника (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Схема приладу «пальник Бунзена»

Зростання температури на зворотному боці сталевієї пластини контролюється та реєструється з використанням трьох термопар К-типу (100–1250 °С) та автоматизованої вимірювальної системи АВРК «TEST-1». Для вогневого впливу використовується газовий пальник з діаметром запального отвору 40 мм, а відстань від сопла пальника до сталевієї пластини складає 70 мм. В експериментальних умовах було встановлено, що температура полум'я пальника досягає 950–1100 °С [46].

Для проведення експерименту в умовах «пальника Бунзена» були підготовлені сталеві пластини 150×150×3 мм з встановленими термопарами. З боку дії полум'я на поверхню пластини наносили ґрунтувальне покриття ГФ-021 середньою товщиною 80±10 мкм та інтумесцентну композицію заданою товщиною. Пластини витримували за температури 20±3 °С не менше 10 діб [46]. Товщину покриттів вимірювали за допомогою магнітного товщиноміра Qnix1500. В умовах «пальника Бунзена» визначали швидкість та ступінь спучування інтумесцентних композицій, ступінь адгезії утвореного коксового шару до підкладки (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Візуалізація вогневих випробувань за методом «пальника Бунзена»: а) вихідний зразок; б) вигляд спученого шару в процесі експерименту; в) вигляд спученого шару після випробувань

За цими показниками та за зростанням температури на зворотній частині пластини протягом певного часу робили порівняльну оцінку між зразками інтумесцентних покриттів для вибору оптимальної рецептури для повномасштабних випробувань [192].

2.7.2 Вогневі випробування в міні-печі

Для проведення вогневих випробувань пластину розміром 300×300×5 мм встановлюють в отвір печі. Контроль параметрів стандартного температурного режиму пожежі та реєстрацію температури на необігрітій поверхні пластини здійснюють із використанням термопар К-типу та автоматизованого вимірювального комплексу АВРК «TEST-1». Принципова схема міні печі та візуалізація експерименту наведені на рис. 2.6 [46] та рис. 2.7. Метод випробувань регламентований в ДСТУ EN 16623:2015 [193].

Для проведення вогневих випробувань вогнезахисні фарби наносили на заґрунтовану ґрунтувальним покриттям ГФ-021 (середньою товщиною 80±10 мкм) та інтумесцентну композицію заданої товщини. Пластини висушували протягом 21 доби при температурі не менше 15 °С та використовували для подальших досліджень.



Рисунок 2.6 – Схема приладу «міні-піч»

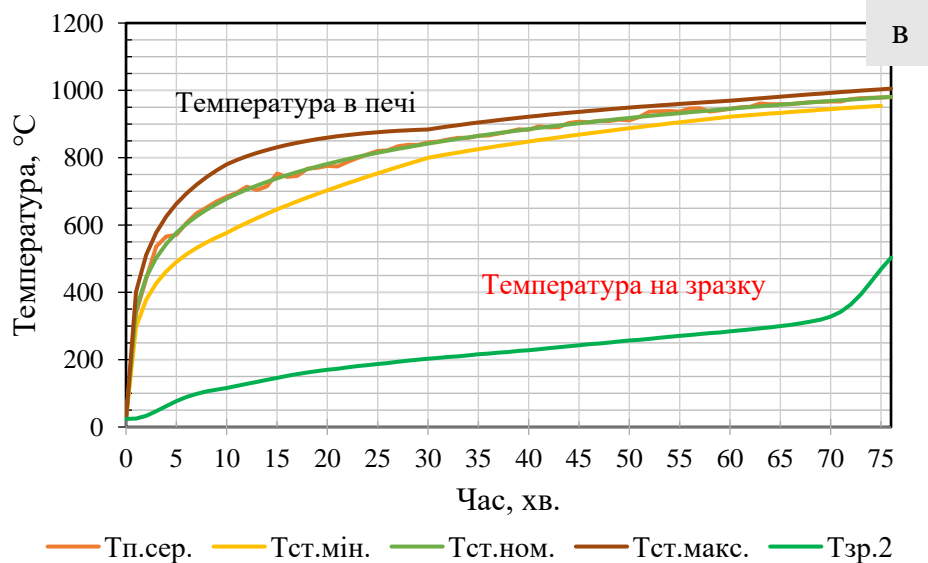


Рисунок 2.7 – Вогневі випробування у міні-печі в умовах «стандартної пожежі»: а) міні-піч; б) вигляд спученого шару після випробувань протягом 70 хв; в) реєстрація залежності температури на зворотному боці пластини від часу дії вогню

Про проведені вогневих випробувань у міні-печі визначають межу вогнестійкості сталевих пластин в режимі стандартної чи вуглеводневої пожежі, яка добре корелює з майбутніми вогневими випробуваннями у повномасштабних печах згідно з національними стандартами [192]. Густина, цілісність та адгезія до підкладки спученого шару також може бути підставою для прогнозування результатів щодо вогнезахисної ефективності реактивного покриття.

2.8 Математична обробка результатів

Для визначення реологічних параметрів інтумесцентних фарб з прогнозуванням в'язкості матеріалу в умовах високих зсувів була використана математична модель Кассона для неньютонівських рідин [194, 195]:

$$\eta^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + \tau_0^{1/2} / \gamma^{1/2} \quad (2.2)$$

Це рівняння дає змогу визначити такі параметри: межу текучості (τ_0 , Па), яка відповідає швидкості зсуву $\gamma \rightarrow 0$, зсувну в'язкість (η_{∞} , Па·с), що дорівнює в'язкості, визначеній на приладах ІСІ [198] в умовах високих швидкостей зсуву. Лінеаризація даних в координатах $\eta_{\infty}^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$, як це продемонстровано на рис. 2.8, дозволяє визначити η_{∞} зі значення перетину прямої з віссю Y та τ_0 через значення тангенсу кута нахилу прямої до вісі X.

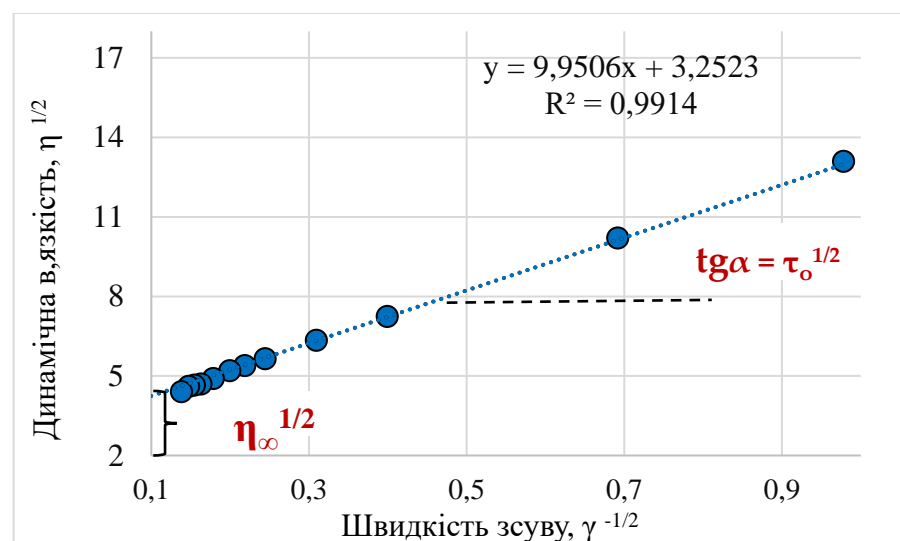


Рисунок 2.8 – Залежність в координатах $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ для інтумесцентної фарби

Модель Кассона для описання реологічного профілю, отриманого з використанням реометра Brookfield DV-III, є вдалою та коректною. Кореляційний та регресійний аналіз, проведений за рівнянням (2.2), виявляє високі коефіцієнти кореляції (R^2 0,970-0,999) для досліджених лінійних залежностей $\eta^{1/2}$ від $\dot{\gamma}^{-1/2}$.

Висновки до розділу 2

Визначено матеріали, обладнання та методики проведення експериментальних досліджень з вивчення впливу структури полімерної складової, реологічних модифікаторів та армувальних домішок на вогнезахисну ефективність, експлуатаційні властивості та технологічність нанесення покриттів реактивного типу.

Для отримання інтумесцентних композицій та покриттів, що досліджені у дисертаційній роботі, було використано реактиви та матеріали, які є поширеною комерційною сировиною для промислового виробництва полімерних вогнезахисних фарб реактивного типу.

У роботі застосовано сучасні фізико-хімічні методи досліджень та технічні захисні засоби, що забезпечили точність, коректність та надійність отриманих результатів. Зокрема, використання сучасних методів аналізу, таких як ІЧ-спектроскопія, скануюча електронна мікроскопія, термогравіметричний та рентгенофазовий аналіз, дозволило детально вивчити структуру і фізико-механічні властивості інтумесцентних покриттів. Вогневі випробування та визначення строку експлуатації розроблених покриттів були проведені за державними стандартами ДСТУ Б В.1.1-14:2007, ДСТУ EN 60332-3-21:2013, ДСТУ EN 1363-1:2023 та ДСТУ EN 16623:2015, що підвищує практичне та прикладне значення результатів дослідження.

В дослідженні використано сучасні методи статистичного аналізу, достовірність яких підтверджуються високими кореляційними параметрами.

Результати експериментальних досліджень описані в публікаціях: [42, 43, 47, 113, 196–199].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПОКРИТТЯ РЕАКТИВНОГО ТИПУ З ПІДВИЩЕНОЮ ВОГНЕЗАХИСНОЮ ЕФЕКТИВНІСТЮ

Науково-теоретичні та патентні дослідження щодо складу інтумесцентних вогнезахисних систем, які представлені у розд. 1, однозначно свідчать, що комбінація поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит є однією з ефективних та розповсюджених інтумесцентних основ для засобів вогнезахисту. Найбільш невизначеним питанням щодо обов'язкових компонентів IFR є природа та кількість полімеру, як у водних так і органорозчинних фарбах. Враховуючі важливу роль полімерної складової, як реагенту для побудови коксового шару, можна очікувати суттєвий вплив полімеру на підвищення вогнестійкості, термостійкості коксового шару, збільшення строку служби, зниження екологічних ризиків за рахунок переходу на водно-дисперсійні матеріали.

Метою цього розділу є вивчення впливу структури полімерів та допоміжних компонентів на вогнезахисну ефективність інтумесцентних систем поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит для створення конкурентоздатного промислового реактивного покриття, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій R більше 150 хв.

3.1 Алгоритм випробувань вогнезахисної ефективності при розробці рецептури покриття

Основною функцією інтумесцентного покриття є забезпечення будівельним конструкціям ступеню вогнестійкості, яка класифікується за такими параметрами: R – несуча здатність; I – теплоізоляційна здатність; E – цілісність. Характеристики R, I, E визначають шляхом повномасштабних випробувань, які вимагають дорогого обладнання, тривалого часу і супутніх значних витрат. Тому в наукових дослідженнях застосовуються розрахункові методи визначення вогнестійкості та інші непрямі експериментальні методи, такі як конус-калориметрія, термогравіметричний аналіз (TGA), визначення

індексу кисню (LOI), встановлення V-рейтингу (UL-94) тощо. [13, 200, 201]. Недоліки непрямих методів прогнозування вогнезахисної ефективності IFR пов'язані, перш за все, з кардинальною різницею між тепловими умовами реальної пожежі та режимами теплової дії на покриття, які здатне створити обладнання фізико-хімічних методів дослідження [202]. Крім того, в умовах кон-калориметрії чи TGA-досліджень із застосуванням зразків мінімальної маси неможливо оцінити фізико-механічні властивості основного фактору вогнезахисту – вуглецевого шару в частині міцності, структурування, густини, величини спучення, адгезії до підкладки, ступеню руйнування.

Тому моделювання поведінки IFR покриття в умовах зростання температур за обраними сценаріями пожежі з аналізом утвореного вуглецевого шару на відчутному за розміром та масою зразку є більш достовірним методом прогнозування ефективності IFR. Процес спучення покриття з утворенням теплоізоляційного коксу, що представлено на рис. 3.1, описується послідовними стадіями, температурний режим яких було визначено та узагальнено із залученням робіт [13, 203].

В загальному випадку експериментальні результати, що були отримані у цій роботі здійснювалися за алгоритмом, описаним на рис. 3.2.

Параметри вогнезахисної ефективності, що були застосовані у подальших дослідженнях, мають такі визначення:

- Межа вогнестійкості R (хв) – інтервал часу від початку вогневого стандартного випробування зразків до виникнення одного із граничних станів елементів та конструкцій. В цьому дослідженні за граничний стан сталевих конструкцій приймається досягнення зразком температури $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Об'ємний коефіцієнт спучення (K_v , $\text{см}^3/\text{г}$) розраховується як відношення об'єму спученого шару до початкової маси покриття, з якого утворився цей шар.
- Лінійний коефіцієнт спучення (K_i) визначається як відношення висоти спученого шару до початкової товщини покриття.

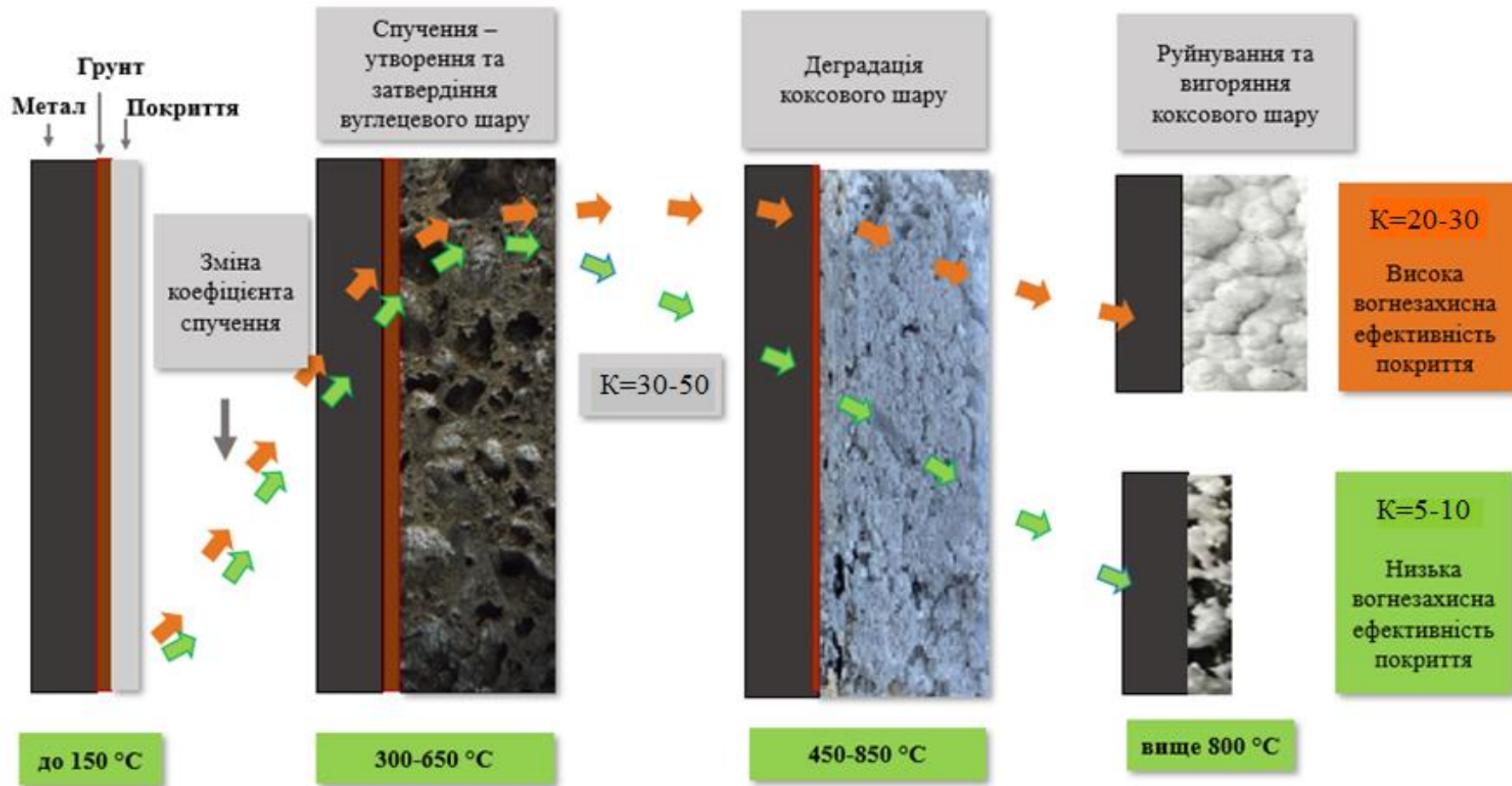


Рисунок 3.1 – Температурний режим формування коксового шару



Рисунок 3.2 – Алгоритм випробувань вогнезахисної ефективності у процесі розробки рецептури інтумесцентного покриття

Дослідження у такій послідовності, як це буде продемонстровано далі, дозволяють швидко та без зайвих витрат розробляти рецептури ефективних інтумесцентних покриттів з необхідними параметрами вогнезахисної ефективності.

3.2 Вплив полімеру на вогнезахисну ефективність покриття

Для дослідження впливу полімеру на вогнезахисну ефективність інтумесцентного покриття було складено рецептури IFR водно-дисперсійних та органорозчинних фарб, які представлені у табл. 3.1. Як полімерна складова були використані полімери, структура яких наведена у табл. 2.2.

Таблиця 3.1 – Склад компонентів (мас. %) в інтумесцентній фарбі

Склад IFR	Водно-дисперсійна	Органорозчинна
Полімер	10 ¹⁾	10
APP	25	26
МА	8	10
РЕ	10	10
TiO ₂	12	9
Домішки ²⁾	5	5
Розчинник	30	30

Примітка. ¹⁾ Вміст чистого полімеру; ²⁾ диспергатор, загущувач, піногасник.

Вогнезахисна ефективність композицій була досліджена згідно з алгоритмом, що представлений на рис. 3.2: визначення коефіцієнту об'ємного спучення (K_1 , см³/г) у термошафі при 340 °С; дослідження спучення в умовах пальника Бунзена; визначення межі вогнестійкості (R_1) та об'ємного коефіцієнта спучення (K_2 , см³/г) в міні-печі; проведення натурних вогневих випробувань за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (межа вогнестійкості R_2), визначення лінійного коефіцієнту спучення (K_i). В табл. 3.2 наведені результати цих досліджень для покриттів з товщиною (1,70±0,15) мм. Для проведення натурних вогневих випробувань за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 використовувались сталеві двотаврові колони зі зведеною товщиною 5,1 мм (section factor $A_m/V=196$ м⁻¹) з чотирьохстороннім обігрівом.

Таблиця 3.2 – Результати дослідження вогнезахисної ефективності інтумесцентних покриттів IFR

№ IFR	Полімер	$K_1, \text{см}^3/\text{Г}$	$R_1, \text{хв}$	$K_2, \text{см}^3/\text{Г}$	$R_2, \text{хв}$	$K_i^{1)}$	$T_d^{2)}$
Фарби на водній основі							
IFR1	EZ 3010	42	35	38	59	42	249
IFR2	EZ 3112	45	41	40	62	46	256
IFR3	CEZ 3031	64	30	24	44	23	211
IFR4	H211	35	28	18	35	21	231
Органорозчинні фарби							
IFR5	AC80	40	23	15	32	5	207
IFR6	AC80+AC4	43	36	25	48	34	229
IFR7	VAGH	56	41	46	52	38	200
IFR8	VYHH	62	37	26	44	30	208

Примітка. ¹⁾ Лінійний коефіцієнт спучення. ²⁾ Температура початку термодеградації полімеру, визначена TGA-методом.

Результати досліджень (табл. 3.2) свідчать, що структура полімеру критично впливає на досягнення кінцевого результату – забезпечення певної межі вогнестійкості сталевій конструкції (R_2 , хв). Так найкращий результат демонструє покриття IFR2, що містить у своєму складі співполімер вінілацетат-етилен-вінілверсатат ($R_2=62$ хв), що майже у 2 рази перевищує значення R_2 для покриття IFR5 на основі стиролакрилатного сполучного ($R_2=32$ хв, табл. 3.2).

Слід також зауважити, що випробування на пальнику Бунзена продемонстрували загальну тенденцію покриття із стиролакрилатним полімером AC80 (IFR5, табл. 3.2) до плавлення та стікання спученого шару з металевої підкладки (рис. 3.3, а). Використання суміші ньютонівського співполімеру AC80 із неньютонівським AC4 у співвідношенні 3:1 (IFR6, табл. 3.2) суттєво долає цю ситуацію (рис. 3.3, б). Очевидно, що для повного усунення стікання потребується додаткова модифікація складу IFR6 антипіреновими домішками для підвищення в'язкості розплавленого шару перед його коксуванням.

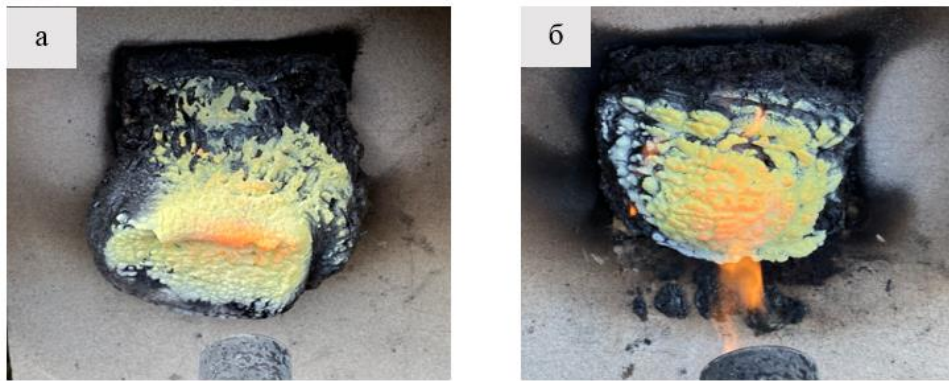


Рисунок 3.3 – Стан інтумесцентних покриттів при спалюванні на пальнику Бунзена: а) IFR5; б) IFR6

Для визначення зміни коефіцієнта спучення K в інтервалі 200-800 °C було проведено поетапне вивчення морфології вуглецевого шару, як описано в експериментальній частині. На рис. 3.4 представлені залежності об'ємного коефіцієнта спучення (K) інтумесцентних композицій з різними полімерами (табл. 3.2) від температури.

За отриманими результатами (рис. 3.4) досліджені полімери логічно поділяються на три групи, що відрізняються перебігом процесу спучення, а відповідно й фізико-механічними властивостями побудованих вуглецевих шарів:

- негалогеновані вінілацетатні співполімери, що утворюють IFR1 та IFR2. Згідно із утворенням та спученням вуглецевого каркасу (K , рис. 3.4) основні хімічні процеси в IFR1 та IFR2 починаються після 350 °C та перебігають в інтервалі температур 350–650 °C. Покриття IFR1 та IFR2 характеризуються тривалою стабілізаційною ділянкою сталості коефіцієнта спучення K (інтервал 350–650 °C, рис. 3.4);
- галогеновані вінілацетатні співполімери, що містяться в композиціях IFR3, IFR7, IFR8. Ці покриття характеризуються більш раннім (< 300 °C) та стрімким спученням (K , рис. 3.4) зі скороченою стабілізацією K в інтервалі 350–500 °C. Спостерігається посилене виділення оцтової кислоти за рахунок кислотного каталізу з боку утвореного HCl, що провокує зниження температури розпаду полімеру, насичує коксовий шар леткими речовинами, призводять до надмірного спучення і, як наслідок, зниження фізико-механічних властивостей та передчасного руйнування вуглецевого каркасу;

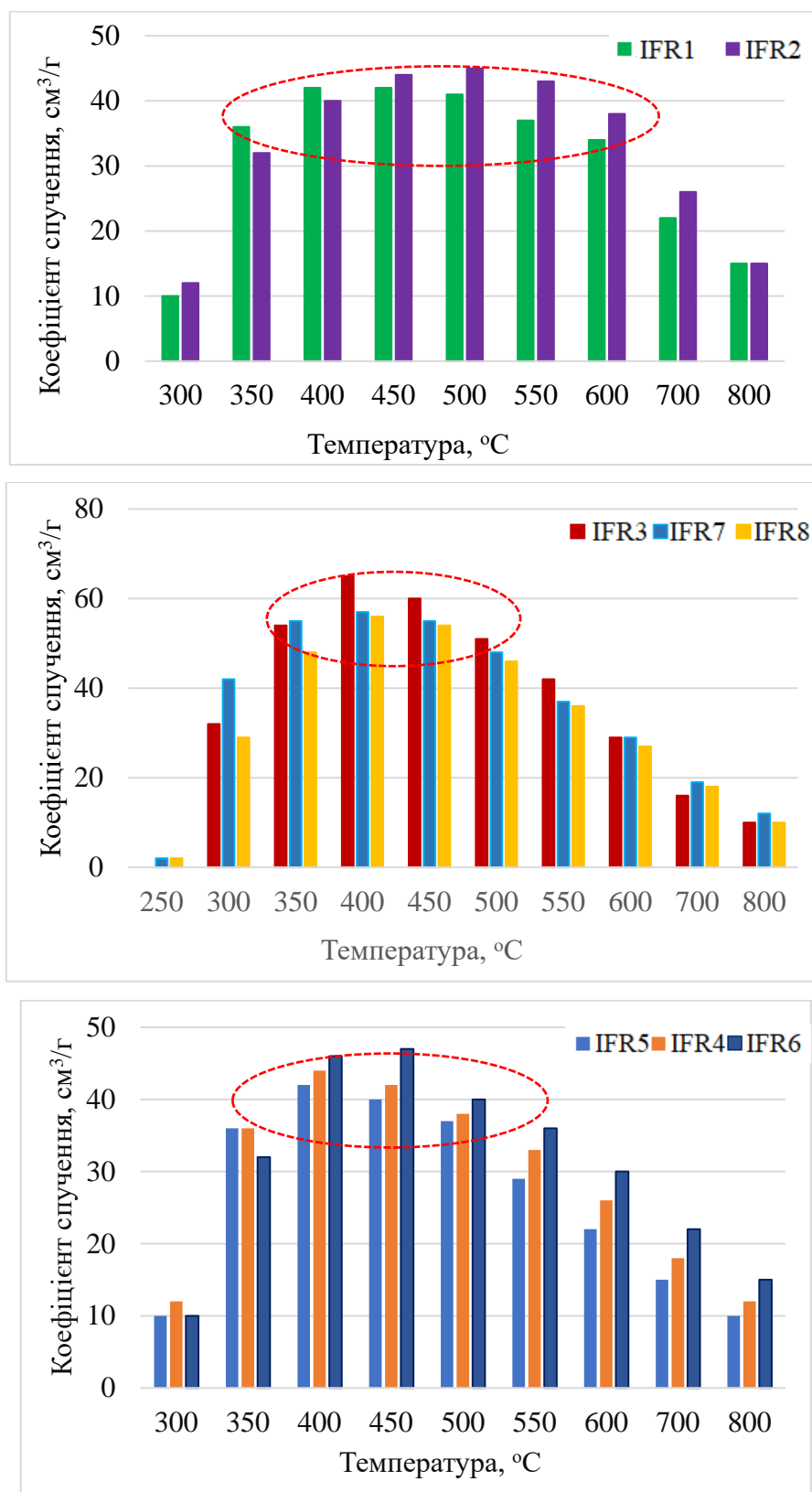


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта спучення K (cm^3/g) інтумесцентних композицій від температури T ($^\circ\text{C}$)













- стиролакрилатні полімери в покриттях IFR4, IFR5, IFR6 також демонструють скорочення стабілізаційної ділянки коефіцієнта K до 500 °C. Термодеструкція цих полімерів відбувається за один основний крок від 340 до 450 °C з одночасним відщепленням фрагментів акрилової кислоти, їх декарбоксілюванням та розщепленням ланцюга безпосередньо в летючі мономери.

Залежність коефіцієнта спучення K від температури (рис. 3.4) дозволяє позиціонувати негалогеновані вінілацетатні співполімери, як найкращий вибір полімерної складової для IFR з причини утворення стабільних вуглецевих шарів, які розкладаються при більш високих температурах, ніж інші досліджені (табл. 3.2) IFR.

Зовнішні вигляди коксових шарів для кожної означеної групи полімерів, що були отримані у процесі виконання експериментальних досліджень, представлені в табл. 3.3. Незалежно від умов випробувань в структурах коксового спученого шару досліджених композицій спостерігаються суттєві відмінності: регулярний, щільний і дрібнопористий каркас спостерігається при використанні в IFR негалогенованих вінілацетатних співполімерів EZ 3010 та EZ 3112. Ця тенденція зберігається й при проведенні повномасштабних вогневих випробувань – двотавр в кінці випробувань, як правило, є вкритим щільним та регулярним спученим шаром з відмінною адгезією до підкладки (табл. 3.3). IFR, які містять стиролакрилатні полімери H211 та AC80, в свою чергу, формують більш легкі каркаси пористої структури, які є не стабільними після 600 °C. За результатами випробувань за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 після 40 хв спостерігається вигорання та руйнування захисного каркасу майже повністю для IFR5, та значні дефекти в покритті IFR6 (табл. 3.3).

Коксові шари IFR з галогенованими вінілацетатними співполімерами характеризуються найбільшими коефіцієнтами спучення, але мають рихлу структуру з великими порожнинами. В умовах повномасштабних випробувань покриття, що містять галогеновані вінілацетатні співполімери (CEZ 3031, VAGH, VYHH) демонструють пухкі каркаси з локальними вигораннями та руйнуваннями (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Вигляд вуглецевих шарів в різних умовах випробувань

Витримка у термошафі	Випробування у міні-печі	Випробування за ДСТУ Б В.1.1-14:2007
IFR2, вінілацетат-етилен-вінілверсатат		
		
IFR5, ньютонівський стирол-акрилат		
		
IFR6, суміш ньютонівський+неньютонівський стирол-акрилати		
		
IFR8, вінілхлорид-вінілацетат		
		

Примітка. ¹⁾Для повномасштабних випробувань було використано фарби за удосконаленими рецептурами табл. 3.2 з додатковим вмістом антипіренів та модифікаторів

Основною причиною різних показників межі вогнестійкості R є різниця в механізмах термічної деградації досліджених співполімерів. На рис. 3.5 представлені ІЧ-спектри композицій IFR1 (з вінілацетатним полімером EZ 3010) та IFR5 (зі стиrolакрилатним полімером AC80) після витримки при заданих температурах в інтервалі 350–700 °С.

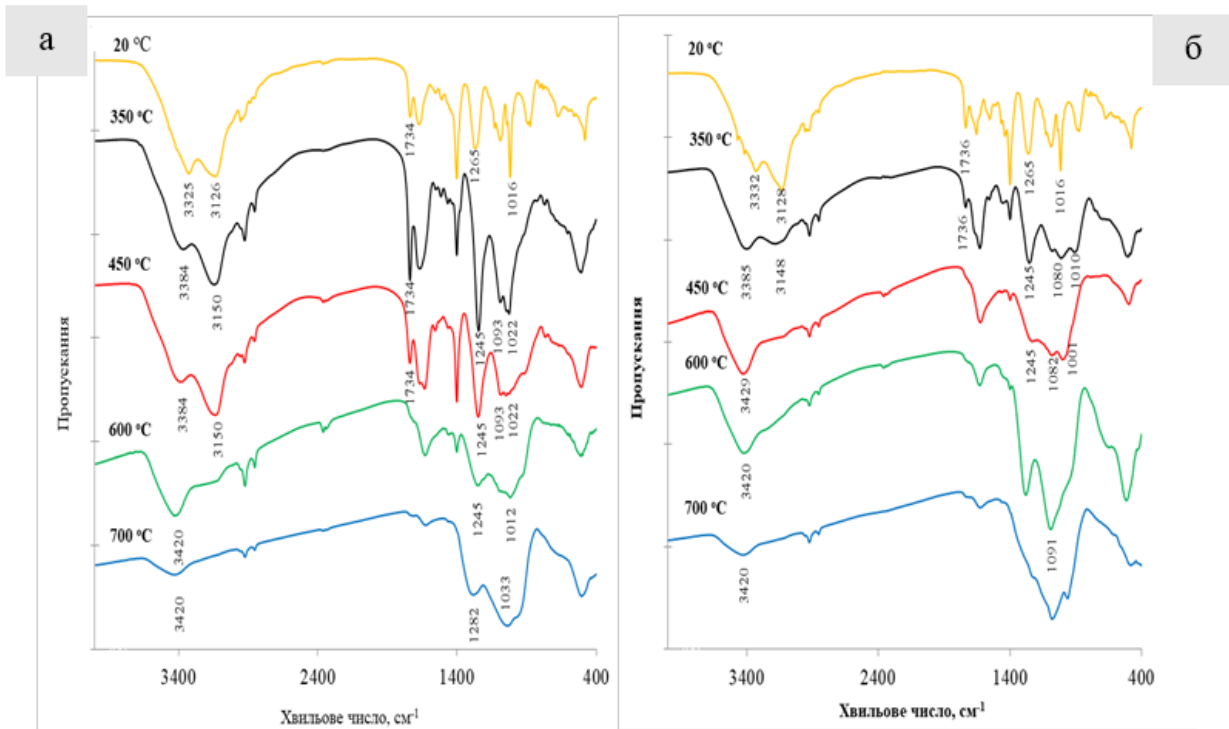


Рисунок 3.5 – ІЧ-спектри коксових залишків інтумесцентних систем при різних температурах: а – IFR1; б – IFR5

Звертає на себе увагу той факт, що пік поглинання карбонільної групи полімеру вінілацетату EZ 3010 (1734 см^{-1}) зникає лише при 600 °С (рис. 3.5, а). В той час, як полоса поглинання співполімеру стиrolакрилату AC80 (1730 см^{-1}) не виявляється у спектрі вже при 450 °С (рис. 3.5, б). В загальному випадку для IFR5 зі стиrolакрилатним полімером хімічні перетворення відбуваються при більш низьких температурах, а коксовий залишок при 700 °С є більш вичерпаним та окисленим.

Для подальшого вибору оптимальних для інтумесцентного вогнезахисту полімерних складових слід однозначно виключити галогенові полімери, як

джерело край шкідливих речовин в умовах пожежі. Що стосується стиролакрилатних органорозчинних полімерів, то слід зазначити, що на світовому ринку полімерів край важко знайти аналогічні бюджетні замінники, які здатні утворювати висококонцентровані (до 30 %) лакові напівпродукти для отримання високонаповнених (до 80 % нелетких речовин) інтумесцентних фарб низького цінового сегменту.

3.3 Оптимізація рецептури інтумесцентної системи з високими показниками вогнестійкості

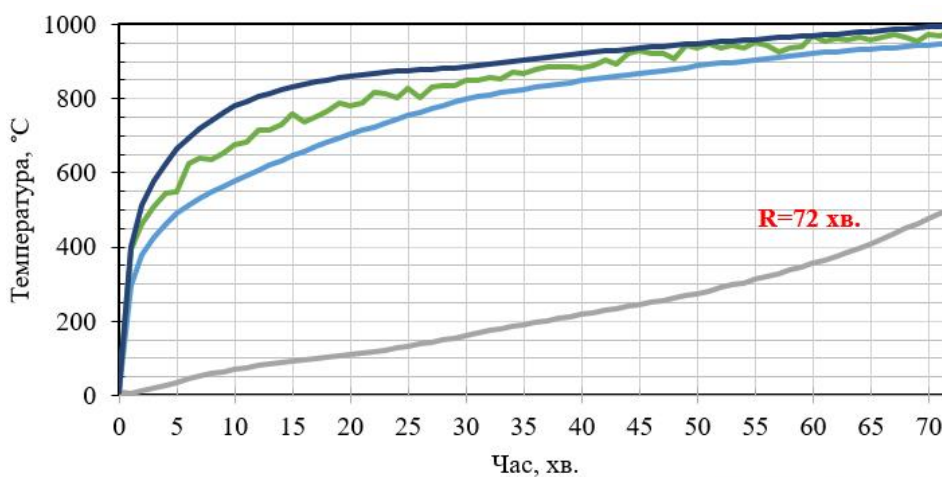
3.3.1 Співвідношення основних компонентів інтумесцентної системи

В роботі [56] було встановлено, що співвідношення та кількість основних компонентів IFR – APP, MA та PE є інструментом регулювання межі вогнестійкості сталевій конструкції, яке забезпечує реактивне покриття на основі цієї IFR. Для розробки IFR покриття підвищеної вогнезахисної ефективності, що забезпечує $R \geq 150$ хв, було проведено варіювання співвідношення донора кислоти (APP), газоутворювача (MA) та карбонізуючого агента (PE). Рецептури досліджених зразків IFR наведено у табл. 3.4, вміст полімерної складової EZ 3010 представлений у вигляді основної речовини (без води). Як домішки в IFR використовували диспергатор Disperbyk 192 (2 мас. %), піногасник Вук-035 (1,5 мас. %), наноглину Optigel WA (1,5 мас. %). Вогнезахисну ефективність покриттів IFR1–IFR7 визначали в умовах міні-печі (методика 2.7.2, розд. 2). Товщина покриттів складала $(3,5 \pm 0,21)$ мм. Випробування проводили в умовах стандартної пожежі. Приклад такого випробування для зразка IFR4 представлено на рис. 3.6.

Аналіз результатів табл. 3.4, дозволяє визначити покриття з найвищою вогневою ефективністю: IFR4 (APP:MA:PE=3,6:1:1,8, $R_1=72$ хв); IFR7 (APP:MA:PE=3,5:1:1,5, $R_1=64$ хв); IFR3 (APP:MA:PE=3,2:1:1,7, $R_1=54$ хв).

Таблиця 3.4 – Склад (мас. %) інтумесцентних композицій

Компоненти	APP	MA	PE	TiO ₂	EZ 3010	Вода	Домішки	R ₁ , хв
IFR1	24,5	9,1	10,9	10	9,9	30,6	5	45
Співвідношення	2,7	1	1,2	1,1	1,1			
IFR2	24,9	8,3	16,6	9,5	10	25,7	5	39
Співвідношення	3	1	2	1,1	1,2			
IFR3	24,9	7,8	13,3	9,6	10,4	29,0	5	54
Співвідношення	3,2	1	1,7	1,2	1,3			
IFR4	24,5	6,8	12,2	10	10,2	31,3	5	72
Співвідношення	3,6	1	1,8	1,5	1,4			
IFR5	25,5	5,1	10,2	10,2	10,8	33,2	5	36
Співвідношення	5	1	2	2	2,1			
IFR6	25,9	14,8	7,4	9,8	10,3	26,8	5	38
Співвідношення	2	2	1	0,7	0,7			
IFR7 [56]	26,5	7,5	11,3	10	10	34,7	5	65
Співвідношення	3,3	1	1,5	1,3	1,3			



— Т зразка **IFR4**
— Т_{мін}
— Т в печі
— Т_{мах}
K_i = 23



Рисунок 3.6 – Залежність температури зразка від температури полум'я та зовнішній вигляд коксових залишків IFR (табл. 3.4) після випробувань у міні печі

Близьке до традиційного співвідношення APP:МА:РЕ=2,7:1:1,2 в IFR1 забезпечує межу вогнестійкості металевієї пластини $R_1=44$ хв. Незбалансоване збільшення частки APP до співвідношення APP:МА:РЕ=5:1:2 (IFR5) чи меламіну в IFR6 (APP:МА:РЕ=2:2:1) значно знижує ефективність вогнезахисту до 36 хв та 38 хв відповідно.

За висновками дослідження [56] співвідношення компонентів, застосоване в рецептурі IFR7, забезпечує межу вогнестійкості R120 сталевих колон за ДСТУ Б В.1.1-14:2007 (зведена товщина металу $\delta=5,1$ мм, коефіцієнту перерізу $A_m/V=196$ м⁻¹). Спираючись на результати вогневих випробувань, слід очікувати, що реактивне покриття, виготовлене на основі IFR4, має забезпечити показник вогнестійкості більше R120.

Покриття IFR1–IFR7 містять у своєму складі наноглину Optigel WA у кількості 1,5 мас %. Детально вплив глини на вогнезахисну ефективність IFR, який полягає в утворенні полімерних композитів та нанокompозитів, розглянуто у розд. 4.3, а також у роботі [43]. За статистикою проведених вогневих випробувань, встановлено, що для створення рецептур покриттів, що забезпечують клас вогнестійкості більше R120 додавання наноглини у необхідній кількості є одним із безальтернативних підходів, який забезпечує утворення міцного та стабільного у часі теплозахисного вуглецевого шару.

3.3.2 Армування коксового шару

При товщині шару інтумесцентного покриття понад 3 мм, яка зазвичай необхідна для забезпечення класу вогнестійкості сталевих конструкцій, що перевищує R90, під час тривалого впливу вогню, об'ємний коксовий шар втрачає свою адгезію, фізико-механічні властивості та руйнується через нездатність утримувати власну вагу. З метою зміцнення теплоізоляційного спученого шару здійснювали введення в IFR двох типів мінеральних армувальних волокон Lapinus CF50 та Lapinus MS605. Ці марки волокон були обрані як найбільш ефективні для створення захисного коксового шару на

основі результатів попередніх випробувань [42, 56]. Застосовані волокна розрізняються температурами розкладання, а відповідно й впливом на механізм дії при створенні коксового шару. Lаріnus CF зберігає термічну стабільність своєї структури до температури приблизно до 750 °С, а продукти термолізу можуть реагувати з компонентами IFR з утворенням полімерних композитів та термостійких фрагментів обвугленого реактивного покриття. Волокна Lаріnus MS, в свою чергу, зберігають свою форму при температурі вище 1000 °С та надають фізичне армування утвореному вугіллю. Ці властивості волокон CF та MS у складі IFR підтверджуються даними залежності об'ємного коефіцієнта спучення (методика 2.6, розд. 2) від вмісту волокна в інтумесцентній композиції IFR4 (рис. 3.7).

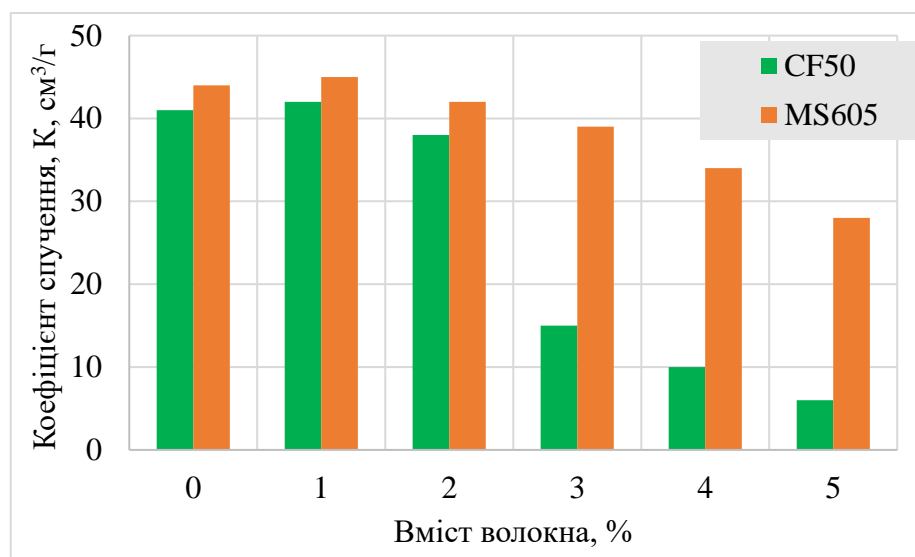


Рисунок 3.7 – Залежність об'ємного коефіцієнта спучення від вмісту волокна Lаріnus CF50 та Lаріnus MS605 в інтумесцентній композиції IFR4

Реакційноздатні волокна CF50 у кількості більше 2 % суттєво знижують значення K (см³/кг). Така ситуація пояснюється хімічним складом мінерального волокна (SiO_2 – 39,8 %, CaO – 32,8 %, Al_2O_3 – 19,0 %, MgO – 5,2 %), яке складається з оксидів кремнію та металів. Відомо [22, 43], що надлишок таких речовин в IFR пригнічує спучення вогнезахисної системи за рахунок інгібування газовиділення, а також утворення між полімером, APP, TiO_2 та оксидами волокна високов'язкого тугоплавкого полімерного

композиту, не здатного до активного набухання. Волокна MS605, в свою чергу, виконують роль армувальної домішки, яка при умові розшарування по об'єму реактивного покриття надає коксовому шару додаткові зшивання, підвищує термостійкість та міцність коксу до тиску полум'я. Тому для підвищення ефективності дії волокон Larinus логічно застосовувати їх суміш у кількостях, які не критичні для значення коефіцієнта спучення.

В табл. 3.5 представлені результати з впливу типу та кількості волокна Larinus на межу вогнестійкості R_1 , яку забезпечує волокно, додане в інтумесцентну композицію IFR4 (розд. 3.3.1, APP:MA:PE=3,6:1:1,8). Випробування здійснювали у міні-печі за методикою 2.7.2 (розд. 2).

Таблиця 3.5 – Вогнезахисна ефективність покриття IFR4 у присутності волокна Larinus

Назва композиції	Товщина покриття, мм	Вміст Larinus, мас. %		R_1 , хв
		CF50	MS605	
IFR4	1,64	-	-	36
IFR4-CF50	1,69	2,0	-	42
IFR4-MS605	1,60		2,0	45
IFR4-CF50/MS605	1,62	1,0	1,0	50

Найбільш ефективна суміш волокон (CF50:MS605=1:1) підбиралася експериментально і становила 2,8 % в інтумесцентній системі IFR4. Саме така кількість волокна забезпечує формування міцного та регулярного коксового шару, стійкого до тривалих вогневих впливів. Вміст волокна на рівні 5 % суттєво знижує спучення реактивного покриття, що ілюструється на рис. 3.8. За даними табл. 3.5 слід констатувати позитивний вплив волокна Larinus на межу вогнестійкості R_1 , який зростає в ряду $CF50 < MS605 < CF50+MS605$.

Додавання суміші Larinus CF50 та Larinus MS605 у водно-дисперсійну фарбу реактивного типу, виготовлену на основі IFR4, дозволяє застосовувати інтумесцентне покриття для сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі. Окрім цільових компонентів (табл. 3.4), до складу IFR4 додавали диспергатор, піногасник, суміш CF50/MS605, наноглину та фосфорвмісний

антипірен в необхідних кількостях. Тут і далі хімічну структуру та вміст окремих нецільових компонентів інтумесцентного покриття, що розробляється й має умовну назву IFR-S, буде розкрито в обсязі, достатньому для розуміння суті та наукової ідеї дисертаційної роботи.



Рисунок 3.8 – Вигляд коксових шарів покриття IFR4, що містить суміш CF50+MS605, після вогневих випробувань у міні-печі: а) вміст волокна 2,8 %, коефіцієнт спучення $K_1=34$, межа вогнестійкості $R_1=52$ хв; б) вміст волокна 5,2 %, $K_1=14$, межа вогнестійкості $R_1=36$ хв; в) умови вуглеводневої пожежі, вміст волокна 2,8 %, коефіцієнт спучення $K_1=42$, межа вогнестійкості $R_1=19$ хв. Товщина вихідного покриття $1,80\pm 0,15$ мм.

На рис. 3.9 продемонстровано порівняння вогнезахисної ефективності покриття IFR-S та відомого імпортного покриття, призначеного для вогнезахисту при впливах вуглеводневої пожежі, Chartek 1709 (виробництво AkzoNobel, Нідерланди). Дослідження були проведені при одночасному випробуванні у міні печі (методика 2.7.2, розд. 2). Товщина сухого шару покриттів складала: IFR-S – $(1,25\pm 0,10)$ мм; Chartek 1709 – $(1,29\pm 0,13)$ мм.

За даними вогневих випробувань (рис. 3.9) слід констатувати, що різниця ефективності покриттів IFR-S ($R_1=19$ хв) та Chartek 1709 ($R_1=18$ хв) не перевищує похибку експерименту. Цей факт дає змогу прогнозувати, що значення межі вогнестійкості, які здатне забезпечити покриття IFR-S в умовах вуглеводневої пожежі, ідентичні показникам вогнезахисної ефективності покриття Chartek 1709, яке є визнаним брендом на світовому ринку вогнезахисту.

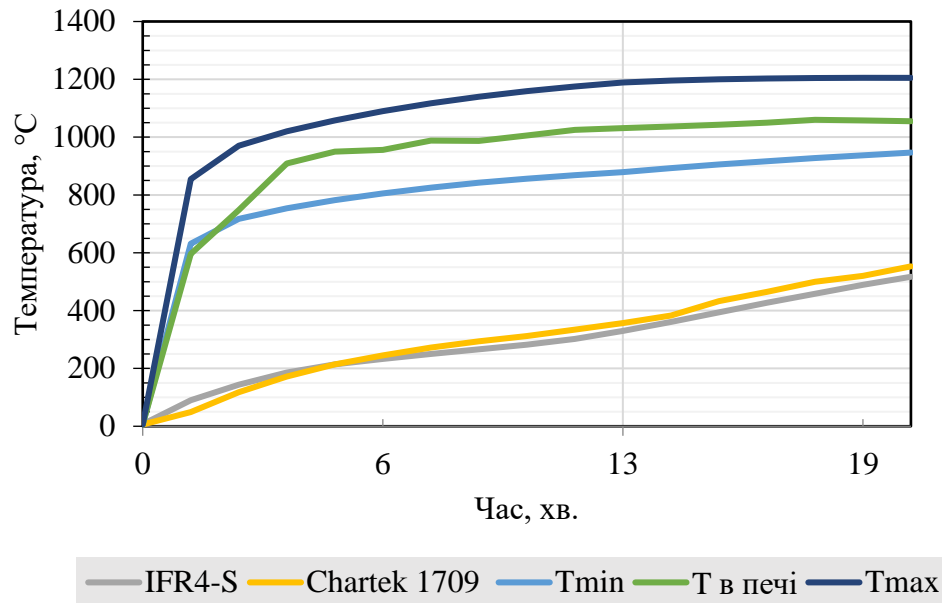


Рисунок 3.9 – Залежність температури зразків металевих пластин з покриттями IFR-S та Chartek 1709 від температури у міні печі

Можливість застосування розробленого покриття для вогнезахисту будівельних конструкцій, що експлуатуються в потенційних умовах виникнення вуглеводневої пожежі, має велике практичне значення для національної протипожежної галузі. По-перше, в Україні відсутні захисні засоби вітчизняного виробництва з підвищеною до $R > 150$ хв вогнестійкістю, які можливо також використовувати в умовах вуглеводневої пожежі. Такі реактивні покриття необхідні для вогнезахисту критично важливих об'єктів будівництва та інфраструктури – об'єктів оборонної та військової інфраструктури, атомних електростанцій, нафтопереробних підприємств, тощо. По-друге, саме відбудова цих об'єктів є першочерговим завданням глобальної програми повоєнного відновлення України та забезпечення її енергонезалежності.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено та апробовано алгоритм прямих лабораторних методів для прогнозування та підтвердження вогнезахисної ефективності

інтумесцентних композицій у процесі розроблення оптимальних рецептур і технологій. Прийнятність та коректність запропонованого поетапного дослідження вогнезахисних властивостей засобів вогнезахисту реактивного типу підтверджена результатами повномасштабних вогневих випробувань, проведених відповідно до національних стандартів.

2. Досліджено вплив вінілацетатних та стирол-акрилатних співполімерів на межу вогнестійкості сталевих конструкцій зі зведеною товщиною на рівні 5,1 мм ($A_m/V=196 \text{ м}^{-1}$), яку здатні забезпечити інтумесцентні покриття складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит товщиною до 2 мм. Встановлено, що для створення покриттів з високим показником вогнестійкості ($R>60$ хв) доцільно використовувати водні полімерні дисперсії вінілацетатного типу (вінілацетат-етилен, вінілацетат-етилен-вінілверсатат та їх аналоги). Доведено, що застосування комбінації ньютонівських та неньютонівських стирол-акрилатних органорозчинних полімерів підвищує вогнезахисну ефективність покриттів лише до межі вогнестійкості R 60 хв.

3. Визначено, що для розроблення покриття реактивного типу, що характеризується межею вогнестійкості більше 120 хв співвідношення компонентів інтумесцентної тріади APP:MA:PE повинно бути у межах 3,6:1:1,8.

4. Доведено, що модифікація складу інтумесцентних покриттів сумішшю мінеральних волокон з різною температурою розкладання зміцнює фізико-механічні властивості теплоізоляційного коксового шару та підвищує вогнезахисну ефективність покриття на 10–20 %, завдяки хімічній модифікації та фізичному армуванню утвореного коксу. Додавання суміші Larinus CF50 та Larinus MS605 у фарбу на водній основі з вінілацетатним співполімером дозволяє застосовувати відповідне інтумесцентне покриття для сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях: [42, 43, 113, 199, 204, 205].

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РЕОЛОГІЧНОГО ПРОФІЛЮ ВОГНЕЗАХИСНИХ ФАРБ ІНТУМЕСЦЕНТНОГО ТИПУ

Вогнезахисні фарби та покриття повинні зберігати технологічну придатність на всіх стадіях життєвого циклу: під час виробництва – для ефективного диспергування компонентів і фасування продукції, у процесі зберігання – без проявів седиментації, при нанесенні – із забезпеченням стабільної роботи технологічного обладнання, а також на стадії формування покриття на поверхні підкладки без провисань, патьоків та інших дефектів. Перелічені характеристики, так само як і максимально допустима товщина мокрого шару за один прохід, значною мірою визначаються реологічною поведінкою вихідної лакофарбової композиції.

Оскільки більшість лакофарбових матеріалів належать до неньютонівських систем, їх в'язкість залежить від прикладеної напруги або швидкості зсуву. Основні технологічні процеси – виробництво, зберігання та нанесення – описуються такими реологічними параметрами, як швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (с^{-1}), напруга зсуву τ (Па), межа текучості τ_0 (Па), за якої починається пластична деформація матеріалу, в'язкість системи у стані спокою η_0 (Па·с), в'язкість при певній швидкості зсуву η (Па·с) та в'язкість за високих швидкостей зсуву η_∞ (Па·с).

Аналіз наукової літератури свідчить про відсутність систематизованих досліджень, присвячених реології інтумесцентних лакофарбових матеріалів. У зв'язку з обмеженістю чисельних даних щодо в'язкості та напруги зсуву фарб реактивного типу наразі практично відсутня можливість прогнозування оптимальних реологічних параметрів (τ_0 , η_0 , η_∞) для таких композицій.

Основною метою досліджень, представлених у цьому розділі, є визначення ефективних систем загушення інтумесцентних фарб на основі поліфосфату амонію, меламіну, пентаеритриту, діоксиду титану та полімерних зв'язувальних з метою формування реологічних характеристик, які забезпечують нанесення матеріалу з максимально можливою товщиною мокрого шару за один прохід.

4.1 Реологія комерційних вогнезахисних фарб для сталевих конструкцій

4.1.1 Визначення параметрів реології за рівнянням Кассона

Аналіз великої вибірки тонкоплівкових лакофарбових матеріалів, виконаний у дослідженнях [146, 148, 206], дозволив створити узагальнені рекомендації щодо оптимальних усереднених параметрів реології (τ_0 , η_0 та η_∞), які відповідають вимогам сучасного виробництва, зберігання та нанесення архітектурних фарбових покриттів (табл. 4.1). Товщина бездефектного мокрого покриття при таких реологічних параметрах складає 0,3–0,5 мм.

Таблиця 4.1 – Реологія архітектурних фарб на різних етапах обробки [146, 148, 206]

Етап обробки покриття	Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$, c^{-1}	В'язкість, $\text{Па}\cdot\text{c}$	Напруга зсуву, Па
Зберігання (низький зсув)	10^{-4} – 10^{-1} c^{-1}	$\eta_0 > 50$	$\tau_0 > 1$
Нанесення пензлем (середній зсув)	10^{-1} – 10 c^{-1}	$\eta_\infty > 2.5$	$\tau_0 > 1$
Нанесення механізованим методом (високий зсув)	10^3 – 10^6 c^{-1}	$\eta_\infty \sim 0,1-0,3$	$\tau > 0,25$
Висихання з вирівнюванням і мінімальним провисанням (середній зсув)	10^{-1} – 10 c^{-1}	$\eta_0 \sim 5-10$; $\eta_\infty > 1.5$	$\tau > 0,25$
Виробництво, дисперсія твердих речовин (високий зсув)	10^3 – 10^4 c^{-1}	$\eta_0 \sim 25-50$	$\tau_0 \sim 0,5$

Метою цієї частини досліджень є визначення оптимальних реологічних показників комерційних вогнезахисних фарб реактивного типу, що забезпечують нанесення матеріалу з максимальною товщиною мокрого шару.

Комерційні фарби, що досліджувалися (табл. 2.7), представлені на ринку України протягом останніх п'яти років. Вони мають певний рейтинг технологічності та допустимих товщин при нанесенні, сформований на основі оцінок виконавців робіт з вогнезахисної обробки металевих конструкцій. За їхніми відгуками найбільш якісне нанесення без провисань та розбризкування з найбільшою товщиною мокрого шару (2–2,5) мм за один прохід забезпечує фарба Promapaint SC3. Фарби Steelguard 651 та Hensotherm 421 KS дозволяють отримувати бездефектне покриття з максимальною товщиною мокрого шару (0,7–0,8) мм та (1,0–1,2) мм відповідно. Отримані результати корелюють зі значеннями динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних фарб, які були визначені експериментально на приладі Brookfield (рис. 4.1).

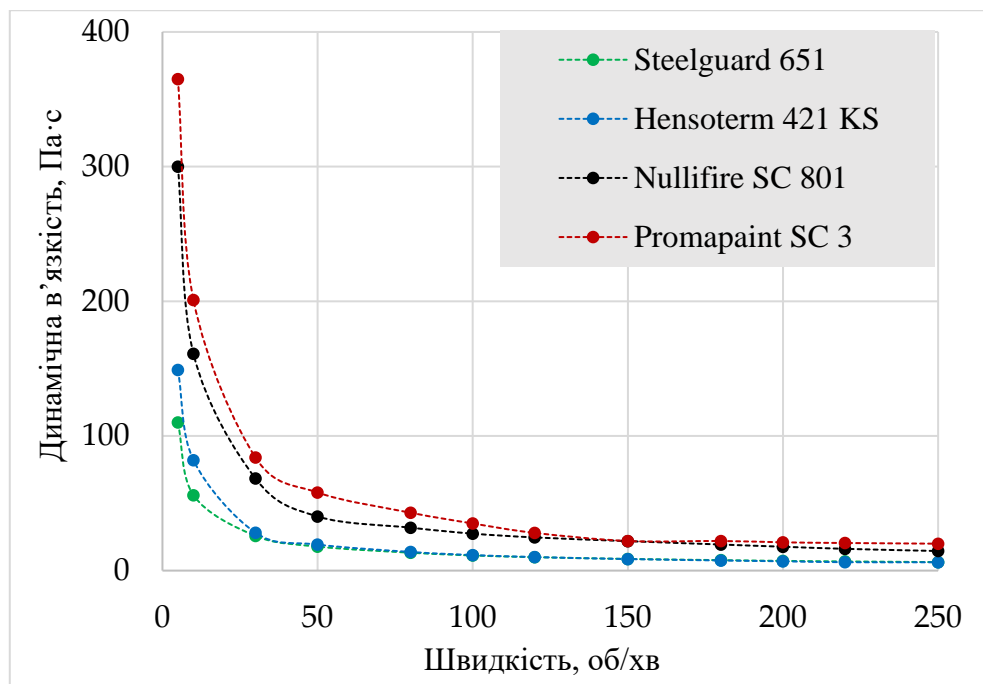


Рисунок 4.1 – Значення динамічної в'язкості комерційних вогнезахисних фарб (табл. 2.7) при збільшенні обертів шпинделю

Лінеаризація отриманих результатів за рівнянням Кассона (2.2), що продемонстрована на рис. 4.2, дозволяє визначити основні реологічні

параметри досліджених фарб: межу текучості (τ_0 , Па) та в'язкість при високих швидкостях зсуву (η_∞ , Па·с), значення яких наведені у табл. 4.2. Слід зауважити, що в науковій літературі описана низка відомих математичних моделей для опису течії неньютонівських рідин, наприклад, моделі Бінгема, Гершеля-Балклі, Кассона [207, 208] тощо. В рамках цього дослідження для визначення реологічних параметрів високонаповнених вогнезахисних фарб інтумесцентного типу були протестовані всі згадані вище моделі. Модель Кассона для описання реологічного профілю, отриманого з використанням реометра Brookfield, виявилась найбільш вдалою та коректною, про що свідчать високі коефіцієнти регресії та кореляції (R^2 0,989-0,996, табл. 4.2).

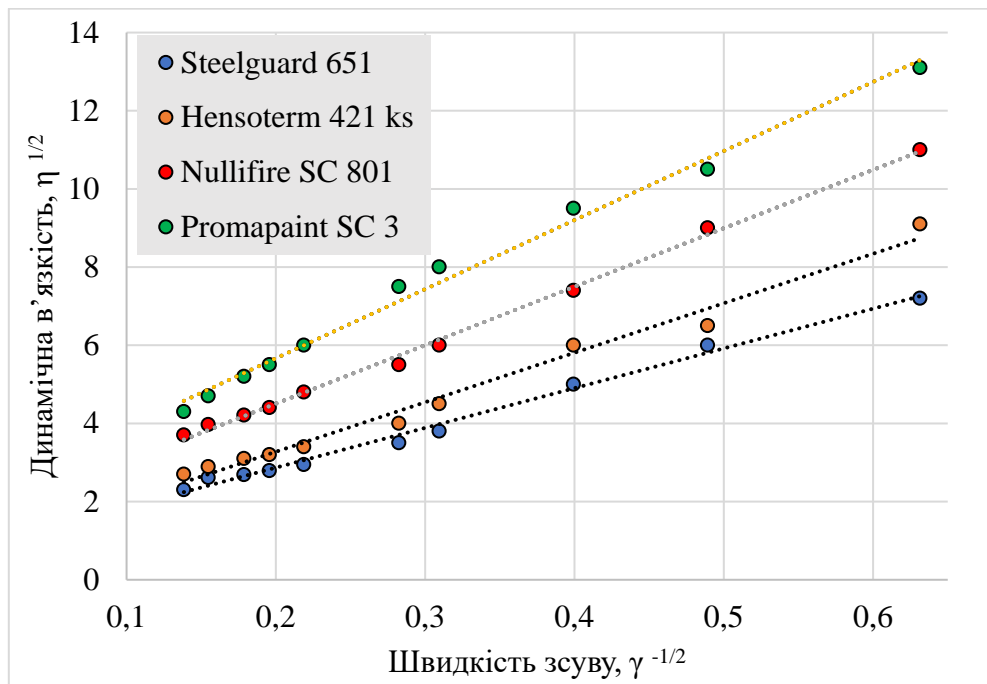


Рисунок 4.2 – Лінеаризація даних з в'язкості комерційних вогнезахисних фарб за рівнянням Кассона

Значення τ_0 та η_∞ є відповідальними за якість нанесення фарби на металеві конструкції (табл. 4.2). Саме ці параметри обумовлюють ступінь провисання та стікання фарби, які з'являються зі збільшенням товщини мокрого покриття.

Товщину шару мокрого покриття (d , мм, табл. 4.2) досліджених комерційних фарб, яку можливо нанести за один прохід з формуванням бездефектного покриття (без провисань, розтріскувань та кратероутворення у процесі сушіння) визначали шляхом натурального нанесення.

Таблиця 4.2 – Параметри реології комерційних вогнезахисних фарб

Фарба	η_0 , Па·с	η_∞ , Па·с	τ_0 , Па	R^2	d , мм	d_1 , мм
Steelguard 651	138±8,6	1,39±0,07	97±6	0,989	0,7–0,8	≤ 1
Hensoterm 421 KS	167±13	1,74±0,18	138±7	0,991	0,8–1,0	≈ 1-1,2
Nullifire SC 801	340±24	2,99±0,18	254±14	0,996	1,5–1,8	≤ 1,8
Promapaint SC3	456±34	4,41±0,32	309±11	0,990	2,0–2,3	> 2

Нанесення проводили на вертикально розташовані металеві пластини розміром 100x100 см агрегатом безповітряного фарбування з високим тиском Graco Mark V. Методом «гребінки» вимірювали максимальну товщину мокрого шару (d , табл. 4.2). За цими результатами досліджені фарби можливо умовно розділити на три групи: фарби, товщина мокрого шару яких складає до 1 мм за один прохід (Steelguard 651, Hensoterm 421 KS); фарба, яка може бути нанесена товщиною мокрого шару не менше 1,5 мм за один прохід (Nullifire SC 801); фарба, товщина мокрого шару якої може бути більшою ніж 2 мм за один прохід (Promapaint SC3). Ця градація співпадає з товщинами максимального нанесення (значення d_1 , табл. 4.2), наданими українськими виконавцями робіт з вогнезахисної обробки на об'єктах будівництва.

Досліди з визначення седиментації за методикою 2.4 (розд.2) демонструють відсутність помітного осідання твердих компонентів протягом 6 місяців для досліджених комерційних фарб ($I_1=0$). Результати з визначення провисання фарб, що були отримані за методикою 2.5 (розд. 2), представлені на рис. 4.3.

Досліджені комерційні інтумесцентні вогнезахисні фарби демонструють чітку кореляцію між ключовими реологічними параметрами (η_0 , η_∞ , τ_0) і

технологічними характеристиками – можливістю зберігання без седиментації, стійкістю реактивного покриття після нанесення та максимальною товщиною мокрого шару без дефектів.

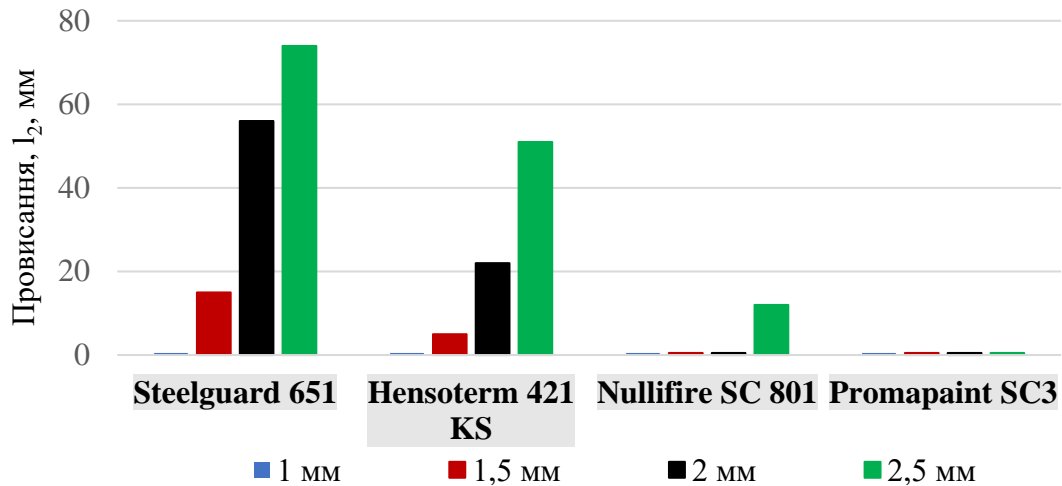


Рисунок 4.3 – Залежність довжини провисання при нанесенні (l_2) від товщини мокрого шару комерційних фарб: 1-2,5 мм

Дані табл. 4.2 показують, що фарби, які забезпечують найбільшу бездефектну товщину мокрого шару (Promapaint SC3: d 2,0–2,3 мм; Nullifire SC801: d 1,5–1,8 мм), відрізняються підвищеними значеннями η_0 (456 та 340 Па·с відповідно) та значною межею текучості τ_0 (309 та 254 Па). На противагу, фарби для тонших шарів (Steelguard 651, Hensotherm 421 KS) мають відносно невисокі η_0 (138–167 Па·с) та помірні τ_0 (97–138 Па) величини й обумовлюють практичну межу бездефектного мокрого шару d 0,7–1,0 мм.

Інтерпретація взаємозв'язку між реологічними параметрами та максимально можливими для нанесення мокрими шарами фарби пояснюється механізмом утримання матеріалу на вертикальній поверхні. Високі значення початкової в'язкості (η_0) та межі текучості (τ_0) перешкоджають стіканню густого шару. Одночасно підвищена η_∞ при високих швидкостях зсуву, яка не перешкоджає пропуску матеріалу крізь обладнання, теж мінімізує провисання мокрого шару.

4.1.2 Практичні рекомендації з оптимальної реології вогнезахисних фарб

Проведені розрахункові та експериментальні дослідження дозволяють визначити усереднені реологічні параметри для фарб реактивного типу, що забезпечують якісне нанесення при дотриманні певної товщини мокрого покриття (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Реологічні показники вогнезахисних фарб для нанесення максимальних товщин мокрого шару¹⁾

Характеристика	Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$, c^{-1}	В'язкість, $\text{Па}\cdot\text{c}$	Напруга зсуву, Па
Зберігання (низький зсув)	0,1	$\eta_0 > 100$	$\tau_0 \geq 100$
Нанесення механізованим методом з товщиною мокрого шару	10^4		
1 мм		$\eta_\infty > 1,4$	$\tau_0 > 100$
1,5 мм		$\eta_\infty > 3,0$	$\tau_0 > 250$
2,0 мм		$\eta_\infty > 4,0$	$\tau_0 > 300$
Мінімальне провисання при товщині мокрого шару 2,0 мм	1	$\eta_0 \sim 300$ $\eta_\infty \sim 3,0$	$\tau_0 > 250$

Примітка. ¹⁾За даними вимірювань на приладі Брукфілда із застосуванням Sp7, 20 °C

Варто усвідомлювати, що в'язкість є не єдиним фактором, який диктує технологічні властивості вогнезахисної фарби, пов'язані з виробництвом, зберіганням чи нанесенням. У кожній конкретній технологічній схемі слід враховувати низку інших факторів: компонентний склад, густина, розмір/форми частинок, ступінь агломерації, природа полімеру, додані стабілізатори тощо.

Тим не менш, дані табл. 4.3, отримані шляхом аналізу реологічних властивостей комерційних фарб на водній основі з доведеними на багаторічній

практиці результатами щодо зберігання та нанесення. Тому ми вважаємо за доцільне використати отримані результати (табл. 4.2 та табл. 4.3) як контрольні маркери при розробці і налаштуванні реологічної системи інтумесцентних фарб реактивного типу. Для фарби, яка розробляється з вимогою забезпечити вогнестійкість сталевих конструкцій більше 150 хв з можливістю нанесення мокрого шару d 2,0–2,5 мм, доцільно орієнтуватися на наведені вище реперні інтервали (табл. 4.3).

Контроль якості вогнезахисних фарб реактивного типу на виробництві достатньо здійснювати шляхом вимірювання динамічної в'язкості на приладі Брукфілда при фіксованій швидкості обертів шпинделю. В табл. 4.4 наведена кореляція між цими вимірами та максимальною товщиною мокрого шару покриття, яка рекомендується до нанесення.

Таблиця 4.4 – Залежність товщини мокрого шару вогнезахисної фарби від рекомендованої динамічної в'язкості¹⁾

Товщина мокрого шару, мм	Динамічна в'язкість, η , Па·с	
	30 об/хв.	50 об/хв.
1	20 – 30	15 – 20
1,5	35 – 50	25 – 40
2,0	60 – 80	50 – 60

Примітка. ¹⁾Вимірювання на приладі Брукфілда із застосуванням Sp7, 20 °С .

В цьому дослідженні вперше впроваджено математичне моделювання, зокрема застосування моделі Кассона, для розрахунку реологічних параметрів фарб реактивного типу. Результати цих розрахунків дозволяють надати виробникам засобів пасивного вогнезахисту простий і ефективний алгоритм контролю реологічних властивостей фарби, що забезпечує виробництво якісного продукту, придатного для нанесення на металеві поверхні з товщиною мокрого шару від 1,0 до 2,0 мм.

4.2 Етери целюлози як загущувачі фарб реактивного типу

Вплив етерів целюлози на реологічний профіль інтумесцентних вогнезахисних фарб досліджували на прикладі IFR складу APP/MA/PE/TiO₂/полімер. Як полімерні матеріали в IFR були використані водні полімерні дисперсії, властивості яких наведені у табл. 4.5. Незважаючи на різний мономерний склад та деякі розбіжності у характеристиках полімерів (табл. 4.5), ІЧ-спектри, які відповідають дослідженим співполімерам, є майже ідентичними та такими, що не дозволяють визначити суттєву різницю їх хімічних структур залученим спектральним методом [196] (рис. 4.4).

Таблиця 4.5 – Властивості вінілацетатних полімерів [196]

Назва полімеру	Вміст нелетких речовин, %	В'язкість, 25 °С, Па · с	pH
Вінілацетат-етилен EZ 3010	54 – 56	2,7 – 5,9	4,5 – 5,5
Вінілацетат- етилен DA 101	54 – 56	1,5 – 2,5	4,5 – 6,5
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат EZ 3112	49 – 51	1,8 – 4,0	4,5 – 5,5
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат V2209	54 – 56	3,4 – 4,5	3,5 – 4,5

Целюлозні загусники представлені товарними зразками етерів целюлози та наведені у табл. 2.4 (розд. 2): гідроксіетилметил целюлоза (HEMC-1 та HEMC-2) та гідроксипропілметил целюлоза (HPMC-1 та HPMC-2).

Дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентних композицій здійснювали на моделях фарб на водній основі, позначення яких представлені у табл. 4.6.

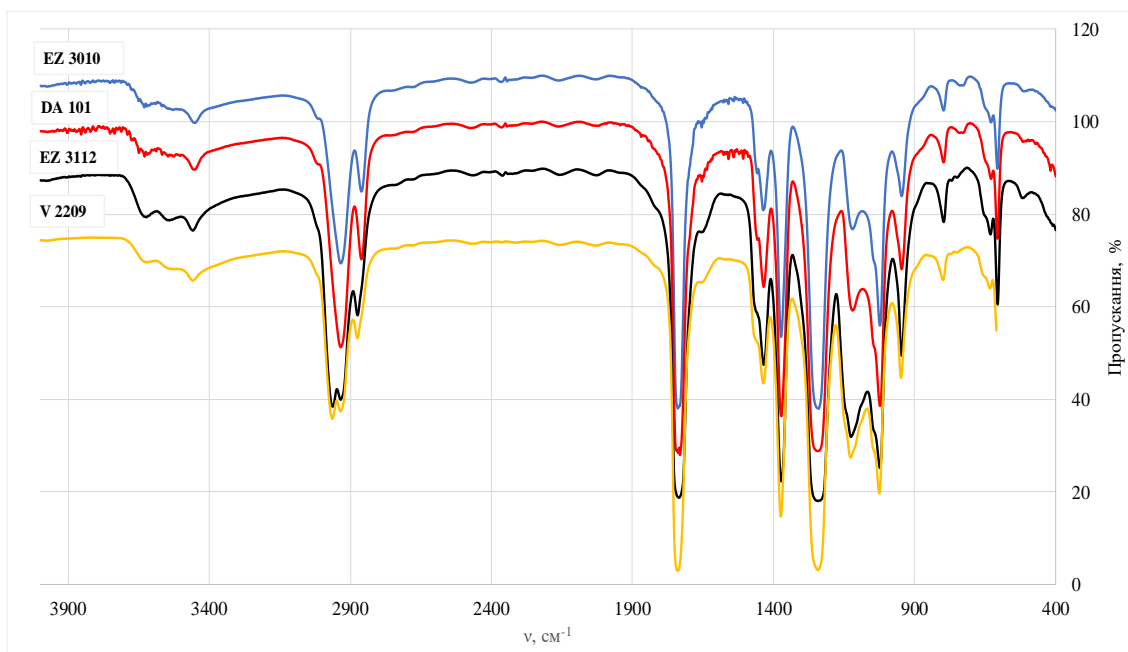


Рисунок 4.4 – ІЧ-спектри плівок вінілацетатних співполімерів [196]

Таблиця 4.6 – Позначення інтумесцентних композицій з різними целюлозними загусниками [196]

Назва композиції	Целюлозний загусник	Полімер
IFR(EZ 3010)	-	EZ 3010
IFR(DA 101)	-	DA 101
IFR(EZ 3112)	-	EZ 3112
IFR(V 2209)	-	V 2209
IFR1	Bermocoll M 30, HEMC-1	EZ 3010
IFR2	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3010
IFR3	Wekcelo MAT 2024, HPMC-1	EZ 3010
IFR4	Mecellose FMC 8821, HPMC-2	EZ 3010
IFR5	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	DA 101
IFR6	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3112
IFR7	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	V 2209

За виключенням компонентів, наведених в табл. 4.6 досліджені склади IFR мали спільну інтумесцентну основу APP/MA/PE/TiO₂ при співвідношенні

3:1:1:0,9, до якої додавали 2 мас. ч. відповідної полімерної дисперсії. Вміст целюлозних загусників був незмінним – 1% від маси інтумесцентної фарби.

Вплив структури целюлозних загусників на реологію інтумесцентної фарби вивчали на прикладі композицій [196], що містять полімерну дисперсію вінілацетат-етилен у відсутності (IFR (EZ 3010)) та присутності різних целюлозних етерів (IFR1–IFR4, табл. 4.6). Композиції IFR4–IFR7 були приготовані з використанням різних полімерів, але з одними целюлозним загущувачем – Vermocoll EM 7000 FQ (табл. 4.6). Така варіація комерційних полімерів та загущувачів, що представлені на ринку сировини України, має практичний інтерес для вітчизняних виробників засобів вогнезахисту для вирішення питань взаємозамінності сировини.

На рис. 4.5 представлені профілі динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1–IFR4, що були визначені із застосуванням шпинделю N7 [196].

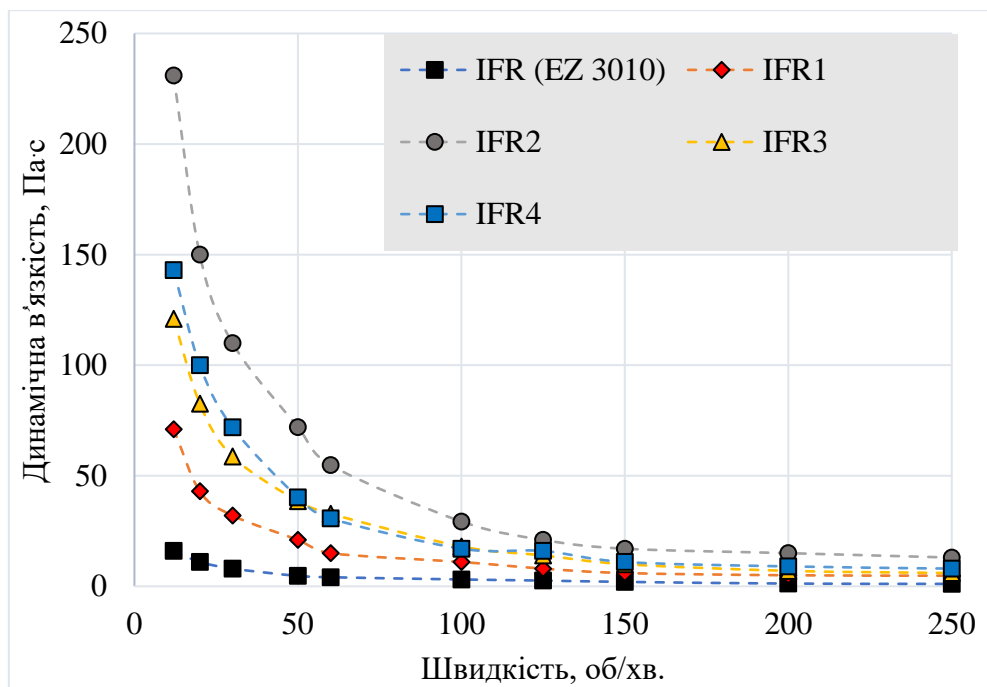


Рисунок 4.5 – Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних композицій IFR (EZ 3010) та IFR1–IFR4

Продемонстрована на рис. 4.5 залежність динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1–IFR4 від швидкості обертів шпинделю свідчить про такі несумнівні факти [196]:

- досліджені фарби є неньютонівськими рідинами та характеризуються псевдопластичною течією: в'язкість суттєво зменшується зі збільшенням швидкості зсуву;
- значення динамічної в'язкості є чутливим до структури целюлозного загусника особливо в інтервалі низького зсуву (до 150 об/хв.);
- додавання ефективного целюлозного загусника в вогнезахисну фарбу складу APP/MA/PE/TiO₂/полімер майже у 30 разів підвищує в'язкість вихідної фарби IFR (EZ 3010).

В табл. 4.7 наведені значення $\Delta\eta$ – відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 у присутності гідроксіетилметил целюлози НЕМС-2 (ефективне загущення) та гідроксіетилметил целюлози НЕМС-1 (незначне загущення) до значення в'язкості IFR (EZ 3010) без загусника (рис. 4.5) протягом зростання швидкості зсуву.

Таблиця 4.7 – Відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 до значень в'язкості IFR(EZ 3010) ($\Delta\eta$) в залежності від швидкості обертів шпинделю [196]

Швидкість, об/хв.	10–30	50–100	60–00	120–250
$\Delta\eta$ для IFR2	24–29	15–22	15–21	11–12
$\Delta\eta$ для IFR1	7–8	5–6	5–6	5–6

Результати табл. 4.7 демонструють, що етери целюлози з ідентичною товарною назвою (гідроксіетилметил целюлоза, НЕМС) забезпечують в'язкості IFR (EZ 3010), значення яких розрізняються в 3-4 рази.

З іншого боку, вінілацетатні полімери, залучені у цьому дослідженні, мають ідентичні структури (рис. 4.4), а їх дисперсії у воді характеризуються близькими значеннями рН (3,5–6,5). Тим не менш, розчини полімерних дисперсій у присутності целюлозного загусника з високим ступенем

загущення НЕМС-2 (1 % від маси полімеру) демонструють суттєву різницю реологічних профілів (рис. 4.6).

Загальною тенденцією даних рис. 4.6 є той факт, що полімери вінілацетат-етилен (EZ 3010, DA 101) демонструють більшу схильність до загущення, ніж їх гідрофобні аналоги – вінілацетат-етилен-вінілверсататові сполучні EZ 3112 та V2209 [196]. За представленими даними слід констатувати невелику різницю визначених значень в'язкості: 14–16 Па·с (10 об/хв.), 4–6 Па·с (50 об/хв.), 1–2 Па·с (200 об/хв.). Очікувано, що структура полімеру не впливає й на в'язкість інтумесцентних фарб IFR2 та IFR5–IFR7, загущених НЕМС-2 (рис. 4.7 б).

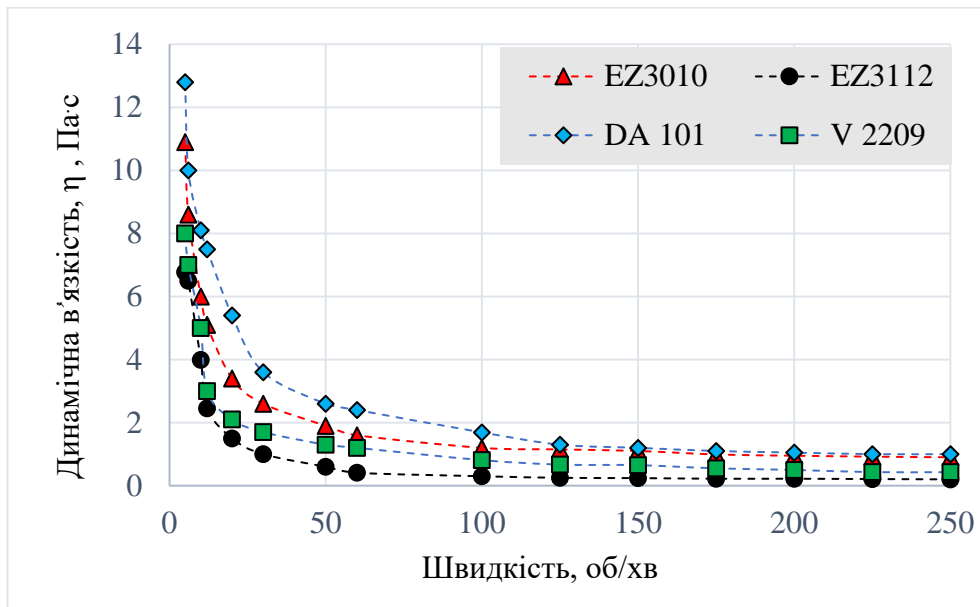


Рисунок 4.6 – Значення динамічної в'язкості полімерних дисперсій у присутності Vermocoll EM 7000 FQ [196]

Вплив полімеру на в'язкість інтумесцентної фарби IFR у відсутності целюлозного загусника продемонстровано на рис. 4.7 (а).

Така ситуація пояснюється тим, що механізм загущення етерами целюлози полягає у зв'язуванні води IFR, якої в досліджуваних композиціях однакова кількість – 30 %. Це обумовлює залежність в'язкості IFR лише від ефективності загусника. В свою чергу, мірою ефективності етеру целюлози є його молекулярна маса, що обумовлює в'язкість 1 % розчину (табл. 2.4).

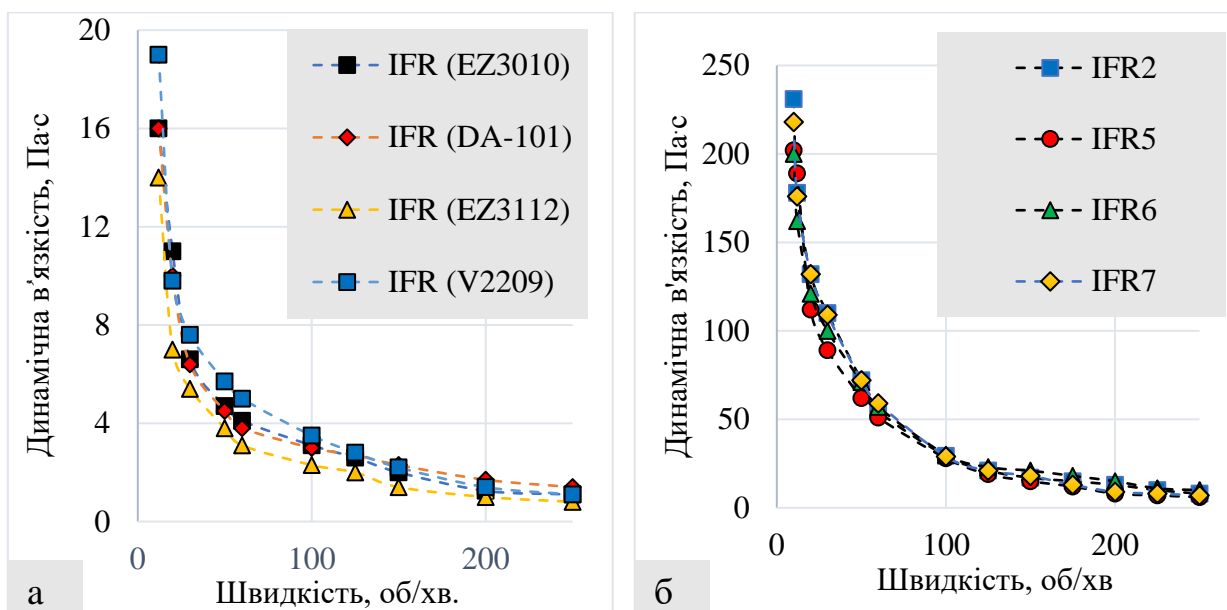


Рисунок 4.7 – Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних фарб без загусника (а) та композицій IFR2, IFR5–IFR7 (б) [196]

В табл. 4.8 наведені реологічні показники вогнезахисних фарб IFR(EZ 3010)–IFR7, які були отримані як результат лінеаризації в координатах « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » експериментальних даних рис. 4.5 та рис. 4.7. За значення η_0 приймали виміряну в'язкість при швидкості зсуву $\gamma = 0,627 \text{ c}^{-1}$. Приклад залежності в координатах « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » наведено на рис. 4.8.

Таблиця 4.8 – Показники реології фарб реактивного типу [196]

Фарба	τ_0 , Па	η_∞ , Па·с	r	η_0 , Па·с
IFR (EZ 3010)	37,2±2,1	0,096±0,005	0,993	32±2
IFR 1	146±8	0,136±0,007	0,997	84±4
IFR 2	605±30	0,103±0,005	0,990	305±15
IFR 3	289±14	0,152±0,008	0,987	124±6
IFR 4	296±15	0,160±0,008	0,987	142±7
IFR 5	529±26	0,123±0,006	0,972	346±17
IFR 6	552±28	0,122±0,006	0,971	325±16
IFR 7	530±27	0,101±0,005	0,970	352±18

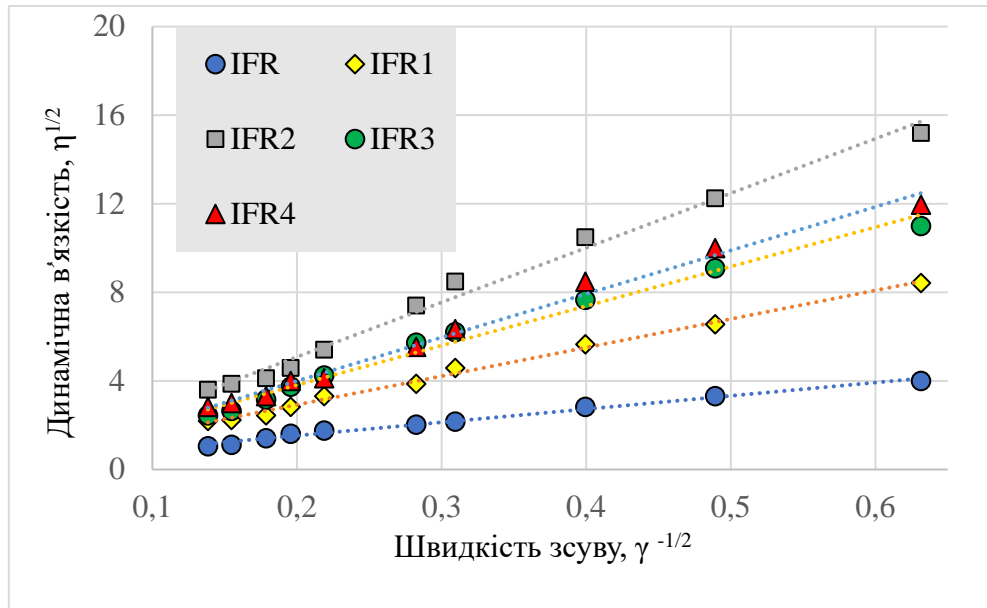


Рисунок 4.8 – Лінеаризація даних з в'язкості вогнезахисних фарб за рівнянням Кассона

Порівняння розрахованих параметрів реології, що створюють етери целюлози (табл. 4.8), з розрахованими для комерційних фарб (табл. 4.3) дозволяє констатувати, що значення в'язкості фарб при високих швидкостях зсуву (механічне нанесення), загущених етерами целюлози (η_{∞} , табл. 4.8), майже в 10 разів менше значення (η_{∞} , табл. 4.3), рекомендованого для нанесення товщини мокрого покриття в 1 мм. Це означає, що фарби інтумесцентного типу, загущені лише загусниками целюлозного типу, не можуть бути нанесені шаром в 1 мм за один прохід. Прогнозоване значення максимального шару фарби за рекомендаціями табл. 4.1, яке можливо без подальших дефектів нанести механізованим способом за один прохід, складає не більше 0,5 мм [196].

Тим не менш, високі значення межі текучості τ_0 500–600 Па (табл. 4.8) роблять загусники целюлозного типу безальтернативними для зберігання фарби без розшарування та седиментації.

Для перевірки впливу етерів целюлози на вогнезахисну ефективність були приготовані IFR, склад яких зазначено в табл. 4.6. Випробування

здійснювали в міні-печі в умовах стандартної пожежі за методикою 2.7.2. Метою цих випробувань є визначення межі вогнестійкості (R_1 , табл. 4.9) сталевій пластини, яка відповідає часу її прогріву в хв до 500 °С.

Результати цього експерименту демонструють відсутність будь-якого впливу на межу вогнестійкості домішок етерів целюлози в інтумесцентну фарбу. Значення визначених R (хв.) відрізняються в межах похибки експерименту [196].

Таблиця 4.9 – Межа вогнестійкості сталевих пластин з покриттями IFR, визначена у міні-печі [196]

Назва композиції	Товщина покриття, мм	R_1 , хв.
IFR(EZ 3010)	1,25±0,07	29
IFR1	1,31±0,11	32
IFR2	1,29±0,08	30
IFR3	1,29±0,12	29
IFR4	1,34±0,05	32
IFR5	1,26±0,11	29
IFR6	1,33±0,12	30
IFR7	1,28±0,09	29

В процесі дослідження впливу целюлозних загущувачів на властивості IFR було виявлено ряд особливостей, важливих для виробничих застосувань. Відомо, наприклад, що присутність тільки целюлозного модифікатора може спровокувати зменшення в'язкості інтумесцентної фарби з причини біодеградації, окиснення, зменшення молекулярної маси целюлозних загущувачів за рахунок зміни температури, рН тощо [209–211]. В табл. 4.10 наведена динаміка зміни в'язкості інтумесцентної фарби для деревини Ammokote WW, що виробляється промислово, у присутності різних систем загущення. Досліди були проведені при виробництві фарби у літній період

(Т 25–35 °С) під час зберігання фарби у ємностях по 25 кг. В'язкість вимірювалася із застосуванням шпинделю №6 при 20 об/хв.

Результати, наведені у табл. 4.10, свідчать що целюозна система (HEMC-2 0,8 %) демонструє значне зниження в'язкості $\Delta\eta$ під час літнього зберігання (64 % за 30 діб). Комбінації HEMC з наноглиною Optigel WA дають помірну стабілізацію ($\Delta\eta=32$ %). Система HEMC + Rheolate 255 (асоціативний HEUR модифікатор) показує лише 13 % падіння в'язкості. Водночас Rheobuck-NV 80, асоціативний HASE загусник, надає інтумесцентній системі велику початкову в'язкість, яка помітно знижується з часом ($\Delta\eta=56$ %).

Таблиця 4.10 – Значення динамічної в'язкості інтумесцентної фарби для деревини протягом зберігання

Загущувач	η , Па·с						$\Delta\eta$, %
	0 ¹⁾	3	5	10	20	30	
HEMC-2 0,8 мас %	32,4	20,6	13,5	12,1	11,4	11,8	64
HEMC-2 0,5 мас % + Optigel WA 0,5 мас %	24,6	18,0	16,2	16,0	16,5	16,7	32
HEMC-2 0,5 мас % + Rheolate 255 0,5 мас %	29,0	28,1	26,9	25,1	26,0	25,3	13
HEMC-2 0,5 мас % + Rheobuck-NV 80 0,5 мас %	38,6	30,1	25,1	20,4	17,2	16,8	56

Примітка. ¹⁾Кількість діб зберігання

Як основна версія зниження в'язкості IFR в залежності від природи загущувача розглядається біодеградація HEMC при температурі >15 °С, яка провокує розмноження мікроорганізмів у водному середовищі. Тому при виробництві IFR фарби треба застосовувати додаткові заходи з контролю за якістю води, температурного режиму виробництва і зберігання, рН системи та підбору ефективної системи біоцидних консервантів.

4.3 Модифікація вогнезахисних інтумесцентних композицій наноглинами

З метою дослідження шаруватих силікатів (наноглин) як тиксотропних домішок для збільшення товщини шару при нанесенні вогнезахисної фарби вивчено вплив наноглин бентонітового ряду (табл. 2.3, розд. 2) на реологічний профіль інтумесцентної системи APP/MA/PE/TiO₂/полімер. Як полімерні складові досліджували співполімер етилену з вінілацетатом (Vinnapas® EZ 3010, табл. 2.2, розд. 2) для водно-дисперсійних фарб та співполімери стиролу з акрилатом (Pliolite AC80 ньютонівський, SA1 та Pliolite AC4 ньютонівський, SA2, табл. 4.11) для органорозчинних фарб.

Таблиця 4.11 – Властивості стиролакрилатних полімерів

Характеристика	Pliolite AC80	Pliolite AC4
Розчинність у ксилолі, %	40	45
Температура плавлення, °C	53	55
В'язкість, чашка Форда №4 при 25°C, 33,3% у ксилолі, с	45	–
В'язкість за Брукфілдом, 25°C, Sp.6, 10 об/хв, 15% у сольвенті, Па·с	–	68
Питома вага, г/см ³	1,03	1,03

Основною ідеєю дослідження є пошук взаємозв'язку між реологічними параметрами фарби реактивного типу, які створюють наноглини різної природи, та технологічними властивостями матеріалу у процесі нанесення, а також вогнезахисною ефективністю покриття в умовах пожежі

4.3.1 Залежність динамічної в'язкості вогнезахисних фарб від природи наноглини

Позначення композицій IFR-композицій, що будуть вивчені у цьому дослідженні представлені у табл. 4.12. Співвідношення APP:MA:PE:TiO₂ в IFR1–IFR18 дорівнює 3:1:1:0,9.

Наноглини, що використовувалися у цій роботі детально описані у табл. 2.3, поділяються на дві групи: гідрофобні – Garamite 7305, Tixogel MP 250, Clayton HY, Organoclay 801D та гідрофільні – Laponite EP, Optigel WA, Optibent 987, Optigel WX.

В'язкість (η , Па·с) IFR1–IFR18 вимірювали на віскозиметрі Брукфілда, як описано у розд. 2. На рис. 4.9 представлені профілі динамічної в'язкості органорозчинних (IFR1–IFR9) та водно-дисперсійних (IFR10–IFR18) композицій, визначених з використанням шпинделю N7 в діапазоні швидкостей обертів шпинделю (10–250) с⁻¹ при температурі 20 °С.

Таблиця 4.12 – Склад (мас. ч) та позначення інтумесцентних композицій, що досліджуються

Назва композиції	Наноглина ¹⁾	APP/МА/PE/ TiO ₂	Полімер ²⁾		Полімер ³⁾ EZ 3010
			SA1	SA2	
IFR 1	-	5,6	1	-	
IFR 2	-	7,1	1	0,3	
IFR 3	Garamite 7305	7,1	1	0,3	
IFR 4	Tixogel MP 250	7,1	1	0,3	
IFR 5	Clayton HY	7,1	1	0,3	
IFR 6	Organoclay 801D	7,1	1	0,3	
IFR 7	Laponite EP	7,1	1	0,3	
IFR 8	Optigel WA	7,1	1	0,3	
IFR 9	Optibent 987	7,1	1	0,3	
IFR 10	-	6,7	-	-	1
IFR 11	Garamite 7305	6,7	-	-	1
IFR 12	Tixogel MP	6,7	-	-	1
IFR 13	Clayton HY	6,7	-	-	1
IFR 14	Organoclay 801D	6,7	-	-	1
IFR 15	Laponite EP	6,7	-	-	1
IFR 16	Optigel WA	6,7	-	-	1
IFR 17	Optibent 987	6,7	-	-	1
IFR 18	Optigel WX	6,7	-	-	1

Примітка. ¹⁾Вміст наноглини в IFR 1 мас. %. ²⁾IFR1–IFR9 містять 3 мас.ч. ксилолу. ³⁾IFR10–IFR18 містять 3 мас.ч. води.

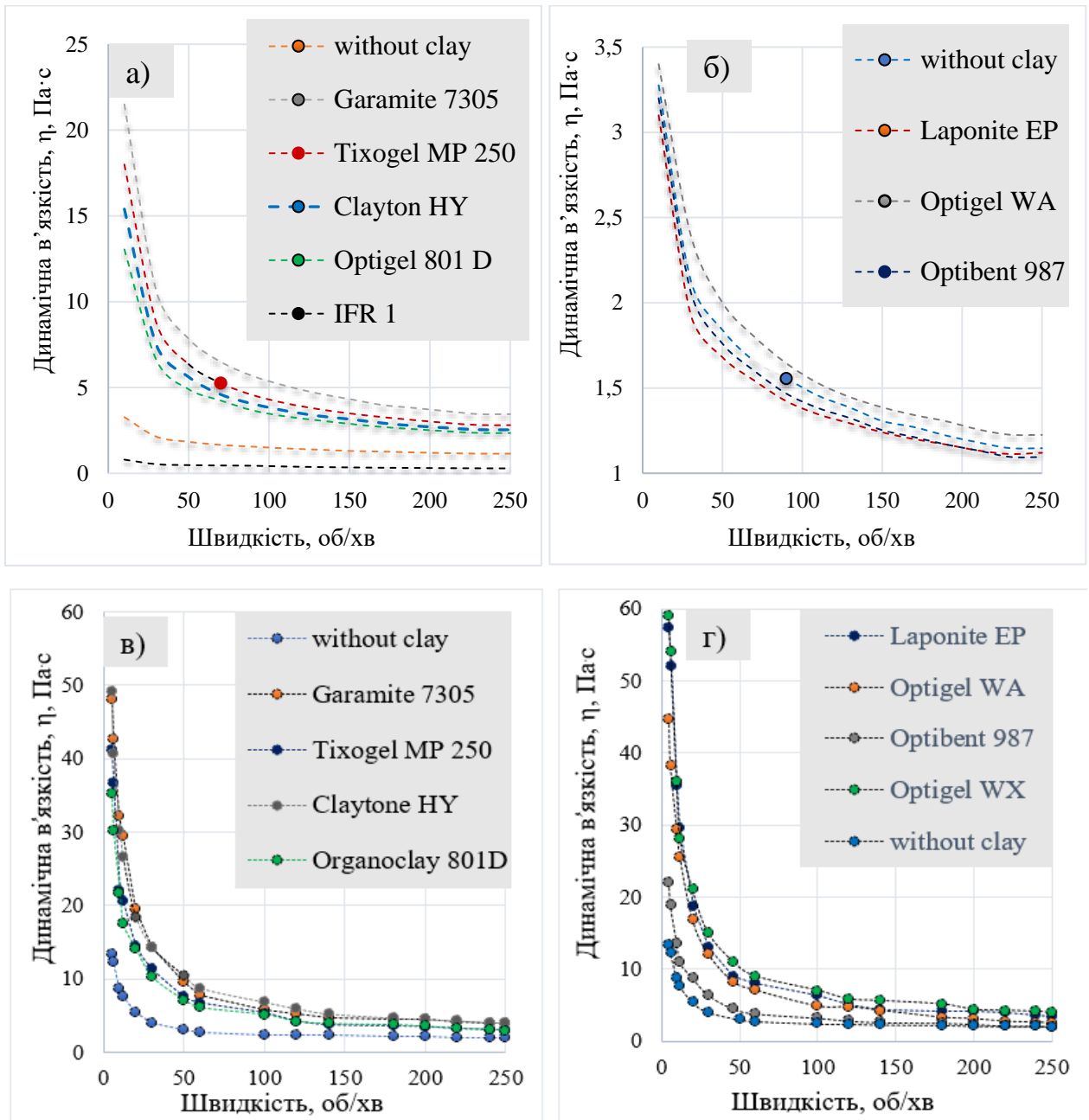


Рисунок 4.9 – Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних композицій: а) органорозчинна без наноглини IFR2 та з гідрофобними глинами IFR3–IFR6; б) органорозчинна без наноглини IFR2 та з гідрофільними глинами IFR–IFR9; в) водно-дисперсійна без наноглини IFR10 та з гідрофобними глинами IFR11–IFR14; г) водно-дисперсійна без наноглини FR10 та з гідрофільними глинами IFR15–IFR18.

Отримані результати демонструють, що в'язкість фарб, у склад яких входять стиролакрилатні співполімери SA1 та SA2 у розчині ксилолу (табл. 4.12, IFR2–IFR9), є дуже чутливою до гідрофільно-гідрофобних властивостей

наноглин. Спостерігається зростання в'язкості у 3–4 рази при додаванні гідрофобних органомодифікованих наноглин (рис. 4.9 а) та практично відсутність впливу гідрофільних глин (рис. 4.9 б) на реологію органорозчинних інтумесцентних композицій.

В свою чергу водно-дисперсійні композиції, що містять співполімер етилену з вінілацетатом EZ 3010 (табл. 3, IFR10–IFR18), проявляють схильність до загущення як гідрофобними (рис. 4.9 в) так і гідрофільними наноглинами (рис. 4.9 г) з незначною перевагою останніх. Одним із пояснень універсальної реологічної дії органомодифікованих наноглин в органорозчинних та фарбах на водній основі є їх здатність до утворення полімерних композитів та нанокомпозитів з гідрофобними полімерами шляхом обміну об'ємних четвертинних амонієвих катіонів.

Нанокомпозити на структури EZ 3010-MMT та SA1-MMT (де MMT – монтморилоніт) були отримані шляхом диспергування полімерної дисперсії EZ 3010 або 30% розчину SA1 в о-ксилолі з використанням гідрофобної наноглини Garamite 7305, після чого було проведено видалення розчинників. Структура отриманих нанокомпозитів була досліджена за допомогою методів інфрачервоної спектроскопії (рис. 4.10) та рентгенофазового аналізу (табл. 4.13).

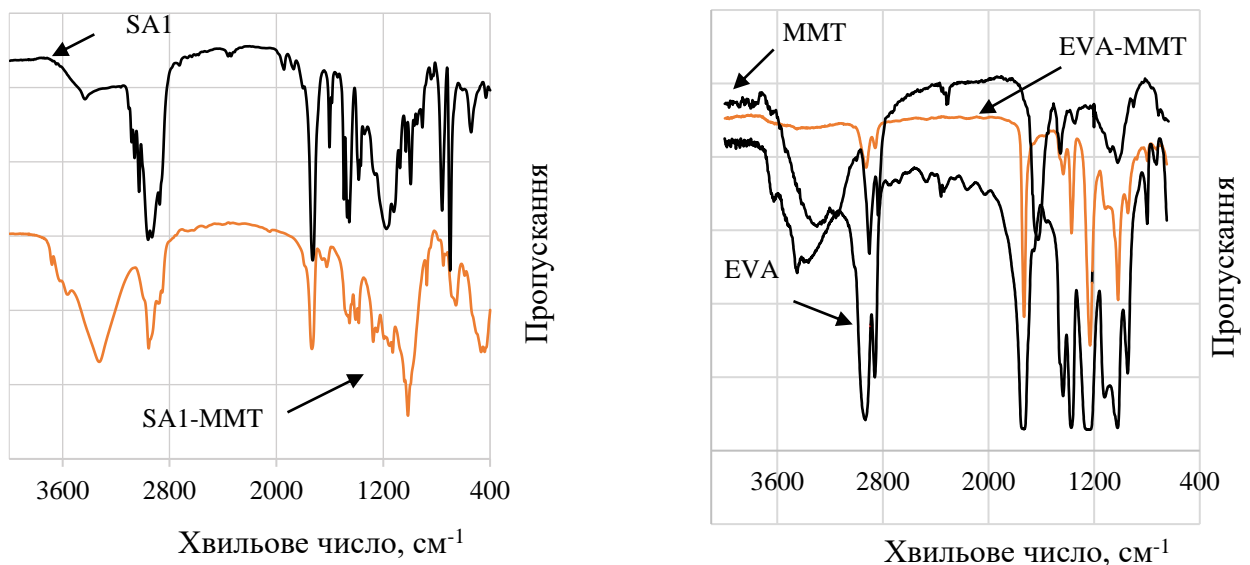


Рисунок 4.10 – ІЧ-спектри нанокомпозитів співполімерів EZ 3010 та SA1 з монтморилонітом

Таблиця 4.13 – Фізико-хімічні характеристики полімерів та наноккомпозитів

Речовина	Хвильове число C=O, cm^{-1}	Міжшарова відстань, d, нм
MMT (Garamite 7305)	–	2,25
EZ 3010	1735	–
EZ 3010-MMT	1723	3,21
SA	1733	–
SA-MMT	1728	3,44

Результати ідентифікації наноккомпозитів (табл. 4.13) демонструють зміни фізико-хімічних характеристик співполімерів EZ 3010 та SA при їх перетворенні в наноккомпозити на основі полімеру та наноглини. Спостерігається зсув смуги поглинання карбонільної групи (C=O) у наноккомпозитах у більш короткохвильову область, а також відсутність смуги OH-груп полімерів при 3440 cm^{-1} , що свідчить про взаємодію гідроксильної групи з протонно-акцепторними центрами глини (по центру Бренстеда $\text{Si}^{\sigma^+}-\text{O}^{\sigma^-}$); збільшення міжшарових відстаней в наноглині, яка утворює наноккомпозит.

Спроби отримання наноккомпозиту структури SA1-MMT шляхом диспергування за 30 % розчину SA1 в о-ксилолі з гідрофільною наноглиною Optigel WA протягом 24 год видались невдалими. Спостерігалась погана сумісність наноглини Optigel WA з полімерною матрицею стиролакрилату, що призводило до утворення полімерного композиту з розміром частинок до декількох мікрон, як це показано на SEM-фото (рис. 4.11).

В свою чергу, утворення наноккомпозиту полімер-наноглина не є обов'язковою умовою для забезпечення високих значень в'язкості інтумесцентної фарби. Цей постулат підтверджено варіаціями порядку додавання глини при виробництві інтумесцентної фарби у кількості 1 т, яка містить APP/MA/PE/(SA1+SA2)/наповнювачі/реологічні домішки/ксилол (рис. 4.12).

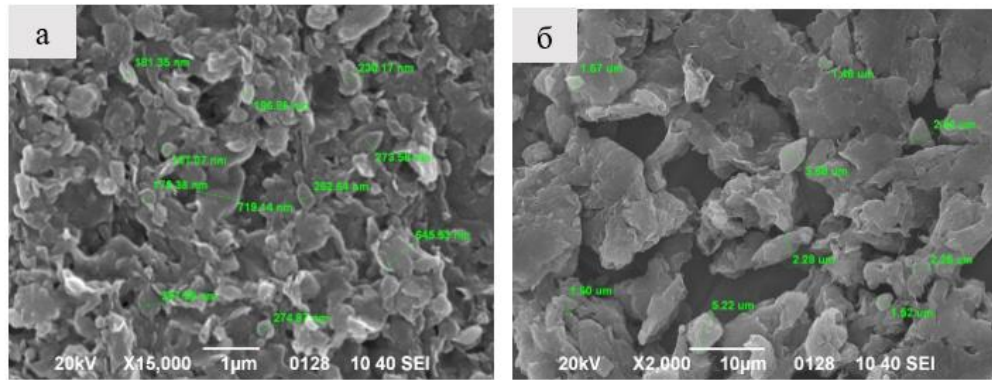


Рисунок 4.11 – SEM-фото нанокompозиту SA1-Garamite 7305 (а) і мікрокомпозиту SA1-Optigel WA (б)

Як наноглина був досліджений алюмосилікат Garamite 7305 у кількості 20 кг на 1 т продукту. На рис. 4.12 наведені значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних композицій IFR19–IFR21, виміряні з використанням шпинделю N6: фарба IFR19 не містить наноглини; IFR20 приготована з використанням попередньо приготованого нанокompозиту (SA1+SA2) – Garamite 7305; в IFR21 Garamite 7305 додавався разом з іншими твердими компонентами на стадії перетиру. При цьому найбільшою в'язкістю характеризується фарба IFR21, в якій були використані умови для максимального подрібнення та розподілення наноглини.

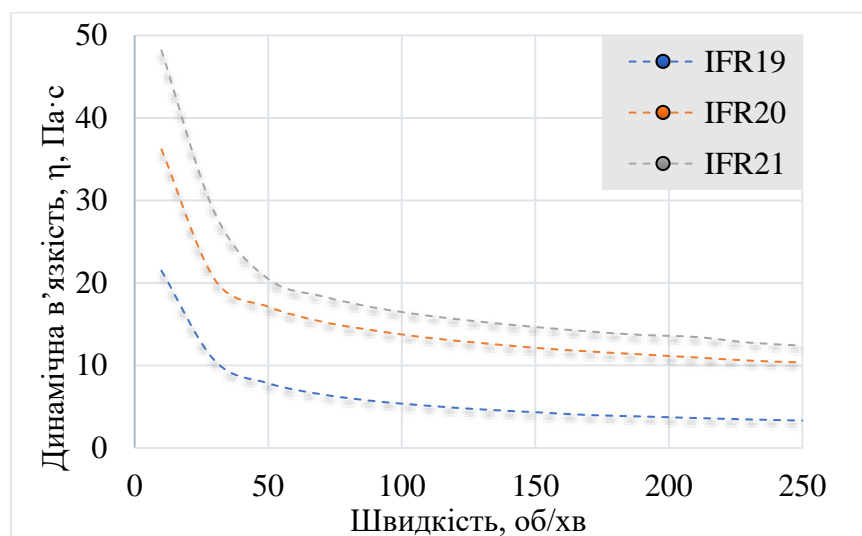


Рисунок 4.12 – Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних фарб IFR19–IFR21

Порівняння реологічних профілів (рис. 4.12) дозволяє зробити висновок, що відповідальним за значення в'язкості інтумесцентної фарби є ступінь та структурування багатокомпонентної інтумесцентної системи за рахунок міжмолекулярних та сольватаційних взаємодій. В цьому сенсі можливо більш правильно віднести шаруваті наносилікати до загусників асоціативного типу.

4.3.2 Розрахунки параметрів реології інтумесцентних фарб

Визначені реологічні параметри композицій IFR1–IFR18, як результат лінеаризації даних (рис. 4.13) в координатах $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ (рис. 4.13), наведені в табл. 4.14.

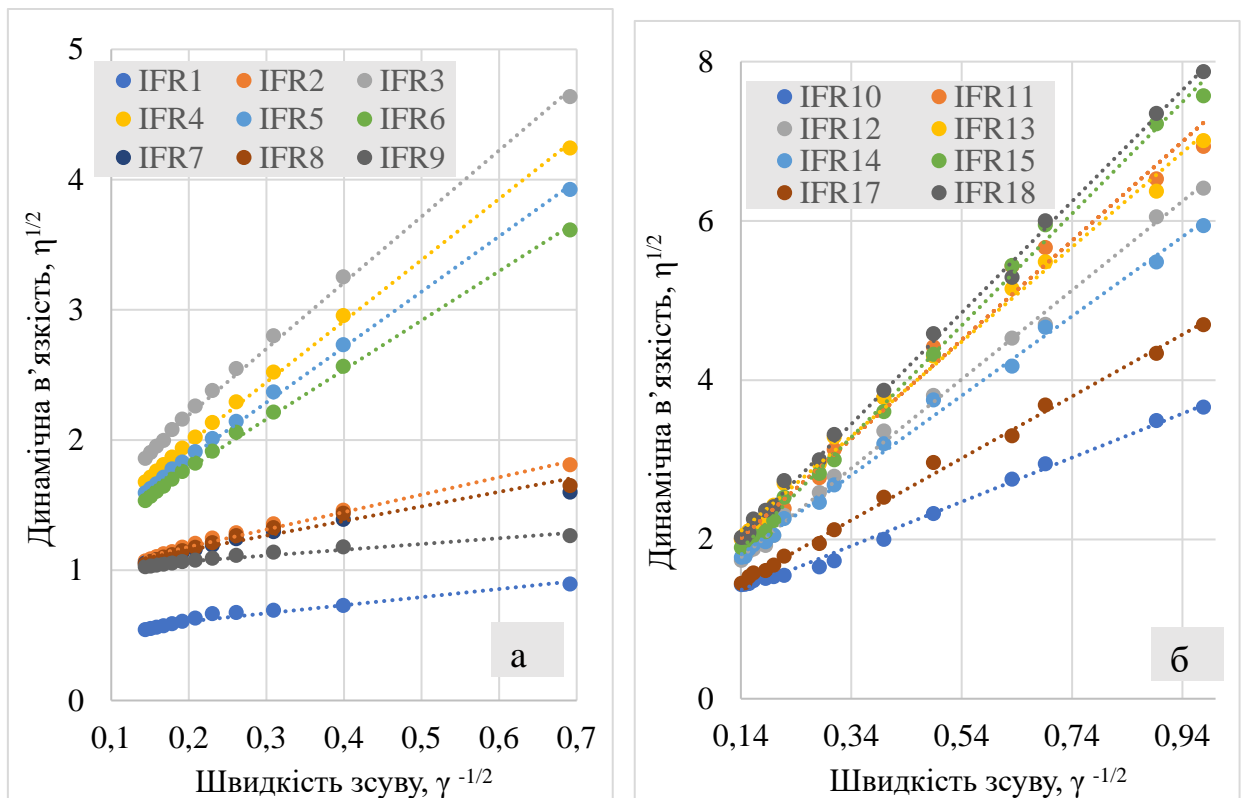


Рисунок 4.13 – Лінеаризація даних з в'язкості органорозчинних (а) та водних (б) IFR

З даних табл. 4.14 можливо розрахувати бруто тиксотропні ефекти (табл. 4.15), які спостерігаються при загущенні полімерної інтумесцентної системи APP/МА/РЕ/ TiO_2 /полімер різними типами наноглин: тиксотропний

ефект T_1 приймається відношення в'язкості IFR у стані спокою (η_0 , Па·с) у присутності наноглин до аналогічного значення системи без наноглини. Тиксотропний ефект наноглин при нанесенні (T_2) оцінюється, як відношення відповідних значень межі текучості (τ_0 , Па) тих же систем.

Таблиця 4.14 – Реологічні параметри фарб інтумесцентного типу

Композиція	τ_0 , Па	η_∞ , Па·с	R	η_0 , Па·с
IFR 1	1,51±0,08	0,128±0,006	0,978	1,21±0,06
IFR 2	2,21±0,11	0,701±0,035	0,985	3,02±0,15
IFR 3	25,8±1,3	1,44±0,07	0,990	33,5±1,7
IFR 4	22,1±1,1	1,08±0,05	0,994	27,1±1,4
IFR 5	18,1±0,9	1,12±0,06	0,989	20,4±1,0
IFR 6	14,6±0,7	1,02±0,05	0,991	16,4±0,8
IFR 7	2,08±0,10	0,757±0,038	0,990	2,41±0,12
IFR 8	3,06±0,15	0,750±0,038	0,981	4,42±0,22
IFR 9	2,37±0,12	0,706±0,035	0,983	2,37±0,12
IFR 10	7,84±0,39	0,960±0,048	0,995	13,4±0,7
IFR 11	39,1±2,0	1,29±0,06	0,990	48,1±2,4
IFR 12	31,2±1,6	0,980±0,049	0,998	44,6±2,2
IFR 13	49,1±2,5	1,61±0,08	0,999	49,1±2,5
IFR 14	25,0±1,3	1,19±0,06	0,996	35,3±1,8
IFR 15	49,1±2,5	0,810±0,041	0,998	57,3±2,9
IFR 16	38,4±1,9	0,760±0,038	0,991	44,6±2,2
IFR 17	15,1±0,8	0,841±0,042	0,997	22,0±1,1
IFR 18	48,8±2,4	1,14±0,06	0,998	59,7±3,0

Слід зазначити, що додавання в IFR1, яка містить ньютонівський співполімер SA1 (Pliolite AC80), неньютонівського стирол-акрилату SA2 (Pliolite AC4) значно підвищує в'язкість η_0 системи IFR2. Необхідність застосування саме пари полімерів (SA1+SA2) в інтумесцентному вогнезахисті продиктована, перш за все, забезпеченням протипожежної ефективності покриття (рис. 3.3, розд. 3).

Таблиця 4.15 – Тиксотропні ефекти інтумесцентних композицій

Композиція	T ₁	T ₂	Композиція	T ₁	T ₂
IFR 1	0,4	0,7	IFR 10	1	1,0
IFR 2	1,0	1,0	IFR 11	3,6	5,0
IFR 3	11,1	11,7	IFR 12	3,3	4,0
IFR 4	9,0	10,0	IFR 13	3,7	6,3
IFR 5	6,8	8,2	IFR 14	2,6	3,2
IFR 6	5,4	6,6	IFR 15	4,3	6,3
IFR 7	0,8	0,9	IFR 16	3,3	4,9
IFR 8	1,5	1,4	IFR 17	1,6	1,9
IFR 9	0,8	1,1	IFR 18	4,5	6,2

Дані табл. 4.15 підтверджують озвучене раніше спостереження, що тиксотропність органорозчинних інтумесцентних систем, практично не змінюється у присутності гідрофільних наноглин (пор. значення T₁ й T₂ для IFR2 та IFR7–IFR9). Ці факти свідчать про недоцільність модифікації інтумесцентних фарб, що містять розчинник, не органомодифікованими наноглинами.

Співставлення значень τ_0 , та η_∞ , що наведені в табл. 4.14 з реперними реологічними показниками комерційних вогнезахисних фарб (табл. 4.3) дозволяє зробити попередні висновки щодо ефективності загушення IFR наноглинами: найбільшою ефективністю для загушення органорозчинних фарб характеризуються органомодифіковані бентонітові наноглини – Garamite 7305 та Tixogel MP 250; високу в'язкість водно-дисперсійним фарбам забезпечують наноглини Clayton HY, Laponite EP та Optigel WX; порівняння значень τ_0 та η_∞ з реперними значеннями цих параметрів (табл. 4.3) дозволяє зробити припущення, що максимальна товщина мокрого шару фарби IFR, загущеної тільки наноглинами, не може перевищувати 1 мм.

4.3.3 Експериментальні дослідження з перевірки реологічної поведінки інтумесцентних композицій

Результати експериментальних дослідів з перевірки реологічної поведінки інтумесцентних композицій IFR1–IFR18 за методиками 2.4 та 2.5 представлені на рис. 4.14.

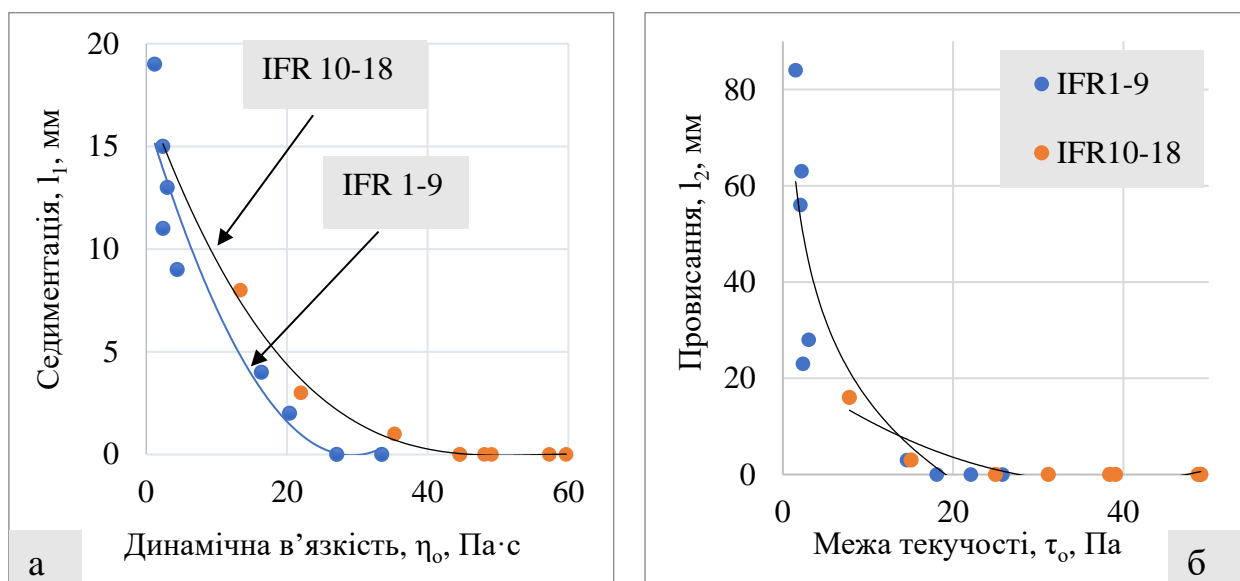


Рисунок 4.14 – Залежність ступеню синерезису при зберіганні (I_1) від початкової динамічної в'язкості (а) та довжини провисання при нанесенні (I_2) від межі плинності (б) інтумесцентних фарб IFR1–IFR18

Візуалізація деяких зразків органорозчинних та водно-дисперсійних зразків IFR з гідрофобною (Garamite 7305), гідрофільною (Optigel WA) та необробленою бентонітовою (Optibent 987) наноглинами продемонстрована на рис. 4.15 та рис. 4.16. Отримані результати із залежності ступеню синерезису при зберіганні (I_1 , рис. 4.15–4.16) від початкової динамічної в'язкості (η_0 при $\dot{\gamma} = 0,627 \text{ c}^{-1}$, табл. 4.14) та довжини провисання при нанесенні (I_2 , рис. 4.15–4.16) від межі плинності (τ_0 , табл. 4.14) дають можливість надати практичні рекомендації виробникам інтумесцентного вогнезахисту щодо оптимальної реології фарб, які як загущувач містять тільки наноглини.

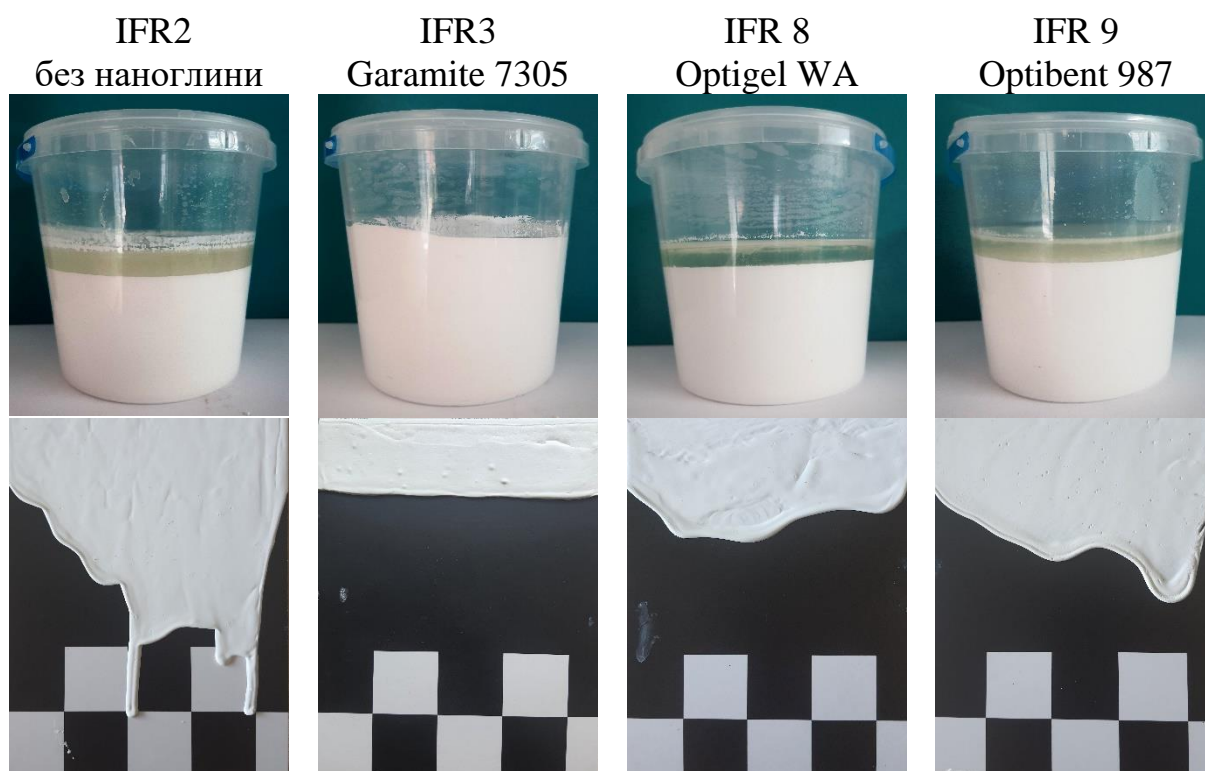


Рисунок 4.15 – Візуалізація дослідів з перевірки седиментації та провисання органорозчинних інтумесцентних вогнезахисних фарб

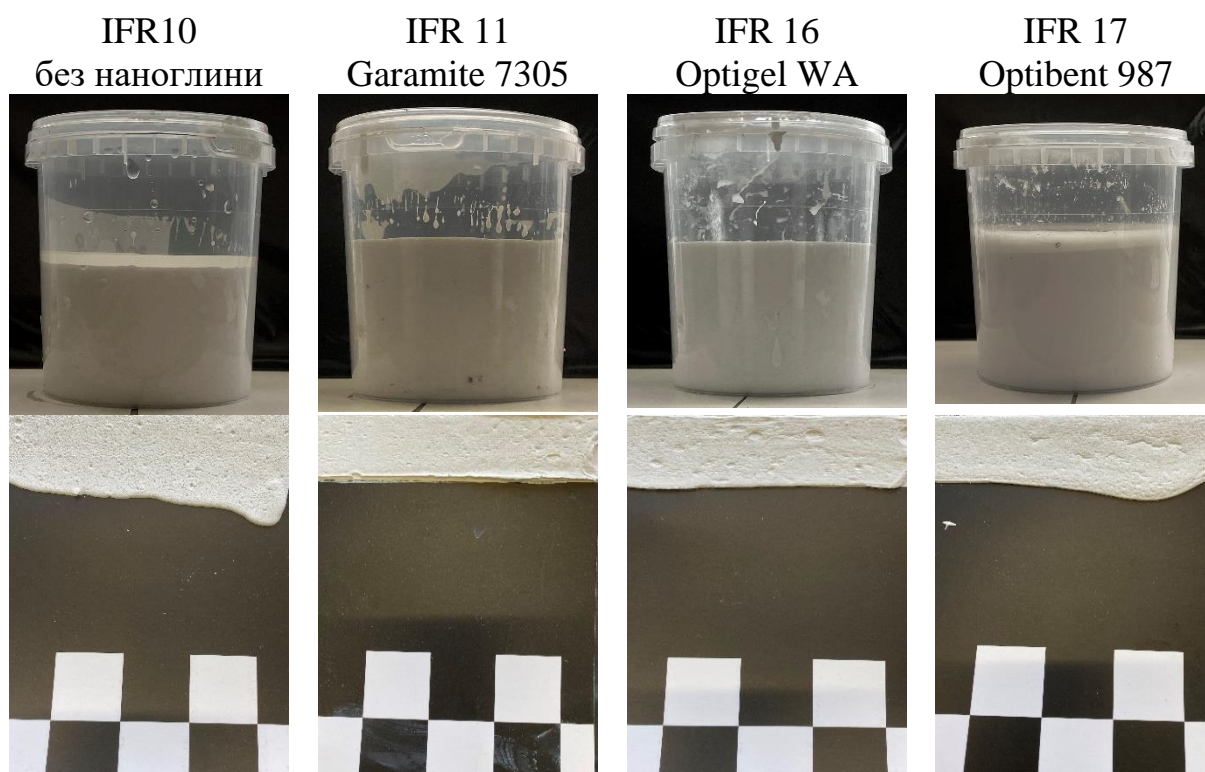


Рисунок 4.16 – Візуалізація дослідів з перевірки седиментації та провисання інтумесцентних вогнезахисних фарб на водній основі.

Ці рекомендації наведені у табл. 4.16, а відповідність продукції, що виробляється, може бути проконтрольована вимірюваннями в'язкості за Брукфілдом при вказаних швидкостях зсуву.

Таблиця 4.16. – Реологічні параметри органорозчинних та водно-дисперсійних IFR для нанесення мокрого покриття товщиною 1 мм

Етап застосування фарби	Швидкість зсуву, γ , с^{-1}	В'язкість, η , $\text{Па}\cdot\text{с}$	Межа текучості, τ_0 , Па
Органорозчинна фарба APP/MA/PE/TiO ₂ /(SA1 +SA2)/наноглина, sp N6			
Зберігання (умови низького зсуву)	0,3	$\eta_0 > 70^1$	$\tau_0 > 20$
	1,045 (N = 5 rpm)	> 25	$\tau_0 > 20$
Нанесення механізованим способом	$> 10^3$	$\eta_\infty 1 - 1,5$	$\tau > 1000$
Мінімальне провисання	1	$\eta_0 > 70$	$\tau_0 > 20$
Водно-дисперсійна фарба APP/MA/PE/TiO ₂ /EZ 3010/наноглина, spN7			
Зберігання (умови низького зсуву)	0,3	$\eta_0 > 100^1$	$\tau_0 > 30$
	1,045 (N = 5 rpm)	> 45	$\tau_0 > 30$
Нанесення механізованим способом	$> 10^3$	$\eta_\infty 1 - 1,5$	$\tau > 1000$
Мінімальне провисання	1	$\eta_0 > 100$	$\tau_0 > 25$

Примітка. ¹⁾Розраховано за формулою $\eta_0 = \tau_0/\gamma$; $\gamma = 0,3 \text{ с}^{-1}$

На рис. 4.17 узагальнено орієнтовні реологічні показники органорозчинних та водно-дисперсійних вогнезахисних інтумесцентних композицій APP/MA/PE/TiO₂/наноглина, яким має відповідати продукція для забезпечення відсутності седиментації твердої частини фарби при зберіганні та можливості нанесення товщини мокрого покриття не менше 1,0 мм за один прохід. Значення в'язкості на представленій діаграмі є середньоарифметичним значенням в'язкості фарб IFR3–IFR 6 (органорозчинні – S) та IFR11–IFR13, IFR15, IFR16, IFR18 (водно-дисперсійні – W) в інтервалі заданої швидкості обертів шпинделю (20–50 об/хв) при температурі 20 °С.

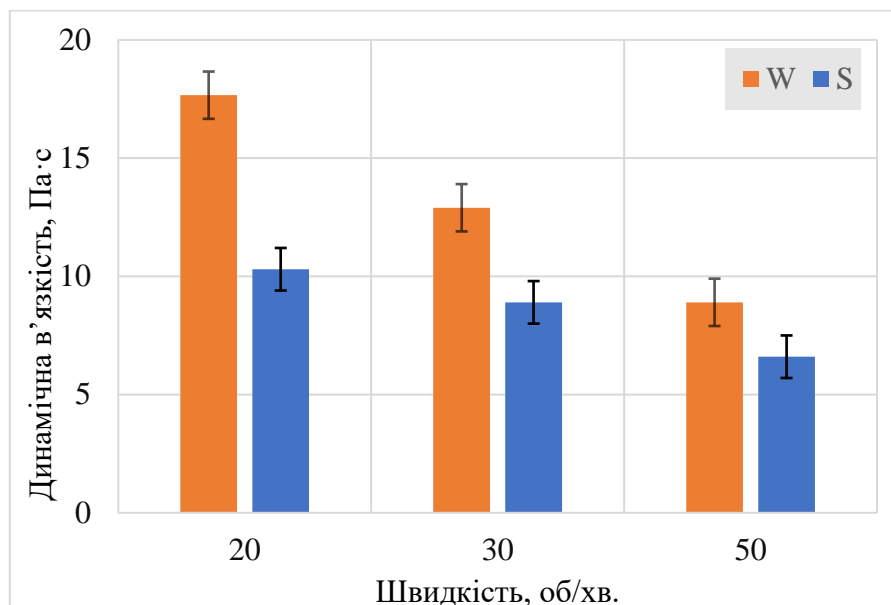


Рисунок 4.17 – Залежність в'язкості органорозчинних (S, sp N6) та водно-дисперсійних (W, sp N7) IFR від швидкості обертів шпинделю, 20 °С

Таким чином, в результаті проведеного експерименту продемонстрована позитивна роль органомодифікованих та активованих гідрофільних наноглин бентонітового ряду в області низьких і середніх швидкостей зсуву. Показано, що наноглини відповідають за надання в'язкості та підтримку реологічних властивостей для запобігання провисання та седиментації, забезпечують стабільність при зберіганні. При цьому слід підкреслити, що наноглини не можуть бути єдиними модифікаторами реології вогнезахисних інтумесцентних композицій.

4.3.4 Вплив наноглин на вогнезахисну ефективність

Удосконалення реології інтумесцентних композицій шляхом модифікації наноглинами має сенс лише за умов, що застосування нанодомішок не знижує ефективність вогнезахисту. Відомо [22, 212], що наноглини в силу своєї пластинчастої структури утворюють полімерні композити та створюють потужні бар'єрні перешкоди для доступу кисню в зону горіння та міграції вихідних газів. Саме пригнічення виходу утворених газів з товщі реактивного покриття, що спучується, є причиною обмеження

кількості наноглини в IFR. У практиці інтумесцентного вогнезахисту існує усталена думка [212], що оптимальна кількість наноглини для забезпечення ефективного захисту від вогню IFR становить 3%.

З метою визначення граничних концентрацій наноглини, які б оптимально формували реологію вогнезахисної композиції із забезпеченням вагомих значень в'язкості та при цьому мінімально впливали на процеси спучення, була вивчена залежність в'язкості (η , Па·с) та коефіцієнта спучення (K , см³/г) в інтервалі концентрацій (0–7 % мас) наноглин Garamite 7305 та Optigel WA для органорозчинних IFR3 і IFR8 (рис. 4.18 а, б) та воднодисперсійних IFR11 і IFR16 (рис. 4.18 в, г). Приклади структури коксових залишків композиції IFR16 наведено на рис. 4.19. Дані, що представлені на рис. 4.18, дозволяють визначити концентраційні інтервали домішок наноглини, де в'язкість вогнезахисної фарби та коефіцієнт спучення покриття мають відчутні значення. Для наноглини Garamite 7305 визначено умовний концентраційний інтервал 1–3 % (органорозчинна фарба), 1–2 % (воднодисперсійна фарба), а для наноглини Optigel WA ці значення складають 4–6 % та 1–5 % відповідно.

Оптимальний вміст наноглин, імовірно, визначається здатністю шаруватих силікатів до ексфоціації в складі інтумесцентних композицій (IFR). Оскільки досліджувані IFR належать до високонаповнених систем, можна припустити, що вплив полярності дисперсійного середовища (води або органічного розчинника) у таких композиціях частково знижується. За цих умов вирішальне значення для процесів розшарування наноглин у об'ємі лакофарбового матеріалу має не стільки їх хімічна природа, скільки величина базальних міжшарових інтервалів. У роботах [213, 214] показано, що за умов максимального ступеня ексфоціації наноглина формує структуроване покриття з орієнтованих нанопластинок, які переважно розташовуються паралельно поверхні матеріалу. Таке розташування наночастинок на кілька порядків знижує проникність покриття для рідких та газоподібних речовин. Крім того, дисперговані наночастинки створюють лабіринтові шляхи, що уповільнюють дифузію утворених газів, а тим самим і спучення покриття.

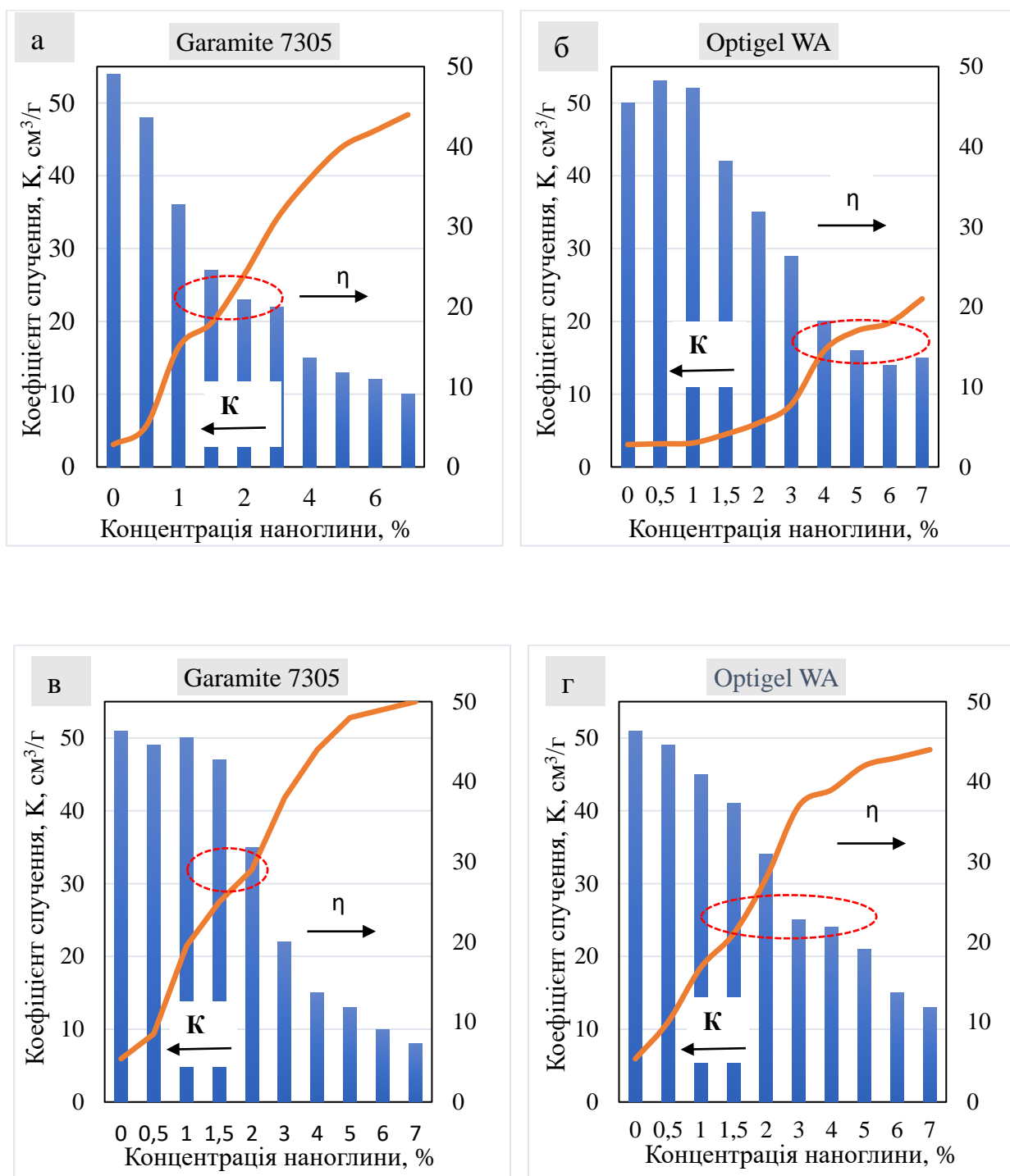


Рисунок 4.18 – Залежність в'язкості (η , Па·с) та коефіцієнта спучення (K , см³/г) від наноглин Garamite 7305 та Optigel WA в органорозчинних (а, б) та водно-дисперсійних (в, г) IFR: вимірювання в'язкості проведено при швидкості 20 об/хв на *sp* N6 (а, б) та на *sp* N7 (в, г), при 20 °С

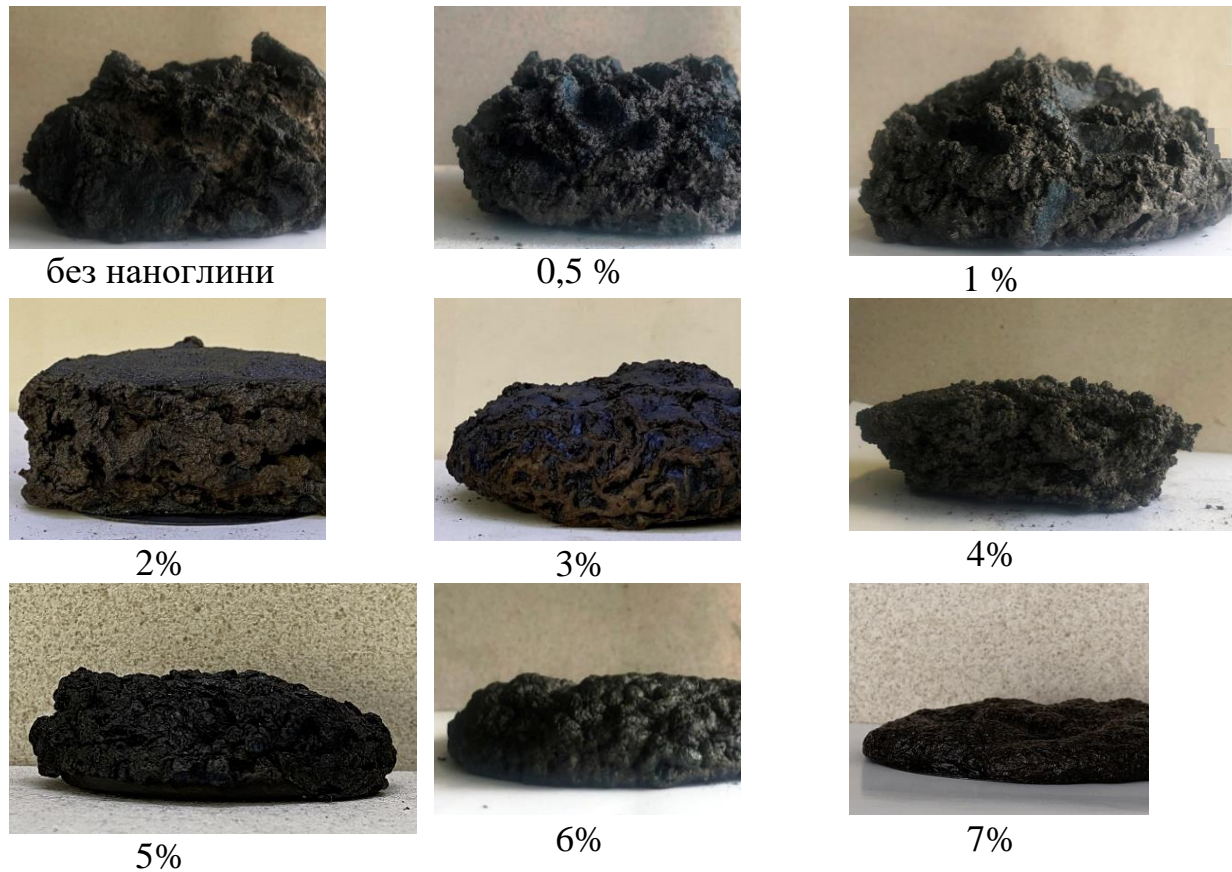


Рисунок 4.19 – Візуалізація експериментальних дослідів з визначення коефіцієнта спучення інтумесцентної вогнезахисної фарби IFR16 у присутності різної кількості наноглини Optigel WA

Для вогневих випробувань були приготовані IFR22–IFR25, склад яких представлено у табл. 4.17. Ці реактивні покриття були випробувані в міні печі в умовах стандартної пожежі за методикою п. 2.7.2 (розд. 2). Товщина покриття на пластинах дорівнювала в середньому 2,0 мм. Результати цього експерименту для IFR22–IFR 25 наведені в табл. 4.17 а зовнішній вид пластин з коксовим шаром після вогневих випробувань на рис. 4.20.

Порівняння даних з межі вогнестійкості (табл. 4.17) демонструє суттєвий вплив кількості глини на показник вогнестійкості R (хв). Домішка наноглини Garamite 7305 у кількості 0,3 % в органорозчинну систему IFR22 (№2, табл. 4.18) збільшує межу вогнестійкості майже на 30 % в порівнянні з IFR2, де глина відсутня (№1, табл. 4.17). В свою чергу, вміст глини Garamite 7305 3 % (№3, табл. 4.18) пригнічує вогнезахист на 40 % (пор. №3 з №1, табл. 4.17).

Таблиця 4.17 – Межа вогнестійкості сталевих пластин з покриттями IFR, визначена у міні-печі

IFR	Наноглина	Вміст наноглини, % мас.	Межа вогнестійкості, R ₁ , хв.	Коефіцієнт спучення, K _i
Органорозчинні IFR APP/MA/PE/TiO ₂ /(SA1+ SA2)				
IFR2	-	-	45	54
IFR22	Garamite 7305	0,3	58	40
IFR23	Garamite 7305	3,0	27	18
Водно-дисперсійні IFR APP/MA/PE/TiO ₂ /EZ3010				
IFR 10	-	-	55	49
IFR24	Optigel WA	0,3	60	52
IFR25	Optigel WA	3,0	80	40

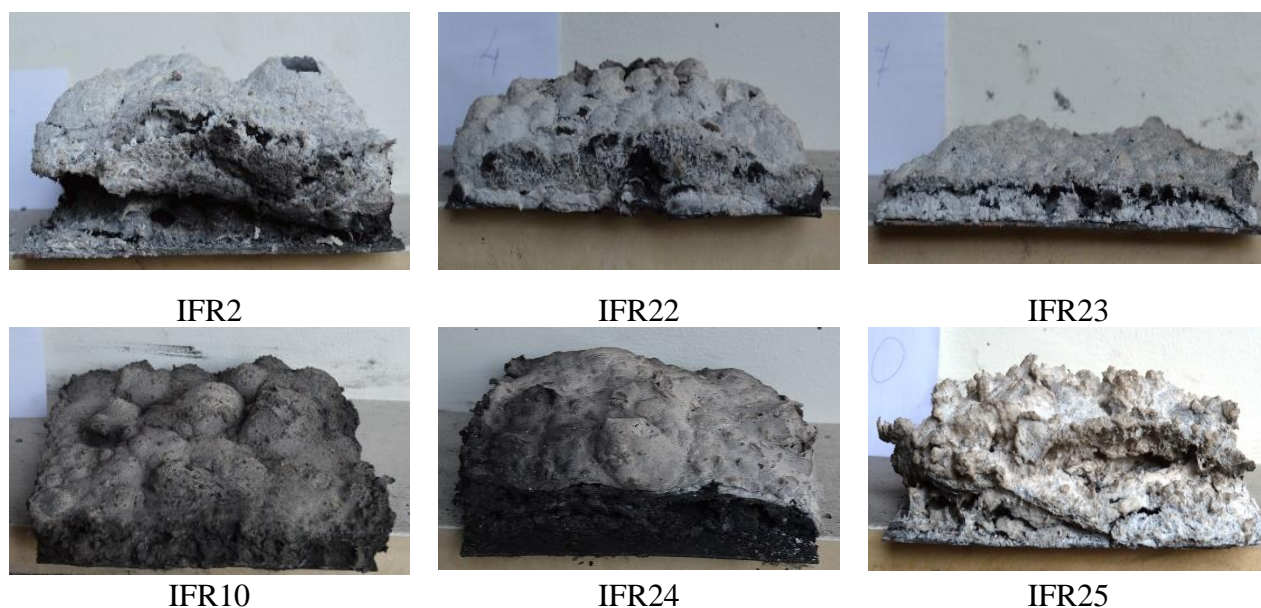


Рисунок 4.20 – Зовнішній вид коксового шару IFR (табл. 4.17) після випробувань у міні печі в умовах стандартної пожежі

Основною причиною такої ситуації є край низьке значення коефіцієнта спучення – падіння якого складає більше ніж у 2 рази, як це продемонстровано на рис. 4.20. На поверхні покриття утворюється міцна керамоподібна поверхня, яка блокує вихід газів, що утворюються та припиняє роботу

інтумесцентної композиції APP/MA/PE.

Вплив кількості наноглин на вогнезахисну ефективність водно-дисперсійних систем IFR23–IFR25 є позитивним, незалежно від концентрації наноглини Optigel WA: 0,3 % домішки (№5, табл. 4.17) збільшують параметр вогнестійкості R на 10 %, а 3 % – на 45 %.

Для збереження вогнезахисної ефективності IFR рекомендовано домішки відповідних наноглин у органорозчинні системи не більше 2 %, а в водно-дисперсійні не більше 4 %.

Визначені величини межі вогнестійкості (табл. 4.17) не є значеннями, що мають співпадати з тими, які визначаються шляхом натурних вогневих випробувань в умовах, прописаних національними стандартами. Але отримані результати щодо впливу структури та кількості наноглин на реологічні та вогнезахисні властивості IFR можуть бути використані при розробці надійних нанопокриттів для сталевих конструкцій на основі складу APP/MA/PE/полімер.

4.4 Вплив гідрофобно модифікованих етоксильованих уретанів на в'язкість полімерних сполучних та інтумесцентних фарб

4.4.1 Реологічні профілі вогнезахисних фарб у присутності HEUR сполук

Ефективність загушення асоціативними загущувачами типу HEUR залежить, перш за все, від ступеню взаємодій з полімерною частиною інтумесцентної фарби. Механізми цих взаємодій є складними й залежать від множинних факторів, які не завжди можна врахувати в умовах промислового виробництва. В цьому розділі роботи представлені результати впливу комерційних етоксильованих поліуретанів (табл. 2.5, розд. 2) для умов низького (Rheobuyk-H 600 VF, далі R600), середнього (Rheolate 255, далі R255) та високого (Rheolate 278, далі R278) зсуву на в'язкість полімерів (табл. 2.2, розд. 2) вінілацетат-етилен (EZ 3010) та вінілацетат-етилен-вініловий етер (EZ

3112). Вивчено також вплив HEUR сполук на реологію фарб реактивного типу з полімерами EZ 3010 (чи EZ 3112). В табл. 4.18 представлено склад базових (без загущувача) інтумесцентних композицій, реологія яких досліджувалася. Кількість HEUR загущувачів в IFR складала 1 % (за мас.), або по 0,5 % у разі використання суміші двох сполук чи по 0,33 % при використанні суміші з трьох сполук.

Таблиця 4.18 – Склад інтумесцентних композицій IFR

Компонент	Мас. %	Назва композиції
Поліфосфат амонію Exolit AP 422	30	
Меламін	11	
Пентаеритрит Charmor PM40	11	
Діоксид титану Ti-Pure R-902	9	
Полімер	20	
Вінілацетат-етилен Vinnapas® EZ 3010		IFR-EZ 3010
Вінілацетат-етилен-версатат Vinnapas® EZ 3112		IFR-EZ 3112
Домішки (диспергатор, піногасник)	3	
Вода	19	

Загальна хімічна структура HEUR сполук (рис. 4.21) представлена гідрофільним полімерним ланцюгом, що складається фрагментів поліоксиетилену (POE), які через уретанові групи з'єднані з гідрофобними вуглеводневими групами R.

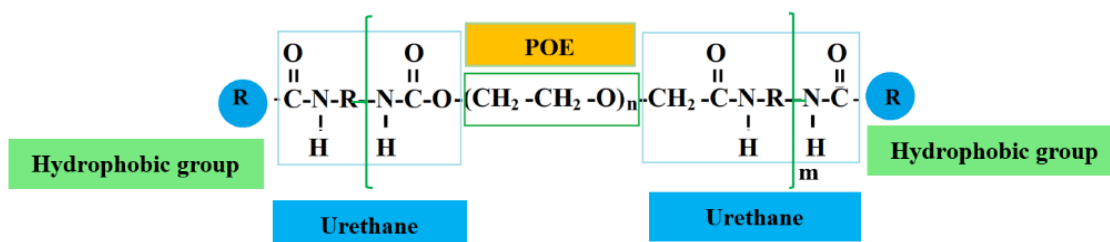


Рисунок 4.21 – Хімічна структура HEUR загущувача

Відомо, що коротші РОЕ і довші алкіли R обумовлюють сильнішу асоціація та більший коефіцієнт загушення при низьких зсувах. В той же час довгі РОЕ обумовлюють стабільну реологію при високих зсувах. В літературі наведено також приблизні довжини РОЕ та R, за якими класифікуються загущувачі: для високого зсуву $R=C_8-C_{12}$, $n=20-60$; для середнього зсуву $R=C_{12}-C_{16}$, $n=10-30$; для низького зсуву $R=C_{14}-C_{18}$, $n=5-20$ [153, 155].

ІЧ-спектри досліджених НЕUR загущувачів представлені на рис. 4.22 та підтверджують їх структуру: гідрофобно модифіковані етоксильовані уретани R600 для умов низького зсуву, R255 для умов середнього зсуву, R278 для умов високого зсуву.

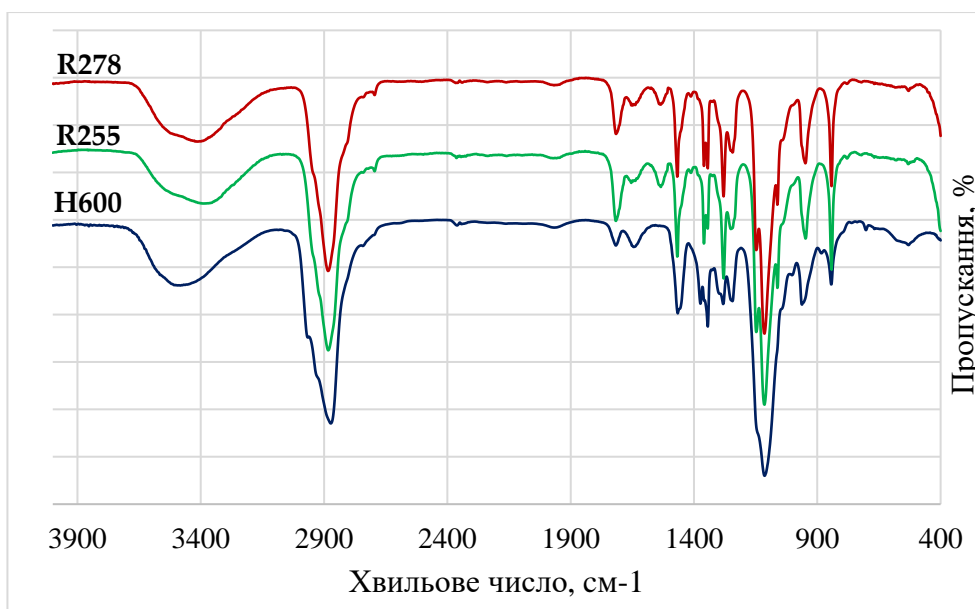


Рисунок 4.22 – ІЧ-спектри НЕUR загущувачів

В спектрах присутні характерні смуги поглинання: $3410-3480\text{ cm}^{-1}$ належать N–H (уретан) та залишкові O–H; $2880-2860\text{ cm}^{-1}$ інтенсивні смуги CH_2/CH_3 гідрофобного фрагменту R; $1720-1712\text{ cm}^{-1}$ та $1640-1630\text{ cm}^{-1}$ обумовлюють коливання C=O груп (карбаматних та уретанових); $1640-1530\text{ cm}^{-1}$ належить N–H уретанової групи; $1460-1360\text{ cm}^{-1}$ віднесені до деформаційних коливань CH_2/CH_3 ; інтенсивна смуга $1145-1105\text{ cm}^{-1}$ характеризує C–O–C фрагменти РОЕ.

Аналіз співвідношення інтенсивностей смуг і порівняння з відомими даними [214], дозволяє умовно визначити структури HEUR модифікаторів. H600 складається з $R=C_{18}$ та POE з $n=10-20$; R255 – $R=C_{12}-C_{16}$, $n=15-25$; R278 – $R=C_8-C_{12}$, $n=25-40$.

На рис. 4.23 представлені реологічні профілі полімерів EZ 3010 та EZ 3112, модифікованих HEUR загущувачами. Динамічна в'язкість була визначена з використанням шпинделю N6 у діапазоні швидкостей обертання шпинделю від 10 до 250 s^{-1} при температурі 20 °C. Аналіз реологічних профілів (рис. 4.23) дозволяє порівняти вплив загущувачів на в'язкість полімерів EZ 3010 та EZ 3112.

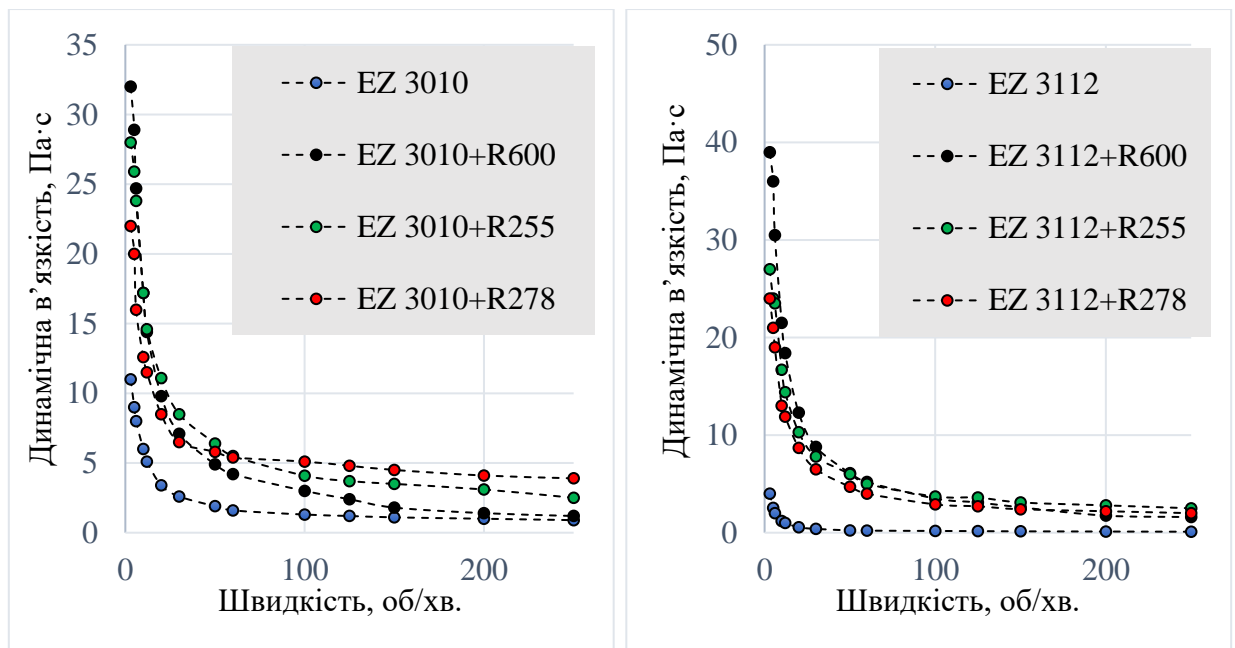


Рисунок 4.23 – Залежність динамічної в'язкості полімерів EZ 3010 та EZ 3112, модифікованих HEUR загущувачами

Обидва полімери як у присутності так і у відсутності HEUR сполук демонструють неньютонівський характер течії – в'язкість розчинів зменшується зі зростанням швидкості зсуву. В свою чергу загущувачі впливають згідно зі своїм призначенням відповідно до області зсуву: найбільші в'язкості при швидкості обертів шпинделю $N=3$ об/хв ($\gamma=0,627 s^{-1}$) забезпечує загущувач для низьких зсувів R600, а найменшу – R278,

призначений для високих зсувів. В'язкість гідрофобного полімеру EZ 3112 у присутності етоксильованих поліуретанів як правило, не набагато вища за в'язкість менш гідрофобного EZ 3010 на всіх швидкостях обертання.

Вплив полімерів EZ 3010 та EZ 3112 на реологію інтумесцентної фарби IFR, продемонстрований на рис. 4.24, дозволяє констатувати, що динамічна в'язкість досліджених фарб практично не залежить від гідрофобності полімеру. Це пов'язано зі специфікою складу вогнезахисних фарб реактивного типу. Зазвичай це високонаповнені композиції з низьким вмістом полімеру (10–12 % мас.). За таких умов взаємодія полімеру з HEUR загущувачем нівелюється взаємодіями з іншими компонентами системи.

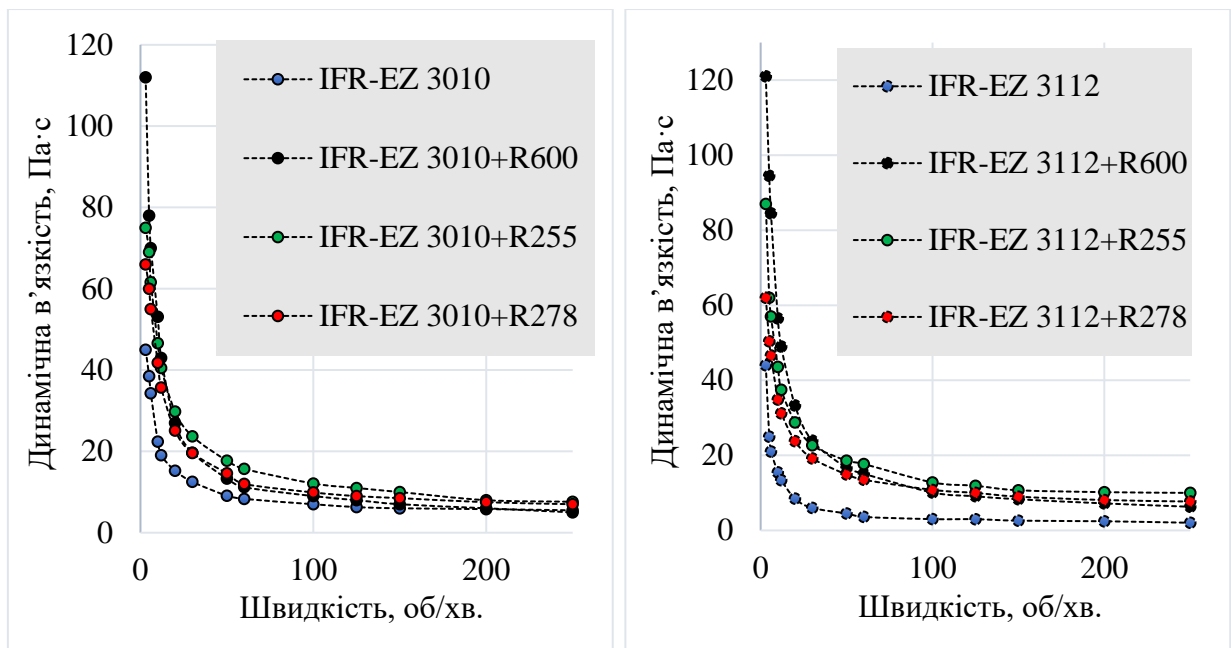


Рисунок 4.24 – Залежність динамічної в'язкості інтумесцентних композицій з полімерами EZ 3010 та EZ 3112 та HEUR загущувачами

Додавання загущувача для низьких зсувів R600 суттєво збільшує в'язкість як IFR-EZ 3010, так і IFR-EZ 3112 лише у стані мінімального зсуву (N до 5 об/хв). Вплив загущувача R255 (середній зсув) на в'язкість також помітний, але менший, ніж у випадку з R600, а модифікатор реології середнього зсуву R278 демонструє найменший вплив на підвищення в'язкості в інтервалі низького зсуву.

4.4.2 Розрахунки за рівнянням Кассона

Реологічні параметри композицій IFR з полімерами EZ 3010 та EZ 3112, отримані в результаті лінеаризації експериментальних даних за рівнянням Кассона (рис. 4.25) наведені у табл. 4.19. З даних табл. 4.19 можливо зробити попередні висновки щодо впливу NEUR загущувача для різних інтервалів зсуву на реологію фарб IFR.

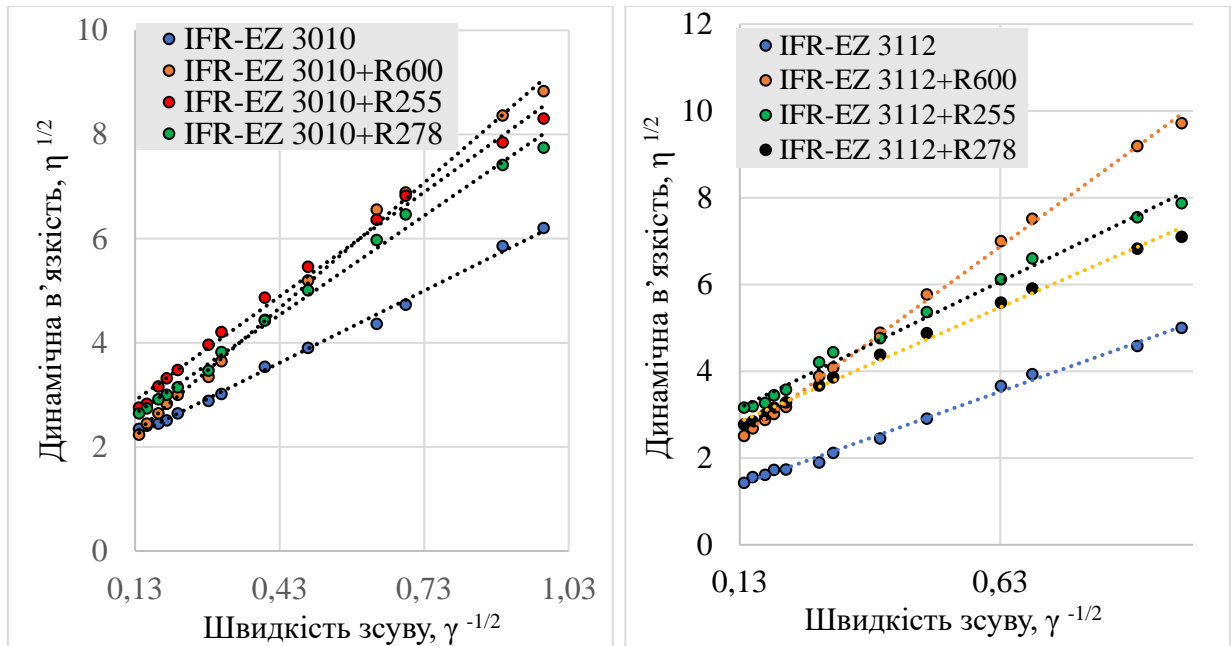


Рисунок 4.23 – Лінеаризація даних з в'язкості вогнезахисних фарб з полімерами EZ 3010 та EZ 3112 та NEUR загущувачами

Додавання загущувача низького зсуву R600 забезпечує значне підвищення значення τ_0 , що свідчить про покращення структурної стабільності фарби при зберіганні. В'язкість η_∞ при високих швидкостях зсуву також підвищується з додаванням усіх типів загущувачів, що має позитивно вплинути на процеси нанесення. Найвищі значення в'язкості η_∞ (4–7 Па·с) спостерігається у системах, де використовуються загущувачі середнього (R255) та високого (R278) зсуву.

В табл. 4.19 розміщені також дані реологічних параметрів фарб IFR, що забезпечуються сумішшю етоксильованих поліуретанів (R600+R255), (R600+R278), (R600+R255+R278) та (R255+R278).

Таблиця 4.19 – Показники реології полімерів та фарб реактивного типу

Фарба	τ_0 , Па	η_{∞} , Па·с	R^2	η_0 , Па·с	T_1	T_2
EZ 3010	9,61±0,48	0,518±0,026	0,993	15,1	1	1
EZ 3010+R600	24,3±1,2	0,632±0,032	0,997	32,3	2,14	2,53
EZ 3010+R255	14,1±0,7	2,04±0,10	0,998	28,2	1,87	1,47
EZ 3010+R278	11,8±0,6	2,96±0,15	0,992	22,1	1,46	1,23
EZ 3112	4,22±0,21	0,207±0,010	0,990	6,12	1	1
EZ 3112+R600	35,5±1,8	0,371±0,019	0,995	39,4	6,44	8,41
EZ 3112+R255	21,7±1,1	1,17±0,06	0,993	30,9	5,05	5,14
EZ 3112+R278	14,4±0,7	1,54±0,08	0,996	24,6	4,02	3,41
IFR-EZ 3010	21,2±1,1	1,26±0,06	0,997	45,2	1	1
IFR-EZ 3010+R600	73,6±3,7	2,44±0,12	0,993	83,0	1,84	3,47
IFR-EZ 3010+R255	38,4±1,9	4,04±0,20	0,995	75,2	1,66	1,81
IFR-EZ 3010+R278	39,7±2,0	3,84±0,19	0,995	66,7	1,48	1,87
IFR-EZ 3112	18,5±0,9	1,19±0,06	0,999	44,1	1	1
IFR-EZ 3112+R600	76,9±3,8	1,82±0,09	0,992	121	2,74	4,16
IFR-EZ 3112+R255	33,8±1,7	5,76±0,29	0,989	87,4	1,98	1,83
IFR-EZ 3112+R278	30,8±1,5	6,57±0,33	0,995	62,6	1,42	1,66
IFR-EZ 3010+R600+R255	63,3±3,2	4,58±0,23	0,998	102	2,26	2,99
IFR-EZ 3010+R600+R278	52,4±2,6	4,96±0,25	0,993	86,0	1,9	2,47
IFR-EZ 3010+R600+ R255+R278	58,9±2,9	4,02±0,20	0,989	92,5	2,05	2,78
IFR-EZ 3010+R255+R278	34,1±1,7	3,87±0,19	0,992	45,8	1,01	1,61
IFR-EZ 3112+R600+R255	64,5±3,2	3,17±0,16	0,989	89,4	2,03	3,49
IFR-EZ 3112+R600+R278	48,7±2,4	3,96±0,20	0,995	56,8	1,29	2,63
IFR-EZ 3112+R600+R255+R278	59,8±3,0	2,25±0,11	0,998	94	2,13	3,23
IFR-EZ 3112+R255+R278	29,4±1,5	3,28±0,16	0,991	44,5	1,01	1,59
IFR- EZ 3010 + HV80	224±11	1,84±0,09	0,993	267	5,9	6,4

Отримані результати свідчать про адитивну, або навіть слабку синергічну дію (підвищення на 10–15 % від очікуваної адитивної в'язкості) комбінації загущувачів. Очевидно використання сумішей HEUR загущувачів для різних інтервалів зсуву може бути інструментом удосконалення реологічних характеристик вогнезахисних фарб інтумесцентного типу в напрямках зниження седиментації при зберіганні та товщини мокрого шару при нанесенні.

4.4.3 Тиксотропні ефекти, седиментація та провисання

За даними, наведеними в табл. 4.19 було розраховано бруто тиксотропні ефекти T_1 та T_2 , які демонструють позитивний вплив HEUR сполук як на зберігання вогнезахисних фарб, так на процеси нанесення. Порівняння значень параметрів T для полімеру та інтумесцентних композицій, що приведені в табл. 4.19 однозначно вказує що найкращими варіантами для загущення полімерів є комбінація гідрофобного сполучного EZ 3112 з R600 (низький зсув) $T_1=6,44$, $T_2=8,41$, або EZ 3112 з R255 (середній зсув) $T_1=5,05$, $T_2=5,14$. Ця тенденція не є такою очевидною для IFR фарб. Тим не менш можна констатувати, що полімер EZ 3112 з R600 і R255 демонструє найбільші показники тиксотропності серед усіх досліджених зразків. Це робить його найбільш придатним для застосування, де потрібні високі тиксотропні властивості.

Візуалізація прикладів експерименту з оцінки седиментації (п. 2.4, розд. 2) та провисання (стікання) фарби після нанесення (п. 2.5, розд. 2) продемонстрована на рис. 4.24. На рис. 4.25 представлена залежність визначених параметрів седиментації (l_1) та провисання (l_2 при товщині мокрого шару 2 мм) від тиксотропних ефектів, які є відповідальними за ці процеси.

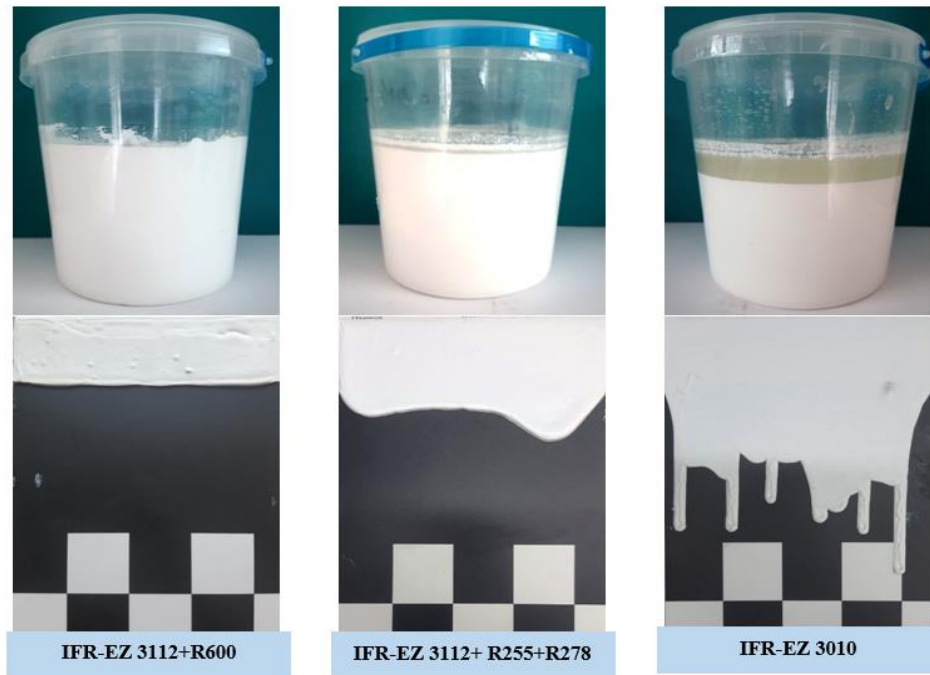


Рисунок 4.24 – Візуалізація експериментальних дослідів з перевірки седиментації та провисання IFR

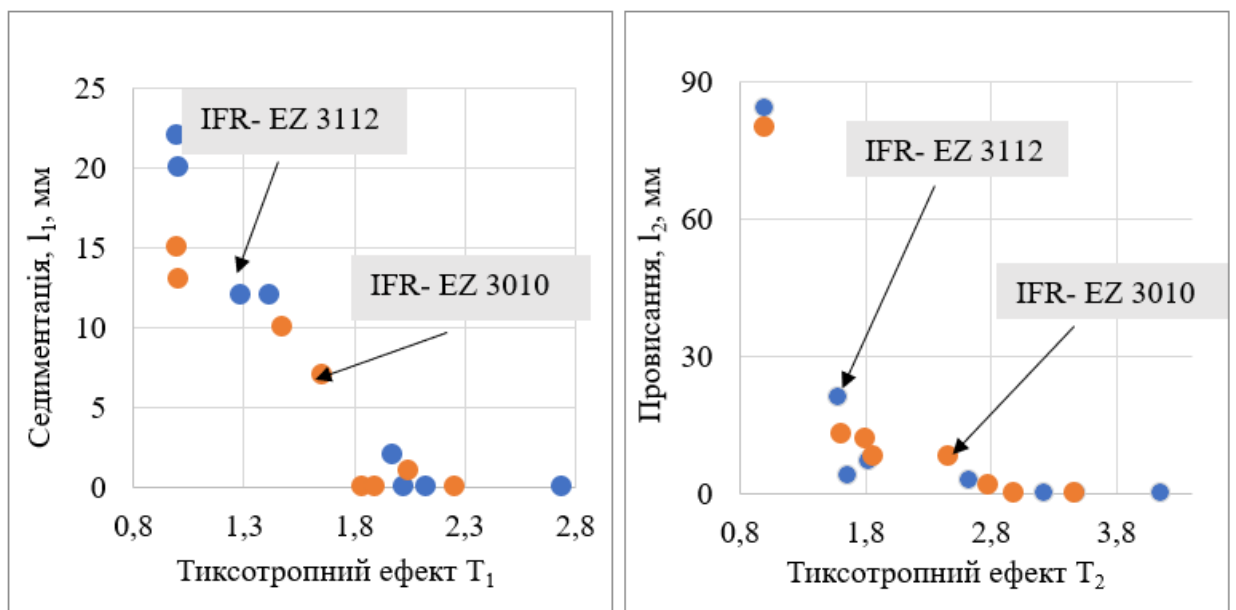


Рисунок 4.25 – Залежність ступеню седиментації при зберіганні (I_1) та довжини провисання при нанесенні (I_2) від тиксотропних ефектів IFR у присутності NEUR загущувачів

Із залежності висоти рідини над фарбою I_1 від значення тиксотропного ефекту T_1 можливо оцінити, що седиментація має при бути відсутньою

$T_1 > 1,75$. Ці значення відповідають початковій в'язкості фарби η_0 , яка має перевищувати у середньому 80 Па·с.

Досліди з провисання фарб проводили при двох товщинах мокрого шару – 0,7 мм та 2 мм. При нанесенні товщини 0,7 мм усі досліджені фарби IFR незалежно від присутнього у складі полімеру та HEUR модифікатора продемонстрували відсутність будь-якого провисання чи стікання по вертикальній поверхні ($l_2=0$). Цей результати дозволяє констатувати, що для нанесення фарби типу IFR товщиною мокрого шару 0,7 мм достатніми реологічними параметрами є значення η_0 від 15 Па·с, а τ_0 від 10 Па.

На рис. 4.26 наведені дані експерименту з провисання фарби, мокрий шар якої складає 2 мм. Очікувано, що довжина провисання l_1 знижується зі збільшення значення тиксотропного параметру T_2 та дорівнює 0 при $T_2 > 2,8$. Такий тиксотропний ефект забезпечують фарби, які мають напругу зсуву τ_0 , що перевищує у середньому 50 Па.

Аналіз представлених даних (рис. 4.26) дозволяє зробити наступні висновки:

- фарби, що містять R600, загущувач для низьких зсувів, демонструють мінімальні показники чи повну відсутність провисання ($l_2=0$). Системи з R255 (для середніх зсувів) і R278 (для високих зсувів) характеризуються відчутними значеннями провисання, але зменшують показник l_2 в 5-7 разів у порівнянні з системами без загущувача. Комбінації тиксотропних модифікаторів, такі як R600+R255 та R600+R255+R278, демонструють покращені результати з провисання;
- присутність загущувача R600 у кількості 1 % в досліджених IFR гарантує відсутність седиментації компонентів протягом 6 міс. Фарби, що містять загущувачі R255 та R278 демонструють наявність седиментації твердих часток, яка збільшується в ряду R600 < R255 < R278. Комбінація загущувачів R255 та R278 з R600, позитивно впливає на зменшення седиментації, що вказує ефективність модифікатора R600 у підтримці стабільності фарбових вогнезахисних систем.

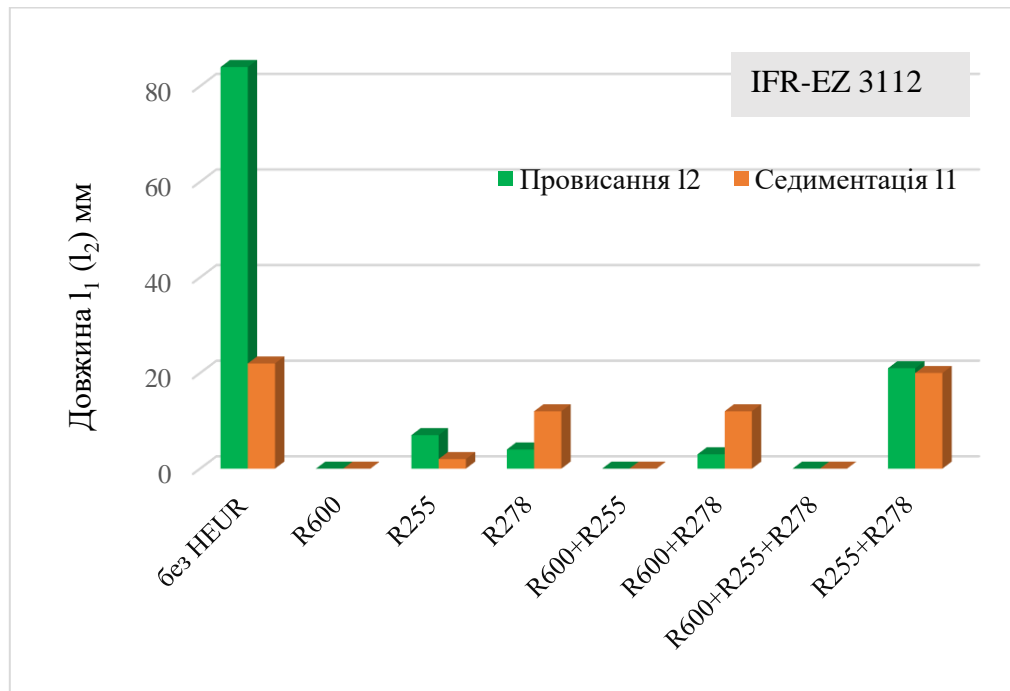
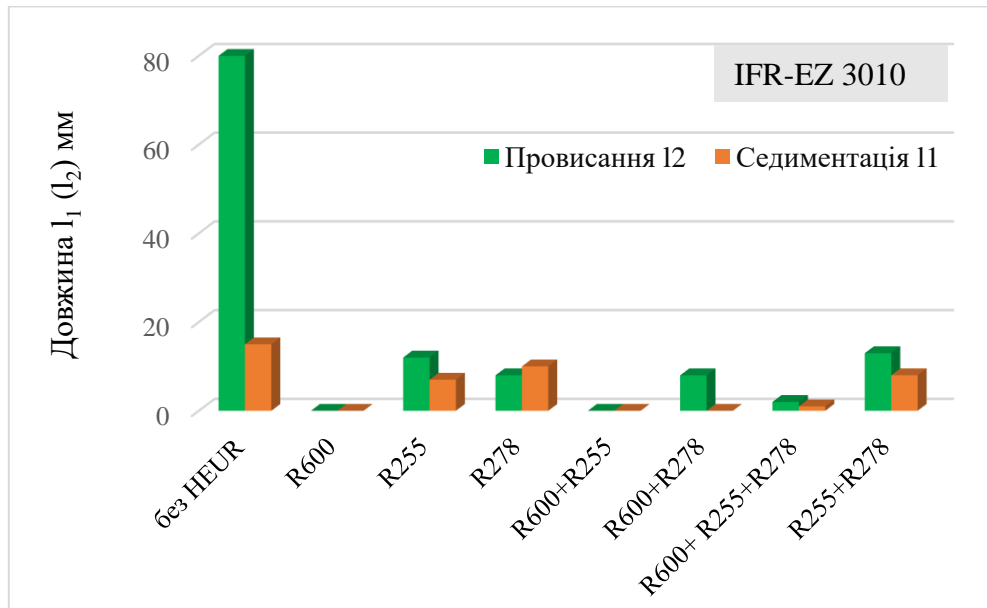


Рисунок 4.26 – Залежність ступеню седиментації при зберіганні (I_1) та довжини провисання при нанесенні (I_2) від тиксотропності інтумесцентних фарб у присутності HEUR загущувачів

З аналізу впливу HEUR загущувачів на реологію фарб IFR (табл. 4.19) можна зробити висновок: жодна з досліджених композицій при концентрації загущувача 1 мас. % не дозволяє наносити шари фарби до товщини 2 мм. Для вирішення задачі по зменшенню витрат на вогнезахисну обробку потрібні інші підходи, наприклад, збільшення концентрації загущувача.

На рис. 4.27 представлена залежність в'язкості композиції IFR-3010 (з різним вмістом нелетких речовин (н. р.)) від кількості HEUR-загущувачів. Ці результати свідчать, що для обох IFR-3010 існує порогове значення концентрації HEUR-сполук після якого в'язкість фарб має у межах похибки вимірювань постійне значення. При цьому граничне значення концентрації HEUR для більш розрідженої фарби (н.р. 66–67 %, рис. 4.27) складає 0,8–1 %, а для більш концентрованої (н.р. 71–72 %, рис. 4.27) – 1,2–1,5 %. При концентрації HEUR $\geq 1,5$ % у досліджених композиціях спостерігається стабільний синерезис, який починається на першому тижні зберігання. Факти насичення лако-фарбових систем HEUR-модифікаторами з наступною седиментацією твердих компонентів описані в низці оглядів [153– 155].

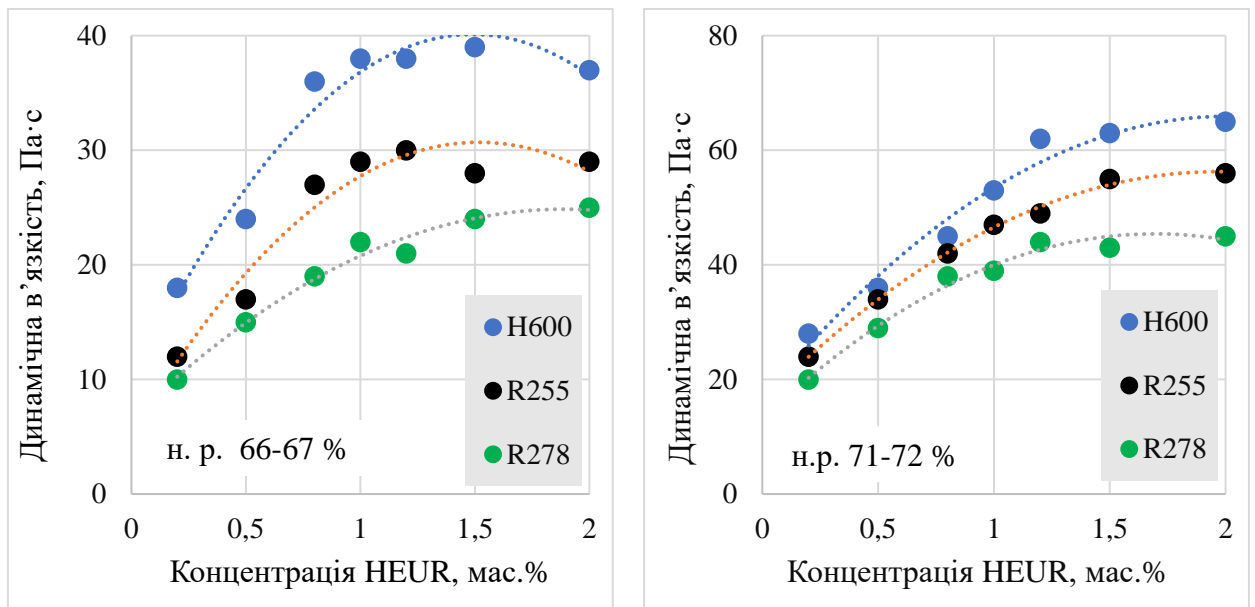


Рисунок 4.27 – Значення динамічної в'язкості інтумесцентної композиції IFR-3010 при збільшенні концентрації HEUR-загущувачів

Для переведення отриманих результатів в практичну площину було проведено порівняння показників реології досліджених фарб IFR з аналогічними показниками комерційних вогнезахисних фарб (табл. 4.3).

Встановлено що до фарби Steelguard 651, яка може наноситися на сталеві конструкції товщиною в 1 мм, є наближеними такі IFR: IFR-EZ 3010+R600,









IFR-EZ 3112+R600, IFR-EZ 3010+R600+R255, IFR-EZ 3112+R600+R255, IFR-EZ 3010+R600+ R255+R278, IFR-EZ 3010+R600+ R255+R278. Ці композиції мають значення показників τ_0 , η_0 та η_∞ близькі до аналогічних показників комерційної фарби Steelguard 651. Відповідно можна зробити припущення, що максимальна товщина мокрого шару інтумесцентних фарб IFR, модифікованих тільки HEUR сполуками не може перевищувати 1 мм. Для досягнення реологічних показників на рівні фарби Promapaint SC3, яку можливо наносити товщиною 2,0 мм за один прохід, необхідно продовжити дослідження в двох напрямках. По-перше, встановити оптимальні пропорції HEUR сполук для різних зсувів у суміші загущувачів. По-друге, дослідити тиксотропні ефекти комбінацій асоціативних HEUR сполук з загущувачами неасоціативного типу – етерами целюлози та наноглинами. Такі дослідження можуть істотно підвищити тиксотропні властивості інтумесцентних систем реактивного типу, що важливо для досягнення високої якості самого вогнезахисного матеріалу.

Крім HEUR модифікаторів до розповсюджених загущувачів асоціативного типу відносяться HASE загущувачі гідрофобно модифіковані лугорозчинні емульсії, наприклад, акрилат амонію – Rheobuck-HV 80 (HV80).

В табл. 4.20 представлені реологічні параметри фарби IFR-3010 + HV80, яка загущена лише акрилатним загущувачем HV80. На відміну від HEUR модифікаторів присутність у системі HV80 значно підвищує в'язкість (η_0), а відповідно й межу текучості (τ_0) в інтервалі низьких швидкостей зсуву. При високих швидкостях зсуву значення η_∞ для IFR-3010+HV80 співрозмірне з аналогічними величинами для композицій з HEUR загущувачами (табл. 4.19).

Практичні спостереження за композиціями IFR, що загущені індивідуальними асоціативними загущувачами (HEUR чи HASE) у кількості 1 % демонструють результати, наведені у табл. 4.20.

Таблиця 4.20 – Досліди із седиментації та нанесення інтумесцентних композицій

Фарба	Седиментація ¹⁾	Нанесення ²⁾	Примітка
IFR-3010 + H600	 $I_1 < 1\text{ мм}$		Відсутність седиментації, помітне кратероутворення
IFR-3010 + R255	 $I_1 3-4\text{ мм}$		Незначна седиментація, незначні дефекти поверхні
IFR-3010 + R278	 $I_1 7-8\text{ мм}$		Помітна седиментація, поверхня без дефектів
IFR-3010 + HV80	 $I_1 < 1\text{ мм}$		Відсутність седиментації, погане розтікання фарби, тріщиноутворення

Примітка: ¹⁾б міс. зберігання; ²⁾нанесення щіткою; товщина реактивного покриття 2 мм

В свою чергу HEUR загущувачі сприяють розтіканню та вирівнюванню фарби з покращенням цих параметрів у ряду H600 < R255 < R278. При цьому

вони не здатні забезпечити зберігання фарби без седиментації, яка збільшується при переході від загущувачів для низького зсуву H600 до загущувача для високого зсуву R278 (табл. 4.19). Ці висновки знаходяться у відповідності до значень межі текучості (τ_0) досліджених фарб, розрахованих за рівнянням Кассона (табл. 4.19).

При розгляді реактивних фарб інтумесцентного типу треба знати, що з причини їх особливого компонентного складу на них можуть не розповсюджуватися відомі з наукової літератури тенденції з впливу асоціативних загущувачів (HEUR чи HASE) на реологічні показники. Тому реологічні характеристики IFR-системи не можуть бути створені лише за рекомендаціями виробників модифікаторів реології чи за аналогією з науковими дослідженнями для звичайних архітектурних фарб стосовно вибраних загущувачів. Для кожної конкретної композиції IFR потрібно проведення масштабованого експерименту щодо вибору типу модифікатора реології, оптимального дозування, комбінацій з іншими типами загущувачів.

4.4 Комбінування модифікаторів реології у вогнезахисних фарбах

4.5.1 Реологічні характеристики у присутності суміші загущувачів

Подальші дослідження цієї роботи спрямовані на пошук системи модифікаторів реології, які надають інтумесцентній композиції IFR-EZ3010 (рецептура табл. 4.18) реологічні параметри для нанесення максимальної товщини мокрого шару (див. фарба Promapaint SC 3, табл. 4.3). В табл. 4.21 та табл. 4.22 наведено комбінації загущувачів, які було додано у базову фарбу IFR-EZ3010.

Співвідношення загущувачів НЕМС-2:Optigel WA в композиції IFR7 складає 1:1 (по 0,5 мас.ч). В композиціях IFR2–IFR5 загущувачі присутні у співвідношенні 1:1:1 (по 0,33 мас. ч.).

Таблиця 4.21 – Склад інтумесцентних фарб з сумішшю загущувачів

Шифр фарби	Основа	HEMC-2/ Optigel WA	HEMC-2/ Optigel WA/ H600	HEMC-2/ Optigel WA/R255	HEMC-2/ Optigel WA/R278	HEMC-2/ Optigel WA/HV80
IFR1	99	1,0				
IFR2	99		1,0			
IFR3	99			1,0		
IFR4	99				1,0	
IFR5	99					1,0

Таблиця 4.22 – Склад інтумесцентних фарб з різним вмістом загущувачів

Шифр фарби	Основа	HEMC-2	Optigel WA	R255	H600	R278
IFR6	98	1,0	1,0	-	-	-
IFR7	98	0,5	1,0	0,5	-	-
IFR8	98	0,4	0,6	1,0	-	-
IFR9	98	0,4	0,6	0,5	0,5	-
IFR10	98	0,4	0,6	0,5	-	0,5

Реологічні профілі фарб IFR1–IFR10 у присутності суміші загущувачів HEMC-2+Optigel WA +HEUR (HASE) представлені на рис. 4.28. Розраховані за рівнянням Кассона параметри реології цих фарб містяться у табл. 4.23.

Очікувано комбінація модифікаторів різних типів, як за механізмом загущення, так і за цільовим призначенням (зберігання, нанесення), комплексно удосконалила експлуатаційні властивості. З аналізу реологічних профілей фарб IFR1–IFR4 очевидно, що в трійці HEMC-2+Optigel WA+HEUR, домінуючу роль відіграє суміш HEMC-2+Optigel WA.

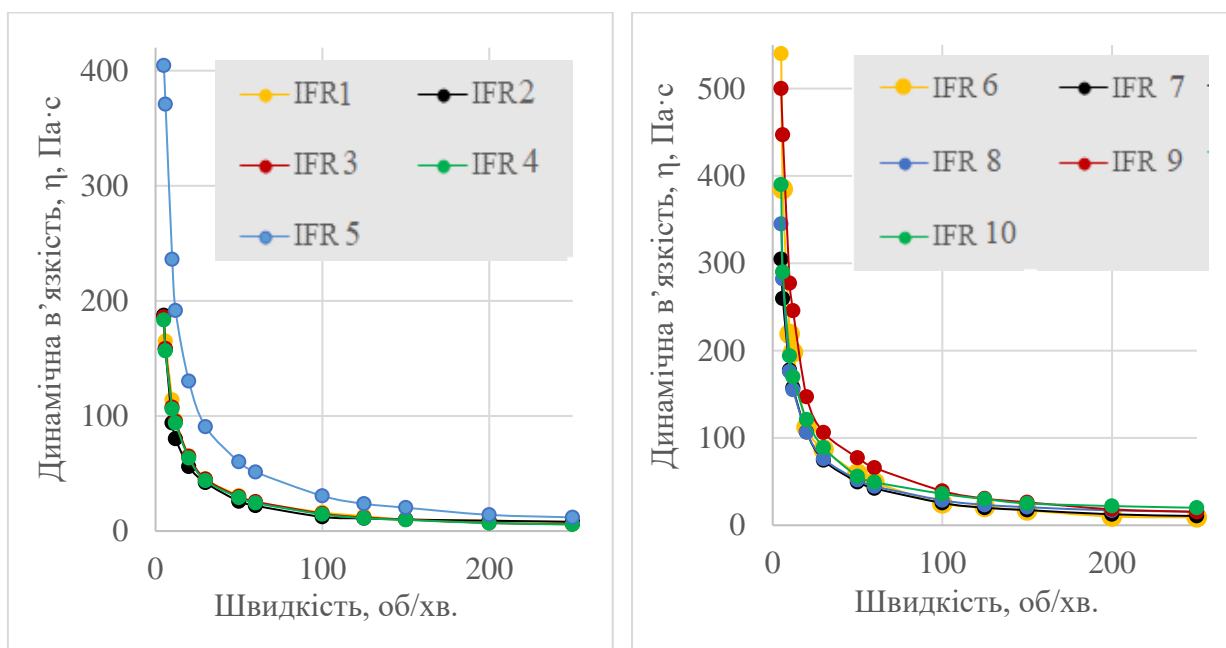


Рисунок 4.28 – Значення динамічної в'язкості інтумесцентних композицій IFR1–IFR5 (табл. 4.21) та IFR6–IFR10 (табл. 4.22) при збільшенні обертів шпинделю

Таблиця 4.23– Показники реології композицій реактивного типу

Фарба	η_0^1 , Па·с	η_∞ , Па·с	τ_0 , Па	R^2	T_1	T_2
IFR-EZ3010	45,2±2,5	1,26±0,02	21,2±1,5	0,992	1	1
IFR1	250±11	1,66±0,08	173±7	0,995	5,5	8,2
IFR2	284±15	0,59±0,01	229±14	0,995	6,3	10,8
IFR3	248±12	1,49±0,07	189±8	0,999	5,5	8,9
IFR4	193±13	2,10±0,05	147±12	0,992	4,3	6,9
IFR5	404±32	1,18±0,04	320±26	0,989	8,9	15,1
IFR6	620±25	1,20±0,04	508±32	0,995	13,7	24,0
IFR7	350±18	1,10±0,11	306±19	0,998	7,7	14,4
IFR8	420±32	2,96±0,13	295±18	0,993	9,3	13,9
IFR9	560±38	1,98±0,11	529±23	0,993	12,4	25,0
IFR10	440±28	4,33±0,05	309±16	0,997	9,7	14,6

Примітка. ¹⁾Виміряна при 3 об/хв ($\dot{\gamma} = 0,627 \text{ c}^{-1}$) на приладі Брукфілда із застосуванням Sp7, 20 °C

Домішки HEUR (при концентрації 0,33 мас.% у суміші загущувачів) для різних зсувів змінюють реологію в незначних межах (табл. 4.23). Так спостерігається зниження межі текучості τ_0 для IFR2 (220 Па) > IFR3 (189 Па) > IFR4 (147 Па). При цьому в зворотному порядку збільшується в'язкість η_∞ IFR2 (0,59 Па·с) > IFR3 (1,49 Па·с) > IFR4 (2,10 Па·с). Високі значення межі текучості (320 Па) демонструє фарба IFR5, загущена сумішшю НЕМС+Optigel WA+HV80. Однак значення η_∞ для IFR5 складає лише 1,18 Па·с.

Збільшення у два рази загальної концентрації загущувача з варіюванням співвідношення загущувачів у суміші (табл. 4.22) дещо підвищує значення η_∞ (IFR6–IFR10, табл. 4.23). Але як негативні наслідки дії систем загущення НЕМС+Optigel WA (IFR6, табл. 4.23), НЕМС-2+Optigel WA+H600+R255 (IFR9, табл. 4.23) слід розглядати дуже високі значення початкової в'язкості (η_0) та межі текучості (τ_0). Такі характеристики η_0 та τ_0 створюють певні труднощі фасування та розливу продукту на виробництві та при нанесенні на будівельному майданчику.

4.5.2 Експлуатаційні властивості та вогнестійкість

В табл. 4.23 наведено бруто тиксотропні ефекти T_1 та T_2 , які спостерігаються при загущенні вогнезахисної інтумесцентної системи IFR0 різними загущувачами чи їх сумішшю. Значення T_1 та T_2 , отримані при комбінуванні загущувачів різних типів, перевищують аналогічні для загущення індивідуальними сполуками (табл. 4.15, табл. 4.19). На рис. 4.29 представлена залежність визначених параметрів седиментації (l_1) від початкової в'язкості IFR (η_0 , Па·с) та провисання (l_2 при товщині мокрого шару 2 мм) значень межі текучості (τ_0 , Па).

З даних рис. 4.29 походить, що для зберігання фарби протягом 6 міс. без ознак синерезису значення η_0 повинно перевищувати у середньому 200 Па·с. А для нанесення 2 мм бездефектного мокрого шару за один прохід значення межі текучості τ_0 має бути більшим за 250 Па.

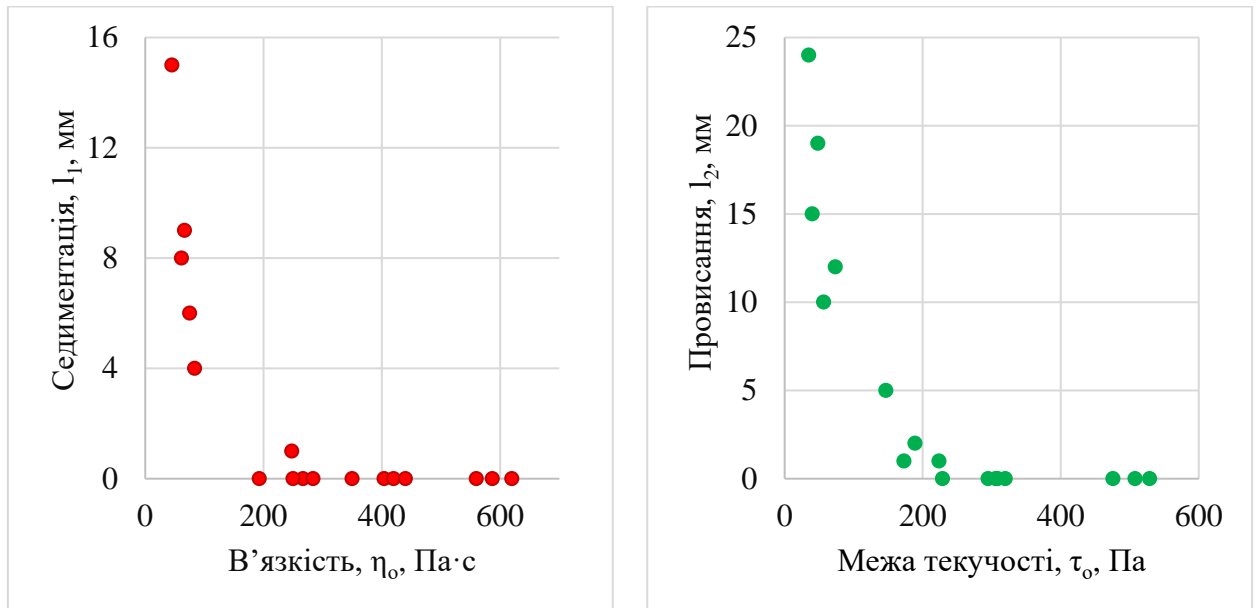


Рисунок 4.29 – Залежність ступеню синерезису при зберіганні (I_1) та довжини провисання при нанесенні (I_2) від початкової динамічної в'язкості (η_0) та межі текучості (τ_0) інтумесцентних фарб IFR-EZ3010–IFR10

Для перевірки висновків лабораторного експерименту було проведено натурне нанесення деяких фарб, параметри реології яких мають «граничні» значення. Визначали можливість нанесення товщини мокрого шару ($d \geq 2$ мм) без провисань та підтьоків з формуванням бездефектного покриття (без розтріскувань та кратероутворення у процесі сушіння). Нанесення проводили на вертикально розташовані металеві пластини розміром 100x100 см агрегатом безповітряного фарбування з високим тиском Graco Mark V. Результати експерименту наведені на рис. 4.30.

Досліди з механізованого нанесення фарб IFR механізованим способом свідчать, перш за все, про критичну роль значення в'язкості при високих зсувах (η_∞), якщо метою є отримання шару мокрого покриття не менше 2 мм. В'язкість η_∞ дозволяє контролювати процес нанесення покриття: надто низькі значення η_∞ призводять до провисання або стікання фарби (рис. 4.30 а, б). В свою чергу, високі значення межі текучості τ_0 (рис. 4.30 в, г) приводять до розтріскування реактивного покриття при помірних значеннях η_∞ .



а) НЕМС-2 – 1%
 $\tau_0 = 605 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 0,10 \text{ Па}\cdot\text{с}$



б) НЕМС-2 – 0,33 %
 Optigel WA – 0,33 %
 H600 – 0,33 %
 $\tau_0 = 229 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 0,59 \text{ Па}\cdot\text{с}$



в) НЕМС-2 – 1 %
 Optigel WA – 1 %
 $\tau_0 = 508 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 1,20 \text{ Па}\cdot\text{с}$



г) НЕМС-2 – 0,4 %
 Optigel WA – 0,6 %
 H600 – 0,5 %
 R255 – 0,5 %
 $\tau_0 = 529 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 1,98 \text{ Па}\cdot\text{с}$



д) НЕМС-2 – 0,4 %
 Optigel WA – 0,6 %
 R255 – 1,0 %
 $\tau_0 = 295 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 2,96 \text{ Па}\cdot\text{с}$



е) НЕМС-2 – 0,4 %
 Optigel WA – 0,6 %
 R255 – 0,5 %
 R278 – 0,5 %
 $\tau_0 = 309 \text{ Па}$, $\eta_\infty = 4,33 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Рисунок 4.30 – Зовнішній вид інтумесцентних покриттів IFR-EZ3010 з різними комбінаціями загущувачів, нанесених механізованим методом з товщиною мокрого шару 2 мм

Як основну причину розтріскування висиханні покриття з високою межею текучості (τ_0) слід розглядати виникнення внутрішніх напруг, які перевищують міцність зовнішньої плівки. Звичайно можуть бути й інші пояснення дефектів покриття, які виникають при нанесенні IFR-фарб товстими шарами. Але не викликає сумнівів, що для підвищення

технологічності процедури нанесення необхідна гармонізація всіх без виключення основних параметрів реології інтумесцентної композиції.

Негативний вплив високої межі текучості на рівні $\tau_0 > 400$ Па проявляється при виробництві та перекачуванні фарби, бо вимагає збільшених енерговитрат, а іноді і спеціального обладнання. При нанесенні фарби з високою межею текучості треба більше зусиль на перемішування перед застосуванням та значного тиску агрегатів при нанесенні [153].

В цілому масштабоване нанесення IFR підтверджує отримані раніше висновки лабораторних експериментів. З дослідів (рис. 4.29) встановлено, що фарби IFR14 (HEMC-2+Optigel WA+R255) та IFR16 (HEMC-2+Optigel WA+R255+R278) можливо наносити за один прохід з товщиною мокрого шару 2,0 мм без стікань, провисань та розтріскування.

Для перевірки впливу різних типів модифікаторів реології на вогнезахисну ефективність IFR були проведені вогневі випробування у міні-печі (методика 2.7.2, розд. 2), а також визначено коефіцієнт спучення за методикою 2.6, що описана в розд. 2. В табл. 4.24 наведені результати цих досліджень.

Таблиця 4.24 – Вогнезахисна ефективність покриттів реактивного типу у присутності загущувачів та їх комбінацій

Покриття	Загущувач	Товщина покриття, мм	K, см ³ /Г	R ₁ , хв
IFR-EZ3010	-	1,05±0,10	31	34
IFR-EZ3010	R255	1,11±0,12	32	35
IFR-EZ3010	HV 80	1,13±0,11	29	33
IFR-EZ3010	HEMC-2+Optigel WA+R255+R278	1,09±0,13	30	36

В межах похибки експерименту додавання загущувачів, що були використані у цьому дослідженні, не впливає на коефіцієнт спучення (K, см³/Г) та на межу вогнестійкості (R₁, хв) фарби IFR-EZ3010 (без загущувачів).

4.6. Рекомендації щодо реологічних показників фарб реактивного типу для виробників засобів пасивного вогнезахисту

Проведені розрахункові та експериментальні дослідження реології вогнезахисних фарб реактивного типу дозволяють визначити гранично усереднені значення реологічних параметрів, які забезпечують оптимальний реологічний профіль вогнезахисних фарб реактивного типу відповідно до використаних систем загушення. Результати дослідження вносять деякі незначні корективи параметрів табл. 4.3 щодо значень η_0 , τ_0 та η_∞ IFR-фарб, які загушені системою (HEMC-2+наноглина+HEUR) та забезпечують товщину мокрого шару 2 мм (табл. 4.25). Саме такими реологічними показниками має характеризуватися фарба реактивного типу, розрахована на клас вогнестійкості $R \geq 150$ хв, яка розробляється в цій дисертаційній роботі.

Таблиця 4.25 – Реологічні показники вогнезахисних фарб для нанесення товщини мокрого шару 2 мм¹

Характеристика	Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$, c^{-1}	В'язкість, $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Межа текучості, Pa
Зберігання (низький зсув)	0,1	$\eta_0 > 200$	$\tau_0 > 100$
Нанесення механізованим методом з товщиною мокрого шару 2 мм	10^4	$\eta_\infty > 3$	$\tau_0 > 300$
Мінімальне провисання при товщині мокрого шару 2,0 мм	1	$\eta_0 \sim 200$	$\tau_0 > 250$

Примітка: ¹Дані для вимірювань на приладі Брукфілда із застосуванням Sp7, 20 °C .

Висновки цього дослідження стосуються поліфосфатних IFR (APP/MA/PE), що є найбільш поширеним сучасним різновидом інтумесцентного вогнезахисту. Звичайно, рецептури цих фарб від різних виробників будуть різнитися за використаними полімерами, спеціальними наповнювачами, добавками та реологічними модифікаторами. Тим не менш,

за результатами цього дослідження можливо рекомендувати рецептурну частину модифікаторів реології:

- доцільно використовувати комбіновану систему загущення: НЕМС (етер целюлози) + гідрофільна наноглина (Optigel WA або аналог) + асоціативні HEUR (комбінація модифікаторів для середнього+високого зсуву);
- орієнтовні кількості загущувача: сумарна концентрація модифікаторів реології складає 2,0–2,5 мас.%; рекомендоване співвідношення для досягнення $d=2$ мм – етер целюлози НЕМС (0,5–1,0 %), наноглина 0,5–2,0 % (але не більше 2 % для мінімізації зниження коефіцієнта спучення K), HEUR 0,3–1,0 %;
- не рекомендується застосовувати високі концентрації HEUR (>1,2–1,5 %), бо існує ризик синерезису;
- для забезпечення стабільності при тривалому зберіганні необхідно застосовувати НЕМС як базовий стабілізатор;
- наноглина підвищує вогнезахисні властивості (R) і реологічну тиксотропію, але її вміст контролювати для уникання зниження коефіцієнта спучення K;
- надто високе значення межі текучості τ_0 (>400 Па) ускладнює виробництво та нанесення фарби і може викликати розтріскування при висиханні; надто низьке значення в'язкості при високих зсувах η_∞ (<1 Па·с) провокує провисання.

Для оперативного контролю якості кінцевого продукту в умовах виробництва достатньо вимірювати динамічну в'язкість на віскозиметрі типу Брукфілд при фіксованій швидкості обертів шпинделя. Кореляцію між цими вимірюваннями та максимальною товщиною мокрого шару представлено в табл. 4.26. Отримані значення динамічної в'язкості дозволять виробникові оперативно оцінювати придатність партії до нанесення без проведення повного реологічного профілювання.

Слід підкреслити, що наведені в табл. 4.26 значення динамічної в'язкості вимагають валідації під конкретну рецептуру та умови виробництва. Однак практична цінність отриманих результатів суттєво підвищується в зв'язку з тим, що їх одержано на основі комбінованого аналізу реологічних

властивостей комерційних фарб та фарб за власними розробленими рецептурами.

Таблиця 4.26 – Залежність товщини мокрого шару вогнезахисної фарби від рекомендованої динамічної в'язкості¹

Товщина мокрого шару, мм	Динамічна в'язкість, η , Па·с	
	30 об/хв	50 об/хв
1	15 – 25	10 – 15
1,5	30 – 50	20 – 40
2,0	70 – 90	60 – 70

Примітка. ¹Дані для вимірювань на приладі Брукфілда із застосуванням Sp7, 20 °С .

Практичне значення дослідження полягає в тому, що застосування запропонованих критеріїв реології дозволяє знизити кількість рекламаций і втрат матеріалу, оптимізувати виробничі операції та суттєво зменшити витрати на вогнезахисну обробку будівельних об'єктів. Для остаточної імплементації рекомендованих критеріїв доцільно виконати валідаційні випробування для кожної конкретної рецептури та умов нанесення, а також включити зазначені параметри до стандартної програми контролю якості.

Висновки до розділу 4

1. В дослідженні вперше застосовано математичне моделювання для розрахунку основних реологічних параметрів вогнезахисної фарби реактивного типу, які є відповідальними за ключові життєві цикли засобу: виробництво, зберігання, нанесення. Отримані кореляційні залежності показників реології від швидкості зсуву за рівнянням Кассона дозволили рекомендувати виробникам засобів вогнезахисту простий та ефективний контроль в'язкості фарби, який забезпечує виробництво технологічного

продукту, що може наноситися на металеві поверхні мокрим шаром від 1 до 2,0 мм.

2. Експериментальним шляхом та розрахунками за рівнянням Кассона визначено, що індивідуальне використання в базовій рецептурі інтумесцентних композицій наноглин, HEUR для різних інтервалів зсуву чи HASE модифікаторів (у кількості 1 мас.%) дає можливість нанесення не більше 1 мм мокрого шару за один прохід.

3. Встановлено, що загущувачі групи етерів целюлози забезпечують тривале та стабільне зберігання фарби без седиментації за умови відсутності біоуражень. При цьому такий спосіб загущення забезпечує нанесення мокрого шару фарби не більше 0,5 мм. Визначено також, що двійні (HEMC+наноглина) та трійні (HEMC+наноглина+HEUR (HASE)) системи загущувачів у кількості 1 мас.% створюють умови для тривалого зберігання фарби та дають можливість нанесення мокрого шару за один прохід до 1 мм.

4. Доведено, що найбільш вдалою комбінацією модифікаторів реології інтумесцентних композицій є суміші загущувачів (HEMC+наноглина+R255) та (HEMC+наноглина+R255+R278) у кількості 2 %. Методом натурального нанесення встановлено, що ці фарби можливо наносити за один прохід з товщиною мокрого шару 1,5 мм та 2,0 мм відповідно.

5. Розроблена методика та теоретичні дослідження з питань модифікації реологічних властивостей полімерних композицій етерами целюлози, наноглинами та гідрофобно модифікованими етоксильованими поліуретанами впроваджено в освітньо-науковий процес підготовки фахівців за спеціальністю 161 Хімічні технології та інженерія за освітньо-професійною програмою «Європейська космецевтика» на кафедрі промислової фармації КНУТД і використовуються при підготовці кваліфікаційних робіт магістрів.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях: [43, 46, 196, 198].

5 ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИРОБНИЦТВА ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОЛІМЕРНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

Основним завданням цього розділу роботи є розроблення та впровадження технологічної схеми виробництва полімерної вогнезахисної фарби реактивного типу для сталевих конструкцій. Ця фарба повинна відповідати ряду важливих характеристик, зокрема:

- Клас вогнестійкості не менше R150 для зведеної товщини металу $\sigma \geq 5$ мм.
- Прогнозований термін експлуатації не менше 15 років.
- Відсутність у складі галогенів, сполук бору та інших токсичних речовин.
- Товщина мокрого шару фарби при нанесенні за один прохід $> 1,5$ мм.

Розроблення та впровадження технології такого засобу вогнезахисту є вкрай актуальним у сучасних умовах. В Україні на момент проведення дослідження відсутні аналогічні матеріали вітчизняного виробництва, що створює суттєву необхідність в нових рішеннях для забезпечення протипожежної безпеки в будівництві. Особливо важливо зазначити, що будівельна галузь країни потребує захисні засоби з підвищеними вогнезахисними та експлуатаційними властивостями для виконання завдань відновлення зруйнованих об'єктів критичної інфраструктури та повоєнної відбудови.

5.1 Дослідження основних характеристик вогнезахисного покриття, що розробляється

За результатами досліджень, що викладені у розд. 3 та 4 була складена рецептура інтумесцентної фарби. За основу композиції, що розробляється, було обрано склад IFR-S, який містить такі компоненти: APP, MA, PE при співвідношенні 3,6:1:1,8 (за мас.), по 1 мас. ч. пігменту TiO_2 та полімеру EZ3112. Для удосконалення реології фарби IFR-S застосовували комбінацію загущувачів етер целюлози/наноглина/HEUR модифікатори для середнього та високого зсуву. У фарбу додавали також суміш двох типів мінеральних армуючих волокон Larinus CF50 та Larinus MS605, антипірен, диспергатор та

піногасник. Тут і далі рецептура розробленого інтумесцентного засобу подається в обсязі, достатньому для розуміння компонентного складу.

За методикою 2.2.1 (розд. 2) була приготована інтумесцентна композиція IFR-S та визначені її фізико-хімічні характеристики відповідно до вимог національних стандартів. Отримані результати наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Фізико-хімічні характеристики засобу вогнезахисту реактивного типу IFR-S

№	Характеристика	Значення	Методика визначення
1	Вміст нелетких речовин у фарбі, не менше, %	72	ДСТУ ISO 3251:2015
2	Ступінь перетиру фарби, не більше, мкм	70	ДСТУ ISO 1524:2015
3	Адгезія покриття, не більше, бал	1	ДСТУ ISO 2409:2019
4	Динамічна в'язкість за Брукфілдом, (20 °C, №7, 30 rpm), не менше, Па·с	50	ДСТУ ISO 1652:2019 ISO 3219-1:2021
5	Об'ємний коефіцієнт спучення, не менше, см ³ /г	20	ДСТУ 9291:2024
6	Стійкість до дії вогню, товщина покриття 3 мм, не менше, хв	60	ДСТУ EN 16623:2015
7	Ідентифікація матеріалу	ІЧ спектр	EAD 350402-00-1106

На рис. 5.1 представлено ІЧ-спектр зразку реактивного покриття IFR-S, який є ідентифікатором продукції та доказом наявності у складі необхідних компонентів інтумесцентної системи.

Вогнезахисну ефективність покриття IFR-S визначали шляхом випробування металевих пластин з покриттям у міні-печі в умовах стандартної пожежі. Згідно з ДСТУ EN 16623:2015 – це бюджетний та простий спосіб отримати перші чи порівняльні характеристики з вогнестійкості покриття.

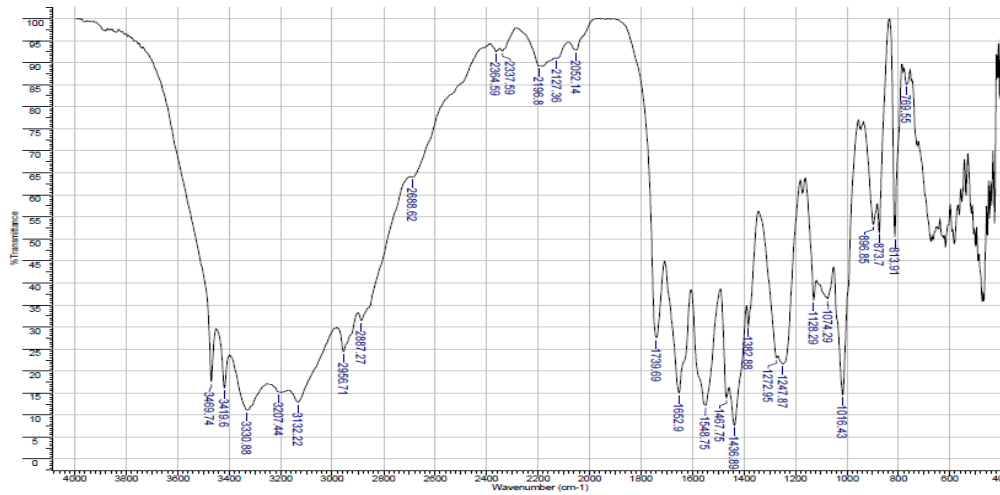


Рисунок 5.1 – ІЧ-спектр вогнезахисного покриття IFR-S

Результати, які отримуються при проведенні вогневих випробувань у міні-печі, демонструють задовільну кореляцію з результатами, отриманими при повномасштабних випробуваннях. На рис. 5.2 представлена залежність температури металевих пластин з вогнезахисними покриттями від температури в міні-печі під час випробувань. Одночасно було випробувано покриття Hensotherm 490 KS (Rudolf Hensel GmbH, Німеччина), яке згідно із сертифікатом відповідності забезпечує клас вогнестійкості сталевих конструкцій ($\sigma=5$ мм) R150 при товщині покриття 7,8 мм.

За результатами випробувань у міні-печі (рис. 5.2) покриття IFR-S та Hensotherm 490 KS товщиною $(3,05 \pm 0,19)$ мм демонструють ідентичну поведінку в умовах стандартної пожежі та однакову вогнезахисну ефективність: час досягнення металевою пластиною критичної температури 500 °C складає для IFR-S 61 хв, а для Hensotherm 490 KS – 59 хв; обидва покриття мають після випробувань міцний та щільний коксовий шар з високим коефіцієнтом спучення та хорошими фізико-механічними властивостями. Цей факт підтверджує, що розроблене покриття IFR-S може забезпечити клас вогнестійкості R150 для колон зі зведеною товщиною металу 5 мм.

Методика дослідження засобів пасивного вогнезахисту з метою прогнозування вогнезахисної ефективності інтумесцентного покриття в умовах наукової лабораторії відтворена в Інституті фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України (Акт впровадження додається).

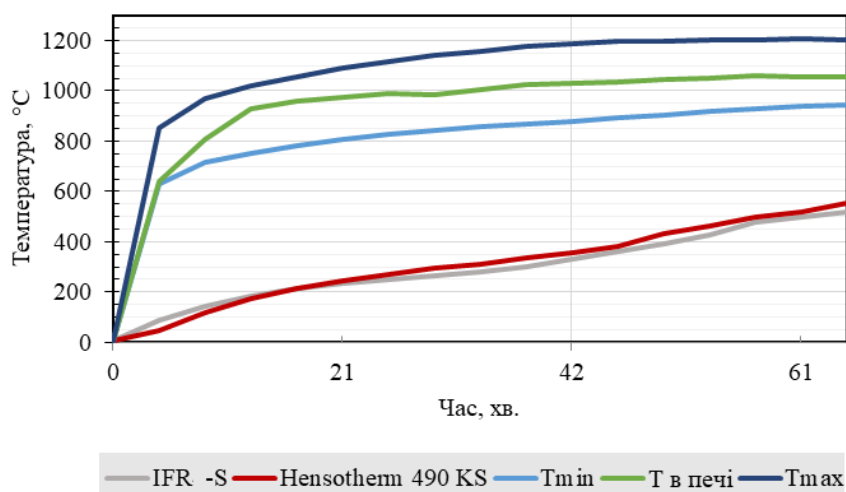


Рисунок 5.2 – Залежність температури зразка від температури полум'я та зовнішній вигляд коксових шарів після випробувань для покриттів IFR-S та Hensotherm 490 KS

Вогнезахисна фарба IFR-S представляє собою водно-дисперсійний склад, що містить вінілацетатні зв'язуючі, мінеральні наповнювачі, пігменти та домішки. Дане покриття класифікується як екологічно безпечне, бо не містить боратів, пластифікаторів, галогенів, формальдегідів та етоксилатів алкілфенолу, а також інших небезпечних речовин, що перевищують граничні значення, встановлені відповідно до стандартів та директив REACH. Згідно з оцінкою за Регламентом (ЄС) № 1272/2008/ЄС вогнезахисний засіб IFR-S та покриття на його основі не класифікуються як небезпечні продукти.

5.2 Технологічна схема виробництва

Технологічна схема виробництва водної вогнезахисної фарби IFR-S включає в себе кілька основних етапів, кожен з яких передбачає виконання

певних операцій та контроль за їх проведенням. Нижче наведено детальну схему (рис. 5.3) з описом етапів і рекомендованим контролем.

1. Підготовка сировини.

Операції: Перевірка якості сировини (полімер, наповнювачі, добавки).

Вимірювання та зважування необхідних кількостей сировини.

Контроль: Відповідність сировини специфікаціям (ТУ). Визначення маси, об'єму, зовнішнього вигляду сировинних матеріалів.

2. Змішування у дисольвері етеру целюлози і наноглини у воді.

Операції: Повільне додавання етеру целюлози та наноглини у воду.

Інтенсивне перемішування до отримання однорідної маси.

Контроль: Отримання прозорого лаку без осадів.

3. Додавання у дисольвер з лаком диспергатора, піногасника та твердих компонентів (APP, PE, MA, TiO₂).

Операції: Поетапне введення диспергатора, піногасника та твердих компонентів в отриманий лак. Перемішування до повного розподілу та перетиру компонентів.

Контроль: Ступінь перетиру не більше 50 мкм. Температура суміші не вище 50 °С.

4. Додавання водної вінілацетатної дисперсії.

Операції: Введення вінілацетатної дисперсії у дисольвер. Перемішування для досягнення однорідності.

Контроль: Температура суміші не вище 50 °С. Швидкість обертів фрези не більше 500 об/хв.

5. Додавання мінерального волокна у дисольвер та його диспергування

Операції: Повільне введення мінерального волокна у суміш. Диспергування до отримання однорідної маси.

Контроль: Відсутність грубих включень. Температура суміші не вище 50 °С. Швидкість обертів фрези не більше 500 об/хв.

6. Додавання загущувачів, консерванту у дисольвер та їх диспергування

Операції: Повільне введення загущувача та консерванту. Перемішування для досягнення однорідності.

Контроль: Температура суміші не вище 50 °С. Швидкість обертів фрези не більше 500 об/хв.

7. Приймально-здавальні випробування отриманої фарби та перевірка відповідності характеристикам табл. 5.1.

Операції: Проведення фізико-хімічних випробувань готової фарби.

Перевірка ступеню перетиру, в'язкості, коефіцієнта спучення, вмісту нелетких речовин.

Контроль: Відповідність характеристикам табл. 5.1.

8. Фільтрація готового продукту.

Операції: Фільтрація отриманої фарби на фільтраційній станції для видалення крупних частинок та включень.

Контроль: Перевірка на відсутність твердих включень у кінцевому продукті.

9. Фасування готового продукту у ємності, маркування і пакування для зберігання та транспортування

Операції: Перенесення готової фарби у відповідні ємності. Маркування та пакування продукту.

Контроль: Маса фарби в одиниці пакування. Відповідність упаковки стандартам зберігання та транспортування.

Запропонована технологічна схема виробництва водної вогнезахисної фарби передбачає чітке дотримання всіх етапів та контролю на кожному з них, що забезпечить високу якість кінцевого продукту.

Основні сировинні компоненти, їх характеристики, рекомендовані виробники представлені у розд. 2.

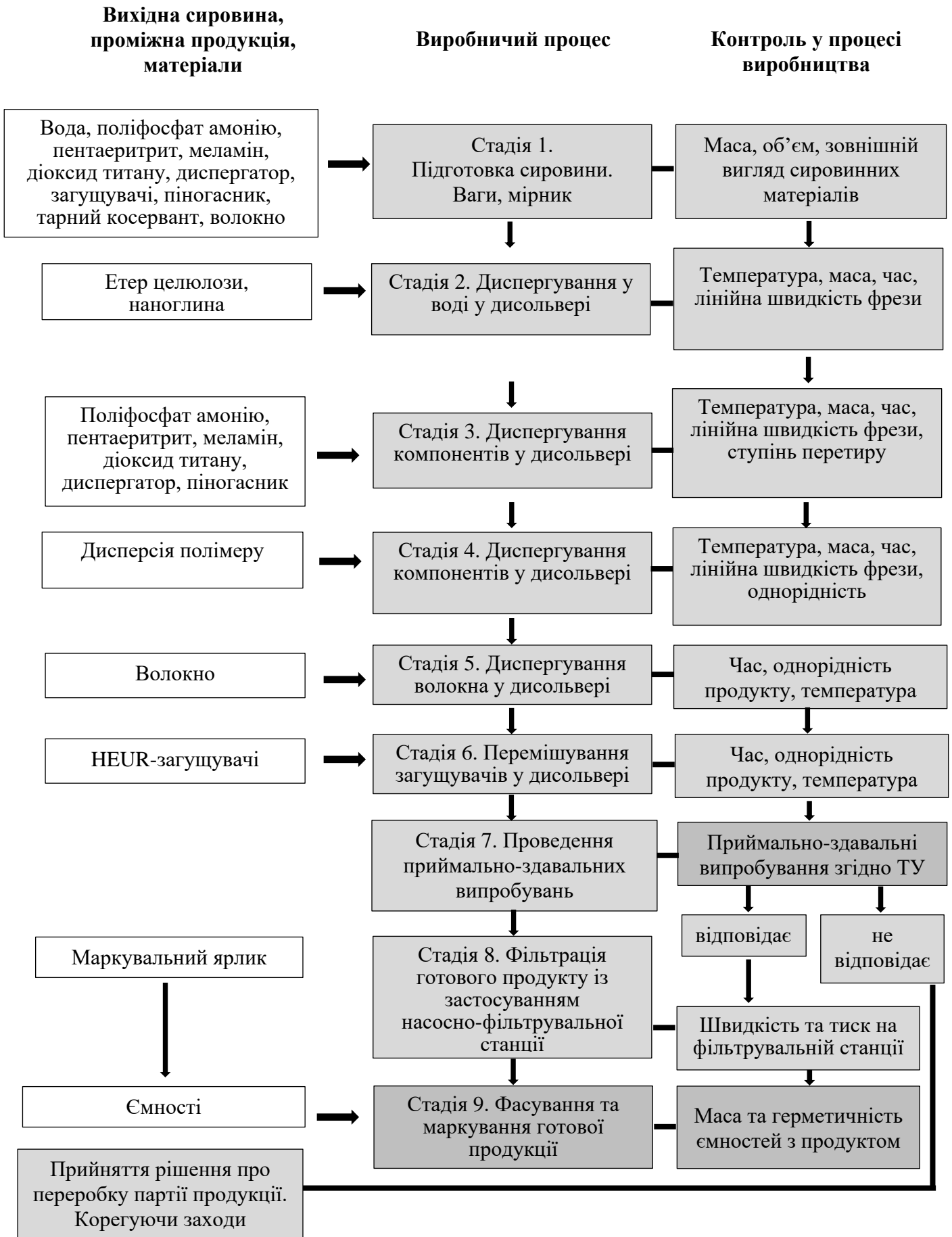


Рисунок 5.3 – Технологічна схема виробництва фарби IFR-S

Технологічна лінія для виробництва вогнезахисної фарби IFR-S складається з такого обладнання: ваги, дисольвер, фільтраційна станція, лінія для фасування, пристрій для пакетування.

Виробничий процес оптимізований для мінімізації відходів, з очищенням агрегатів на місці шляхом використання води, що повертається у цикл, що сприяє зниженню витрат на очищення та утилізацію. Система виготовлення вогнезахисної фарби включає детальне вивчення характеристик сировини, що забезпечує високу якість та ефективність готового продукту, та має ознаки сталого виробництва.

Технологічну схему виробництва фарби IFR-S було масштабовано та впроваджено у ТОВ «Ковлар Груп», м. Київ. На обладнанні підприємства виготовлено промислово-дослідну партію продукту в кількості 500 кг. Акт впровадження наведено у Додатку Б.

5.3. Визначення вогнезахисних та експлуатаційних характеристик полімерного інтумесцентного покриття IFR-S

5.3.1 Випробування вогнезахисної ефективності

Визначення межі вогнестійкості сталевих колон оброблених інтумесцентним покриттям IFR-S, було проведено згідно з положеннями ДСТУ EN 1363-1:2023 за стандартним температурним режимом згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Вогневі випробування здійснювали у масштабованій печі з використанням сталеві колони двотаврового перерізу довжиною 1 м (зі зведеною товщиною металу $\delta = 5,1$ мм), на яку нанесений вогнезахисний засіб IFR-S товщиною $7,75 \pm 0,56$ мм (рис. 5.4). Паралельно в тих же умовах було проведено випробування покриття Hensotherm 490 KS, яке сертифіковано в Україні для вогнезахисту сталевих конструкцій. Деякі дані сертифікату відповідності засобу Hensotherm 490 KS наведено у табл. 5.2.

Протокол випробувань, де детально розглянуті умови та результати випробувань покриття реактивного типу IFR-S, наведено у Додатку В.



Рисунок 5.4 – Візуалізація випробувань сталевих колон, на які нанесені вогнезахисні засоби IFR-S та Hensotherm 490 KS

За даними протоколу випробувань покриття IFR-S, нанесене з товщиною $7,75 \pm 0,56$ мм, забезпечує межу вогнестійкості у 156 хв сталевій колоні зі зведеною товщиною металу $\delta = 5,1$ мм. Водночас межа вогнестійкості сталевій колоні, обробленої покриттям Hensotherm 490 KS з товщиною $7,84 \pm 0,68$ мм складає 159 хв.

Таблиця 5.2 – Значення товщини покриття Hensotherm 490 KS (мм) для забезпечення класу вогнестійкості R (хв)

Клас вогнестійкості R	Зведена товщина металу, мм					
	3,03	4,00	5,00	6,06	8,00	10,00
120	7,99	6,69	5,58	4,68	5,59	2,91
150	12,08	9,44	7,68	6,70	5,20	4,26
180	14,56	11,41	9,85	8,83	6,92	5,73

Отримані результати свідчать, перш за все, про коректність застосованого методу випробування. А також дозволяють стверджувати, що покриття IFR-S демонструє вогнезахисні показники, аналогічні покриттю Hensotherm 490 KS. Тому є всі підстави вважати, що розроблений засіб IFR-S може бути застосований для вогнезахисту сталевих колон із забезпеченням класу вогнестійкості R150 та вище. Після здійснення сертифікаційних процедур згідно з національним законодавством полімерне вогнезахисне покриття реактивного типу IFR-S може застосовуватись в будівельній галузі для сталевих конструкцій.

5.3.2 Нанесення вогнезахисної фарби IFR-S на сталеві конструкції

На рис. 5.5 наведена залежність в'язкості фарби IFR-S від швидкості обертів шпинделю, що була вироблена за технологічною схемою, наведеною на рис. 5.3. Вимірювання проводили на приладі Брукфілда при температурі 20 °C із застосуванням шпинделю №7.

Співставлення отриманих значень в'язкості розробленої фарби з реперними значеннями табл. 4.27 дозволяє зробити такі висновки. В'язкість η при 30 об/хв дорівнює 92 Па·с, а при 50 об/хв – 66 Па·с. Ці значення близькі до рекомендованих значень в'язкості табл. 4.27 (при 30 об/хв – (70–90) Па·с, при 50 об/хв – (60–70) Па·с), які прогнозовано дають змогу нанесення фарби товщиною 2 мм.

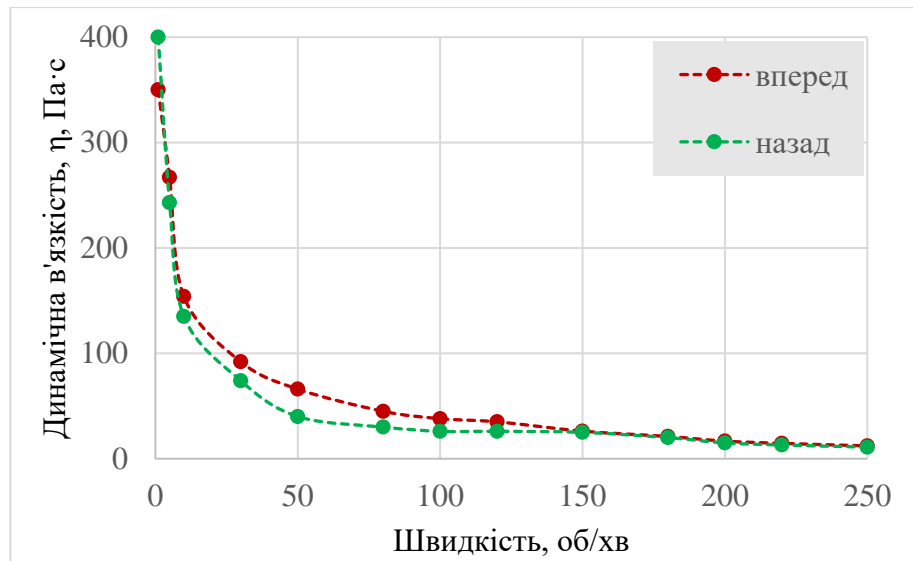


Рисунок 5.5 – Реологічний профіль фарби IFR-S

Розрахунок результатів рис. 5.5 за рівнянням Кассона (рівн. 2.1, розд. 2) визначає основні реологічні параметри фарби IFR-S межу текучості ($\tau_0=324$ Па), в'язкість при високих швидкостях зсуву $\eta_\infty=4,04$ Па·с. За даними реологічного профілю визначається в'язкість системи у стані спокою $\eta_0=308$ Па·с (при швидкості обертів шпинделю 3 об/хв). Отримані реологічні параметри розробленої фарби при порівнянні з рекомендованими значеннями (табл. 4.3 – на основі розрахунку параметрів реології комерційних фарб; табл. 4.25 – на основі розрахунку параметрів реології власних рецептур) також підтверджують можливість нанесення фарби IFR-S товщиною мокрого шару 2 мм без провисань, стікань з отриманням бездефектного вогнезахисного покриття.

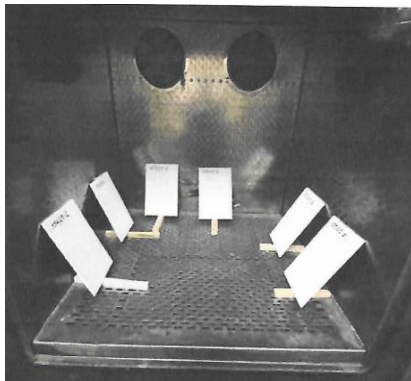
Цей висновок було підтверджено експериментом з натурального нанесення розробленої полімерної композиції в умовах вогнезахисної обробки металоконструкцій. За даними акту з нанесення (Додаток Г) середня максимальна товщина мокрого шару, яку можливо нанести за 1 прохід складає $2,14 \pm 0,18$ мм.

5.3.3 Термін експлуатації вогнезахисного покриття

Оцінка терміну експлуатації покриття IFR-S шляхом прискорених кліматичних випробувань для умов експлуатації вогнезахисних покриттів – Z2 була здійснена за ДСТУ EN 16623:2015. Тип Z2 – покриття, що призначені для використання всередині приміщень при вологості повітря нижче 85 %, за винятком тих, які призначені для експлуатації при температурі нижче 0 °С.

Випробування були проведені у два етапи: штучне старіння у кліматичній камері; випробування вогнезахисної ефективності покриття до та після впливу штучного старіння.

Результати цих досліджень представлені у Додатку Д, а візуалізація експерименту продемонстрована на рис. 5.6.



Зразки у кліматичній камері



Вигляд зразків до та після кліматичної камери



Стенд для вогневих випробувань



Вигляд зразку після вогневих випробувань

Рисунок 5.6 – Візуалізація експерименту з визначення терміну експлуатації вогнезахисного покриття

Після штучного старіння зразків вогнезахисного покриття IFR-S відповідно до ДСТУ EN 16623:2015 зразки мають якісний зовнішній вид, без дефектів та пошкоджень, колір покриття не змінився. За результатами вогневих випробувань (Додаток Д) встановлено, що час досягнення температури 500 С на зразках, які не піддавались та піддавались впливу зовнішніх чинників типу Z2 становить:

- до впливу зовнішніх чинників: зразок №1 – 34 хв, зразок №2 – 35 хв;
- -після впливу зовнішніх чинників: зразок №1 – 34 хв, зразок №2 – 36 хв.

Проведені дослідження з визначення терміну експлуатації класифікують вогнезахисне покриття IFR-S як стійке до впливу зовнішніх чинників типу Z2 відповідно до ДСТУ EN 16623:2015. При цьому строк експлуатації покриття IFR-S може становити від 10 до 25 років за умови його належного використання та відповідного догляду.

5.3.4 Практичні застосування результатів дослідження

Рулонний вогнезахисний матеріал. Система загущення IFR складу етер целюлози+наноглина+HEUR була використана у складі інтумесцентного покриття для рулонного матеріалу RM (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 – Зовнішній вигляд рулонного покриття RM

Цей матеріал відноситься до гнучких засобів мобільного вогнезахисту і складається з сітки зі скловолокна, на яку нанесене покриття реактивного типу, що містить APP/MA/PE, діоксид титану, співполімер EZ 3010 та реологічні й антипіренові домішки. Виробництво рулонного покриття полягає в нанесенні інтумесцентної фарби на сітку зі скловолокна методом безповітряного розпилення. Придання фарбі необхідної реології шляхом додавання системи загущувачів естер целюлози+наноглина+HEUR дозволяє наносити фарбу з мінімальними втратами, одним шаром, достатнім для подальшого застосування засобу вогнезахисту. Отримане таким чином рулонне покриття з товщиною сухого шару на скловолокні 1,2–1,3 мм може застосовуватися для сталевих, дерев'яних конструкцій та кабельної продукції. Результати попередніх вогневих випробувань рулонного матеріалу RM наведені у табл. 5.4. На рис. 5.8 продемонстровано вигляд зразків, які були застосовані у визначенні вогнезахисної ефективності рулонного покриття.

Таблиця 5.4 – Вогнезахисна ефективність рулонного матеріалу RM

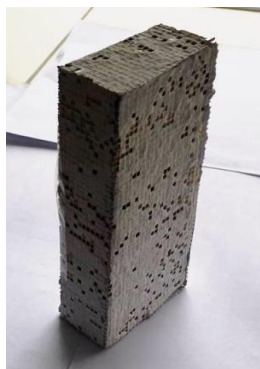
Конструкція	Метод випробування	Результат
Метал	ДСТУ EN 16623:2015 Міні піч	$R_1=32$ хв, співпадає з межею вогнестійкості IFR, що забезпечують $R>60$ хв при повномасштабних випробуваннях
Деревина	ГОСТ 16363-98 Керамічна труба	Середня втрата маси – 3,57 %. Максимальна температура димових газів 190 °C
Кабель	ДСТУ EN 60332-3-21:2013	Максимальна довжина обвугленої частини зразка складає 67 см

За результатами вогневих випробувань встановлено, що розроблений рулонний засіб вогнезахисту є універсальним: може застосовуватися для підвищення вогнестійкості конструкцій із металу, забезпечує I групу вогнезахисної ефективності деревини, витримує тест на поширювання

полум'я по поверхні кабелю та може застосовуватися для кабельних комунікацій.



Зразок металевої пластини до та після випробувань



Зразок деревини до та після випробувань



Зразок кабелю до та після випробувань

Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд зразків з рулонним покриттям RM до та після вогневих випробувань

Рулонний матеріал є готовим до споживання виробом, який може швидко та мобільно забезпечити вогнезахист металевих, дерев'яних

конструкцій та кабельних комунікацій, що особливо актуально для України в умовах війни. Серед широкого асортименту засобів пасивного вогнезахисту гнучкі матеріали є найбільш вдалим варіантом для вирішення проблеми швидкого та технологічно простого забезпечення протипожежної безпеки об'єктів оборонного призначення, облаштування окопів та тимчасового розташування військових, місць зберігання вибухової зброї та пожежонебезпечних паливо-мастильних матеріалів. Крім того, рулонне вогнезахисне покриття може застосовуватися для підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій та комунікацій у разі оперативного відновлення зруйнованих об'єктів інфраструктури, електроенергетики, газо- та нафтопереробних підприємств.

Реологічно удосконалена деконтамінаційна універсальна система. В рамках виконання НДР «Розроблення засобів хімічної та пожежної безпеки об'єктів оборонного призначення», спрямованої на вирішення проблем деконтамінації шкірно-наривних та нервово-паралітичних отруйних речовин, була запропонована система загущення мікроемульсії типу «олія у воді». Ця система, що складається з синтетичної наноглини Laponite EP та полівінілпіролідонового полімеру, є одночасно модифікатором реології та каталізатором, який майже на порядок підвищує швидкість розкладення токсичних речовин. Спостерігається підвищення в'язкості деконтамінаційної системи, де присутня тільки наноглина, в середньому у 3-4 рази. Наявність у системі с Laponite EP полівінілпіролідонового полімеру збільшує ефект загущення майже у 5 разів.

Крім того, встановлено, що наноглина Laponite EP утворює з полімером стійкі гідрогелеві наноккомпозити, які застосовуються як ефективний сорбент для очищення води чи поверхонь, забруднених шкідливими речовинами. Докладно результати цих досліджень описані у роботах [215, 216].

Матеріали дисертаційного дослідження впроваджено в освітньо-наукову програму «Європейська космецевтика» на кафедрі промислової фармації КНУТД (Додаток Ж).

Висновки до розділу 5.

1. Розроблена та впроваджена у виробництво технологічна схема виготовлення інтумесцентного покриття з підвищеними вогнезахисними, удосконаленими реологічними та експлуатаційними властивостями для забезпечення класу вогнестійкості сталевих конструкцій R150. Відповідно до національних стандартів визначено необхідні фізико-хімічні та ідентифікаційні характеристики розробленого інтумесцентного покриття.

2. Проведено вогневі випробування розробленого засобу вогнезахисту згідно з положеннями ДСТУ EN 1363-1:2023 за стандартним температурним режимом згідно з ДСТУ Б В.1.1-4-98*. Визначено, що покриття забезпечує клас вогнестійкості сталевих конструкцій R 150 для зведеної товщини металу $\sigma \geq 5,1$ мм, що підтверджує його конкурентоспроможність на вогнезахисному ринку України.

3. Натурними експериментами доведено, що реологічні властивості розробленої фарби забезпечують її нанесення товщиною мокрого шару не менше 2 мм з формуванням бездефектного покриття.

4. Оцінка терміну експлуатації розробленого вогнезахисного покриття за ДСТУ EN 16623:2015 доводить його строк експлуатації від 10 до 25 років в умовах Z2.

5. Розроблена комбінована система модифікації реології інтумесцентних фарб була застосована у рецептурі рулонного матеріалу. Цей матеріал є засобом універсального мобільного вогнезахисту та відкриває нові перспективи для швидкого і ефективного забезпечення вогнестійкості будівельних конструкцій, що є особливо актуальним в умовах війни в Україні.

Результати експериментальних досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях: [42, 46, 204, 205, 215–222].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі науково обґрунтовано та розроблено технологію полімерного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними показниками, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій не менше 150 хв, нанесення товщини мокрого шару фарби не менше 2 мм та має прогнозований термін експлуатації до 25 років. Це досягається отриманням наукових результатів, що представлені нижче.

1. Розроблено та реалізовано алгоритм лабораторних методів для прогнозування вогнезахисної ефективності покриттів реактивного типу на етапі розробки рецептур, що суттєво зменшує витрати на повномасштабні випробування та прискорює процес впровадження нових продуктів у виробництво.

2. Удосконалено склад вогнезахисних інтумесцентних композицій (поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит) шляхом експериментально обґрунтованого вибору полімерної матриці. Встановлено, що негалогеновані водно-дисперсійні співполімери вінілацетатного типу здатні забезпечувати межу вогнестійкості сталевих конструкцій більше 60 хв. Для органорозчинних стирол-акрилатних композицій ефективною є комбінація ньютонівських і неньютонівських полімерів, що забезпечує вогнестійкість до 60 хв.

3. Визначено, що для досягнення межі вогнестійкості сталевих конструкцій на рівні R150 співвідношення компонентів інтумесцентної тріади поліфосфат амонію:меламін:пентаеритрит: повинно бути у межах 36:10:18 мас. % у складі засобу вогнезахисту.

4. Встановлено, що модифікація інтумесцентного покриття сумішшю мінеральних волокон з різними температурами розкладання підвищує вогнезахисну ефективність покриття на 10-20 %. Вперше доведено, що додавання суміші Larinus CF50 та Larinus MS605 у водно-дисперсійну фарбу реактивного типу дозволяє застосовувати інтумесцентне покриття для сталевих конструкцій в умовах вуглеводневої пожежі.

5. Вперше застосовано математичну модель Кассона для визначення граничних параметрів реології інтумесцентних фарб, що дозволяє здійснювати оперативний виробничий контроль якості продукції. Вперше

встановлено кореляційну залежність між основними реологічними параметрами фарби (в'язкість у стані спокою, η_0 ; межа текучості, τ_0 ; в'язкість за високих швидкостей зсуву, η_∞) та технологічно допустимою товщиною мокрого шару, яка забезпечує бездефектне формування вогнезахисного покриття за один прохід

6. Вперше розроблено комбіновану систему модифікації реології вогнезахисної фарби (етери целюлози, наноглина, гідрофобно модифіковані етоксильовані уретани), яка забезпечує формування стабільної тиксотропної структури та можливість нанесення шару товщиною не менше 2 мм за один прохід, що дозволяє суттєво скоротити витрати на вогнезахисну обробку.

Експериментально доведено, що для отримання бездефектного мокрого шару фарби товщиною біля 2 мм необхідні такі орієнтовні значення реологічних параметрів: $\eta_0 \sim 200 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\tau_0 \geq 300 \text{ Па}$; $\eta_\infty \geq 3 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

7. Розроблено технологічну схему виробництва інтумесцентного покриття реактивного типу з удосконаленими реологічними властивостями, що забезпечує межу вогнестійкості сталевих конструкцій більше 150 хв. Технологія виготовлення вогнезахисного покриття була масштабована та впроваджена у виробництво на підприємстві ТОВ «Ковлар Груп» (м. Київ), де виготовлено дослідну партію продукту.

8. Проведено вогневі випробування розробленого засобу вогнезахисту за ДСТУ EN 1363-1:2023, які підтвердили що розроблене покриття забезпечує клас вогнестійкості R 150 для сталевих двотаврових колон зведеної товщини металу $\sigma \geq 5,1 \text{ мм}$ при чотирьохсторонньому обігріві. За результатами прискорених кліматичних випробувань за ДСТУ EN 16623:2015 визначено, що покриття характеризуються пролонгованим терміном експлуатації до 25 років. За визначеними показниками вогнестійкості та терміну експлуатації розроблений продукт є конкурентоспроможним на національному вогнезахисному ринку та більш економічно виправданим, ніж аналогічні матеріали, що застосовуються в Україні

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC Text with EEA relevance. *OJEU*. 2011. 39 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0144> (дата звернення 15.12.2025)
2. Nguyen, M. H., Ouldboukhite, S.-E., Durif, S., Saulnier, V., & Bouchair, A. (2023). Passive fire protection of steel profiles using wood. *Engineering Structures*, 275, Part A, 115274. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115274>
3. Dauda, J.A., Yamusa, M.A., Oyegoke, A.S., Ajayi S.O., & Saka A.B. (2025). A Systematic review of building fire safety practices in the UK: approaches, challenges and recommendations. *Fire Technology*, P. 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01801-2>
4. Wang, K., & Le, H. (2023). The Development of cement-based, intumescent and geopolymer fire-retardation coatings for metal structures: a review. *Coatings*, 13(3), 495. <https://doi.org/10.3390/coatings13030495>
5. Britez, C.A., Silva, V.P., Carvalho, M., & Helene, P. (2019). Performance of fire protective coatings in reinforced concrete elements submitted to high temperatures. *Revista ALCONPAT.*, 10 (1), 79-96. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i1.430>
6. Liblik, J., Küppers, J., Maaten, B., & Just, A. (2020). Fire protection provided by clay and lime plasters. *Wood Material Science and Engineering*, 16(5), 1–9, <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.171472>
7. Shiu, B.C., Huang, C.H., Yang, H.L., Chen, Y.S., Lou, C.W., & Lin, J.H. (2023). Construction sheets made of high-performance flame-retardant nonwoven

fabrics and combustion-resistant polyurethane foam: preparation process and property evaluations. *Polymers*, 15(4), 953. <https://doi.org/10.3390/polym15040953>

8. Nazrun, T., Hassan, M. K., Hasnat, M. R., Hossain, M. D., Ahmed, B., & Saha, S. (2025). A Comprehensive review on intumescent coatings: formulation, manufacturing methods, research development, and issues. *Fire*, 8(4), 155. <https://doi.org/10.3390/fire8040155>

9. Li, Y., Cao, C.-F., Chen, Z.-Y., Liu, S.-C., Bae, J., & Tang, L.-C. (2024). Waterborne intumescent fire-retardant polymer composite coatings: a review. *Polymers*, 16(16), 2353. <https://doi.org/10.3390/polym16162353>

10. Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P. S. M. M., Ullah, S., & Jimenez, M. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surface Engineering*, 36 (2), 1-30. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1636536>

11. Hafiz, T., Covello, J., Wnek, G.E., Melaiye, A., Wei, Y., & Ji, J. (2025). Intumescent coatings and their applications in the oil and gas industry: formulations and use of numerical models. *Polymers*, 17, 1923. <https://doi.org/10.3390/polym17141923>

12. de Silva, D., Nuzzo I., Nigro, E., & Occhiuzzi, A. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*, 12(5), 696. <https://doi.org/10.3390/coatings12050696>

13. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105712>

14. Passive Fire Protection Market (2025 - 2033) Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Cementitious Materials, Intumescent Coating, Fireproofing Cladding), By Application (Oil & Gas, Construction, Industrial Plants), By Region, And Segment Forecasts. 2024. 100 p. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/passive-fire-protection-market/toc> (дата звернення: 10.10.2025)

15. Beh, J.H., Yew, M. C., Saw, L. H. Yew, M. K. (2020). Fire resistance and mechanical properties of intumescent coating using novel bioash for steel. *Coatings*, 10, 1117. <https://doi.org/10.3390/coatings1011117>
16. Gay-Lussac, J. L. (1821) Note on properties of salt for making incombustible. *Annales de chimie et de physique*, 2(18), 211-217.
17. Pat. US 2106938. Fireproofing of wood / Tramm H. (DE), Clar C. (DE), Kuhnel P. (DE) et al., patent holder Ruhrchemie Aktiengesellschaft (DE). – No. 27744; 21.05.1935; publ. 21.02.1938.
18. Vandersall, H. L. (1971). Intumescent coating systems, their development and chemistry. *Journal of Fire and Flammability*, 2, 97-140.
19. Camino, G., Costa, L., & Martinasso, G. (1989). Intumescent fire-retardant systems. *Polymer Degradation and Stability*, 23, 359-376. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(89\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0141-3910(89)90058-X)
20. Bourbigot, S., Sarazin, J, Samyn, F., & Jimenez, M. (2019). Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Polymer Degradation and Stability*, 161, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.029>
21. Jimenez, M., & Duquesne, S. (1984). Study of mechanism of intumescence in fire retardant polymers. Part I: Thermal degradation of ammonium polyphosphate–pentaerythritol mixtures. *Polymer Degradation and Stability*, 6, 243-252. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(84\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0141-3910(84)90004-1)
22. Vakhitova, L.N. (2019). Fire retardant nanocoating for wood protection. In: *Nanotechnology in Eco-efficient Construction*, 361-391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102641-0.00016-5>
23. Olivera, R. B. R. S., Moreno, A. L. J., & Vieira, L. C. M. (2017). Intumescent paint as fire protection coating. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 10 (1), 220-231. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000100010>

24. Tang, G., Shang, C., Qin, Y., & Lai, J. (2025). Current advances in flame-retardant performance of tunnel intumescent fireproof coatings: a review. *Coatings*, 15, 99. <https://doi.org/10.3390/coatings15010099>
25. Pan, D., Jia, D., Yuan, Y., Pan, Y., Wang, W., & Xu, L. (2025). Flame-retardant polyurea coatings: mechanisms, strategies, and multifunctional enhancements. *Fire*, 8, 334. <https://doi.org/10.3390/fire8080334>
26. Patel, R., Chaudhary, M.L., Patel, Y.N., Chaudhari, K., & Gupta, R.K. (2025). Fire-resistant coatings: advances in flame-retardant technologies, sustainable approaches, and industrial implementation. *Polymers*, 17, 1814. <https://doi.org/10.3390/polym17131814>
27. Wang, H., Qiu, Q., Li, B., Hu, Y., Xu, L., & Qiu, J. (2025). Alginate-based flame-retardant coatings for sustainable fire protection: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 308, 3, 142448. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142448>
28. Lee, Y. X., Wang, W., Lei, Y. Xu, L., Agarwal, V., Wang, C., & Yeoh G. H. (2024). Flame-retardant coatings for wooden structures. *Progress in Organic Coatings*, 198, 108903. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108903>
29. Džolev, I., Kekez-Baran, S., & Rašeta, A. (2025). Fire resistance of steel beams with intumescent coating exposed to fire using ANSYS and machine learning. *Buildings*, 15, 2334. <https://doi.org/10.3390/buildings15132334>
30. Liu, S., Wang, C., Hu, Q., Huo, S., Zhang, Q., & Liu Z. (2020). Intumescent fire retardant coating with recycled powder from industrial effluent optimized using response surface methodology, *Progress in Organic Coatings*, 140, 105494, <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105494>
31. Yu, H., Xu, X., Xia, Y., Pan, M., Zarshad, N., Pang, B., Rahman, A. U., Wu, M., & Ni, H. Synthesis of a novel modified chitosan as an intumescent flame retardant for epoxy resin. *Polymers*. 2020. 20(1), 303-316. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0036>

32. Khanal, S. (2022). Effects of intumescent flame retardant based on THEIC-based oligomeric ester as char forming agent on thermal, mechanical and flame retardant properties of HDPE composites. *Journal of Nepal Chemical Society*, 43(1), 105-113. <https://doi.org/10.3126/jncs.v43i1.46952>
33. Song, W., Wu, M., He, Y., Wu, Y., & Qu, W. (2021). The evolution of intumescent char in flame-retardant coatings based on amino resin. *Coatings*, 11, 709. <https://doi.org/10.3390/coatings11060709>
34. Sui, Y., Dai, X., Li, P., & Zhang, C. (2021). Superior radical scavenging and catalytic carbonization capacities of bioderived assembly modified ammonium polyphosphate as a mono-component intumescent flame retardant for epoxy resin. *European Polymer Journal*, 156, 110601. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110601>
35. Davesne, A.-L., Jimenez, M., Samyn, F., & Bourbigot, S. (2021). Thin coatings for fire protection: An overview of the existing strategies, with an emphasis on layer-by-layer surface treatments and promising new solutions. *Progress in Organic Coatings*, 154, 106217. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106217>
36. Kausar, A., Ahmad, I., Maaza, M., & Eisa, M.H. (2022). State-of-the-art nanoclay reinforcement in green polymeric nanocomposite: from design to new opportunities. *Minerals*, 12, 1495. <https://doi.org/10.3390/min12121495>
37. Morsy, A., Kandil, S., Ewais, H.A., Abdel-Salam, A. H., & Mohamed, A. (2025). Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: A review bio-based, and industry implications. *Chemosphere*, 377, 144360. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144360>
38. Li, L., Huang, Y., Tang, W., Zhang, Y., & Qian, L. (2022). Synergistic effect between piperazine pyrophosphate and melamine polyphosphate in flame retardant coatings for structural steel. *Polymers*, 14, 3722. <https://doi.org/10.3390/polym14183722>

39. Anees, S. M., & Dasari, A. (2020). Acrylic-based fire-retardant coatings for steel protection: Employing the concept of in situ ceramization. *Journal Applied Polymer Science*, 50299. <https://doi.org/doi:10.1002/app.50299>
40. Lainioti, G. C., Koukoumtzis, V., Andrikopoulos, K. S., Tsantaridis, L., Östman, B., Voyiatzis, G. A., & Kallitsis, J. K. (2022). Environmentally friendly hybrid organic–inorganic halogen-free coatings for wood fire-retardant applications. *Polymes*, 14, 4959. <https://doi.org/10.3390/polym14224959>
41. Li, F.-F. (2023). Comprehensive review of recent research advances on flame-retardant coatings for building materials: chemical ingredients, micromorphology, and processing techniques. *Molecules*, 28, 1842. <https://doi.org/10.3390/molecules28041842>
42. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10 (14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>
43. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., Drizhd, V., Taran, N., & Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100544>
44. Häßler, D., Mund, M., Daus, L.-H., Hothan, S., Schaumann, P., & Schartel, B. (2024). Durability of intumescent coatings and recommendations for test concepts for a working life of more than 10 years. *Fire Safety Journal*, 146, 104173. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104173>
45. Piperopoulos, E., Scionti, G., Atria, M., Calabrese, L., Valenza, A., & Proverbio, E. (2025). Durability assessment of eco-friendly intumescent coatings based on cork and waste glass fillers for naval fire safety. *Polymers*, 17(12), 1659. <https://doi.org/10.3390/polym17121659>
46. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., & Vakhitova, L. (2020). Comparison of fire resistance of polymers in intumescent

coatings for steel structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (106)), 45-54. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209841>

47. Vakhitova, L., Drizhd, V., Kalafat, K., Vakhitov, R., Taran, N., & Bessarabov, V. (2025). Modeling the rheology of commercial reactive fire-retardant coating materials for steel. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 6-11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334121>

48. Sabet, M. (2024). Advancements in halogen-free polymers: Exploring flame retardancy, mechanical properties, sustainability, and applications. *Polymer Technology and Materials*, 63, 1794-1818. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2359633>

49. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Science*, 34 (2), 1-44. <https://doi.org/10.1177/0734904115626720>

50. Puri, R.G., & Khanna, A.S. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s11998-016-9815-3>

51. Kay, M., Price, A.F., & Lavery, I. (1979). Review of intumescent materials, with emphasis on melamine. formulations. *Journal of Fire Retardant Chemistry*, 6, 69-91.

52. Quintão, M., & Rodrigues, J. P. C. (2024). Behavior of intumescent paints protecting steel beams in case of natural fires. *Research Square*, preprint, 1-35. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5025881/v1>

53. Zeng, Y., Weinell, C.E., Dam-Johansen, K., Ring, L., & Kiil, S. (2020). Effects of coating ingredients on the thermal properties and morphological structures of hydrocarbon intumescent coating chars. *Progress in Organic Coatings*, 143, 105626. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105626>

54. Aqlibous, A., Tretsiakova-McNally, S., & Fateh, T. (2020). Waterborne intumescent coatings containing industrial and bio-fillers for fire protection of timber materials. *Polymers*, 12(4), 757. <https://doi.org/10.3390/polym12040757>

55. Dreyer, J. A. H., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., & Kiil, S. (2021). Review of heat exposure equipment and in-situ characterisation techniques for intumescent coatings. *Fire Safety Journal*, 121, 103264. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103264>

56. Калафат, К. В. (2021). *Розробка технології полімерного реологічного покриття для сталевих конструкцій з поліпшеними вогнезахисними характеристиками*. (Дисертація доктора філософії). Київський національний університет технологій та дизайну. Київ, 222 с.

57. Kalafat, K. V., Taran, N. A., Plavan, V. P., Redko, A. M., Efimova, I. V., & Vakhitova L. M. (2020). The effect of ammonium polyphosphate:melamine:pentaerythritol ratio on the efficiency of fire protection of reactive coatings. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 6, 59-68. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-59-68>

58. Zoleta, J. B., Itao, G. B., Resabal, V. J. T., Lubguban, A. A., Corpuz, R. D., Ito, M., Hiroyoshi, N., & Tabelin C. B. (2020). Improved pyrolysis behavior of ammonium polyphosphate-melamine-expandable (APP-MEL-EG) intumescent fire retardant coating system using ceria and dolomite as additives for I-beam steel application. *Heliyon*, 6(1), e03119. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03119>

59. Jimenez, M., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2006). Multiscale experimental approach for developing high-performance intumescent coatings. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45 (13), 4500-4508. <https://doi.org/10.1021/ie060040x>

60. Camino, G. (1998). Flame retardants: intumescent systems. In: Pritchard, G. (Eds) *Plastics Additives*. Polymer Science and Technology Series, v. 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_33.

61. Zybina, O., & Gravit, M. (2020). Basic Ingredients of Intumescent Compositions. In *Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials*, Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1-51.

62. Bourbigot, S., Sarazin, J., Bensabath, T., Solarski, F., & Jimenez, M. (2019). Intumescent polypropylene: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Fire Safety Journal*, 105, 261-269. <https://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.007>

63. Дріжд, В. Л. (2017). *Розроблення вогнезахисних полімерних покриттів з використанням наноглин для поліпшення експлуатаційних властивостей*. (Дисертація канд. тех. наук). Київський національний університет технологій та дизайну. Київ, 206 с.

64. Soares, I., Ferreira, J. L., Silva, H., & Rodrigues, M. P. (2024). Fire-retardant and fire-resistant coatings: From industry to the potential use on cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 68, 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.06.014>

65. Ng, Y. H., Dasari, A., Tan, K. H. & Qian, L. (2021). Intumescent fire-retardant acrylic coatings: effects of additive loading ratio and scale of testing. *Progress in Organic Coatings*, 150, 105985. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105985>

66. Nasir, K. M., Sulong, H. R., Johan, M. R., & Afifi, A. M. (2018). An investigation into waterborne intumescent coating with different fillers for steel application. *Pigment Resin Technology*, 47(2), 142-153. <https://doi.org/10.1108/PRT-09-2016-0089>

67. Bourbigot, S., Sarazin, J., Samyn, F., & Jimenez, M. (2019). Intumescent ethylene-vinyl acetate copolymer: Reaction to fire and mechanistic aspects. *Polymer Degradation and Stability*, 3, 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.01.029>

68. Zhang, J., Huang, Y., He, L., Wu, Y., Shang, F., & Ding, Y. (2025). Pyrolysis characteristics and reaction mechanism of thin intumescent fire-retardant coating for steel structures by thermogravimetry/fourier transform infrared spectrometry. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5, <https://doi.org/10.1007/s11665-025-11473-2>

69. Nasirzadeh, M., Yahyaei, H., & Mohseni, M. (2022). Effects of inorganic fillers on the performance of the water-based intumescent fire-retardant coating. *Fire and Materials*, 47, 51-61. <https://doi.org/10.1002/fam.3067>

70. Wang, Z., Gong, G., Gao, L., Cui, W., & Wang, Y. (2024). Preparation and performance of intumescent water-based coatings with both thermal insulation and flame retardant functions. *Chemical Engineering Journal*, 480, 148165. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148165>

71. Yew, M., Ramli Sulong, N., Yew, M., Amalina, M., & Johan, M. (2014). Investigation on solvent-borne intumescent flame-retardant coatings for steel. *Materials Research Innovations*, 18(S6), S6-384-S6-388. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.0000000001026>

72. Yew, M. C., Ooi, G. J., Yew, M. K., Saw, L. H., Beh, J. H., Ng, T. C., & Yeo, W. H. (2021). Effects of hybrid flame-retardant fillers on fire-resistive and mechanical properties of solvent-borne intumescent coatings. In: IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 1117(1), 012008. IOP Publishing: Bristol, UK. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1117/1/012008>

73. Unlu, M., Tayfun, U., Yildirim, B., & Dogan, M. (2016). Effect of boron compounds on fire protection properties of epoxy based intumescent coating. *Fire and Materials*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.1002/fam.2360>

74. Yasir, M., Amir, N., Ahmad, F., Ullah, S., & Jimenez, M. (2018). Effect of basalt fibers dispersion on steel fire protection performance of epoxy-based intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, 122, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.05.029>

75. Han, J., Liang, G., Gu, A., Ye, J., Zhang, Z., & Yuan, L. (2013). A novel inorganic-organic hybridized intumescent flame retardant and its super flame retarding cyanate ester resins. *Journal of Materials Chemistry A*, 1, 2169-2182. <https://doi.org/10.1039/C2TA00996J>

76. Qiu, S., Ma, C., Wang, X., Zhou, X., Feng, X., Yuen, R. K., & Hu, Y. (2018). Melamine-containing polyphosphazene wrapped ammonium

polyphosphate: A novel multifunctional organic-inorganic hybrid flame retardant. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 839-848. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.018>.

77. Arogundade, A. I., Megat-Yussof, P. S., & Afolabi, L. O. (2021). Evaluation of compression strength of intumescent char using ASTM 1162 00. *Journal of Coatings Technology and Research*, 18(5), 935-943. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00434-0>

78. Yazici, C., Özkal, F. M., Orhan N. S., & Cirpici, B. K. (2022). Reformative effects of intumescent coating on the structural characteristics of cold-formed steel. *ACS Omega*, 7(46), 42560-42569. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06017>

79. Jimenez, M., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2006). Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. *Surface and Coatings Technology*, 201, 979-987. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.01.026>

80. Zeng, Y., Weinell, E., Dam-Johansen, C., Ring, L., & Kiil, S. (2019). Exposure of hydrocarbon intumescent coatings to the UL1709 heating curve and furnace rheology: Effects of zinc borate on char properties. *Progress in Organic Coatings*. 135, 321-330. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.020>

81. Soong, L.S., Liu, M.Y.J., Poh, Y.S., Mo, K.H., Jumaat, M.Z., & Goh, Y. (2022). The potential of geopolymer in development of green coating materials: A review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 12289-12299. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06882-7>

82. Okyay, G., Naik, A.D., Samyn, F., Jimenez, M., & Bourbigot, S. (2019). Fractal conceptualization of intumescent fire barriers, toward simulations of virtual morphologies. *Scientific Reports*, 9(1), 1872. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38515-9>

83. Brameld, M., & Baensch, T. (2023). Development of a novel Passive Fire Protection system – Humidur Char. *APPEA Journal*, 63, 155-158. <https://doi.org/10.1071/AJ22081>.

84. Wang, F., Liu, H., & Yan, L. (2021). Comparative study of fire resistance and char formation of intumescent fire-retardant coatings reinforced with three types of shell bio-fillers. *Polymers*, 13, 4333. <https://doi.org/10.3390/polym13244333>

85. Takahashi, F. (2021) Fire blanket and intumescent coating materials for failure resistance. *MRS Bulletin*, 46, 429-434. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00102-7>

86. Zhu, Y., Zhang, F., Xing, L., Xie, W., & Cheng, Y. (2022). Construction and verification of a heat transfer model for intumescent coatings, *Progress in Organic Coatings*, 167, 106868. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106868>

87. Цапко, Ю., Ліхньовський, Р., Цапко А., Коваленко, В., Слуцька, О., Іллюченко, П., Кравченко, Р., та Суханевич, М. (2023). Визначення теплофізичних характеристик шару коксової піни у вогнезахисті кабельних виробів з піноутворюючим покриттям. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 2 (10 (122)), 22-30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275550>

88. Tsapko, Y., Tsapko, A., Likhnyovskyi, R., Shumbar, K., Slutska, O., Berdnyk, O., Borysova, A., & Dotsenko, O. (2025). Establishing the rules of formation of fire-resistant biocomposites for building materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (134)), 35-43. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.326655>

89. Zhang, L., Hu, Y., & Li, M. (2022). Research on thermal response behavior of the intumescent coating at high temperature: an experimental and numerical study. *Buildings*, 12, 1014. <https://doi.org/10.3390/buildings12071014>

90. Cirpici, B. K., Wang, Y.C., & Rogers, B. (2016). Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire. *Fire Safety Journal*, 81, 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.01.011>

91. Yin, X., Pang, H., Luo, Y., & Zhang, B. (2021). Eco-friendly functional two-component flame-retardant waterborne polyurethane coatings: A review. *Polymer Chemistry*, 12, 5400–5411. <https://doi.org/10.1039/D1PY00920F>.

92. Zhong, F., Lu, M., Chen, C., Liu, L., & Yang, X. (2023). Phytic acid cross-linked copper ions anchored to BN surface to enhance the fire performance of waterborne epoxy intumescent coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 665, 131275. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131275>

93. Lim, K.-S. Bee, S.-T., Sin, L. T., Tee, T.-T., Ratnam, C. T., Hui, D., & Rahmat A. R. (2016). A review of application of ammonium polyphosphate as intumescent flame retardant in thermoplastic composites. *Composites Part B: Engineering*, 84, 155-174. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.08.066>

94. Ou, M., Cui, J., Zhao, Z., Li, R., Guan, H., Liu, L., Jiao, C., & Chen, X. (2023). Solvent-free intumescent fire protection epoxy coatings with excellent smoke suppression, toxicity reduction, and durability enabled by a micro/nano-structured P/N/Si-containing flame retardant. *Progress in Organic Coatings*, 183, 107762. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107762>

95. Strassburger, D., Silveira, M.R., Baldissera, A.F., & Ferreira, C.A. (2023). Performance of different water-based resins in the formulation of intumescent coatings for passive fire protection. *Journal of Coatings Technology and Research*, 20, 201-221. <https://doi.org/10.1007/s11998-021-00597-4>

96. Zhang, Q., Wang, Q., Li, Y., Li, Z., & Liu, S. (2024). Effects and mechanisms of ultralow concentrations of different types of graphene oxide flakes on fire resistance of water-based intumescent coatings. *Coatings*, 14, 162. <https://doi.org/10.3390/coatings14020162>

97. Mac, V.P., Do, M.T., Nguyen, A.H., Dao, P.H., Nguyen, T.V., Pham, C.N., & Nguyen, T.A. (2024). A Water-based flame-retardant coating with cenospheres. *Journal of Coatings Technology and Research*, 21(13). <https://doi.org/10.1007/s11998-024-00947-y>.

98. Jin, W.-J., He, W.-L., Gu, L, Cheng, X.-W., & Guan, J.-P. (2022). An eco-friendly and intumescent p/n/s-containing flame retardant coating for polyamide 6

fabric. *European Polymer Journal*, 180 (3–4), 111610. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2022.111610>

99. Maluk, C., Woodrow, M., & Torero J. L. (2017). The potential of integrating fire safety in modern building design. *Fire Safety Journal*, 88, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.006>

100. Xie, Y., Liu, C., Wang, Y., Bao, D., Yan, W., & Zhou, G. (2024). Waterborne polyurethane treated with flame retardant based on polydimethylsiloxanes and boron phenolic resin for improving the char residue and anti-dripping performance. *Molecules*, 29, 5799. <https://doi.org/10.3390/molecules29235799>

101. Zhang, J., Yeoh, G.H., & Kabir, I.I. (2025). Polyurethane materials for fire retardancy: synthesis, structure, properties, and applications. *Fire*, 8, 64. <https://doi.org/10.3390/fire8020064>

102. Manivannan, S. (2025). Flame-retardant coatings: Recent advances in materials, mechanisms, and multifunctional applications. *Progress in Organic Coatings*, 209, 109572. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109572>

103. Xu, N., Qiu, G.F., Jin, L.P. et al. (2025). Preparation and properties of fire-retardant epoxy resin containing an environmentally friendly bio-based CS@SA@ZIF-67 Core-shell nano-hybrid. *Chinese Journal of Polymer Science*, 43, 828-836. <https://doi.org/10.1007/s10118-025-3326-6>

104. Калафат, К., Вахітова, Л. (2023). *Вогнезахисні рішення для сталевого будівництва: монографія*. К.: УЦСБ, 2023. 372 с.

105. Gupta, R., Singh, M. K., Rangappa, S.M., Siengchin, S., Dhakal, H. N. & Zafar, S. (2024). Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites: Degradation mechanisms, modeling and applications. *Heliyon*, 10, (21), e39662. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39662>

106. Murad, M.S., Hamzat, A.K., Asmatulu, E., & Asmatulu, R. (2024). Flame-retardant fiber composites: synergistic effects of additives on mechanical,

thermal, chemical, and structural properties. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8 (1), 31. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01111-1>

107. Zang, X., Liu, W., Wu, D., Pan, X., Zhang, W., Bian, H., & Shen, R. (2024). Contemporary fire safety engineering in timber structures: challenges and solutions. *Fire*, 7, 2. <https://doi.org/10.3390/fire7010002>.

108. Lu, W., Zhang, S., Wang, L., Guo, C., Wang, X., Wang, D., Zhao, Z.-B., Yang, K., Ma, Y., & Li, W. (2022). Understanding the role of epoxy emulsifiers in water-borne epoxy coatings with the aggregation-induced emission approach. *Progress in Organic Coatings*, 170, 106987. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106987>

109. Ai, D., Mo, R., Wang, H., Lai, Y., Jiang, X., & Zhang, X. (2019). Preparation of waterborne epoxy dispersion and its application in 2K waterborne epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 136, 105258. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105258>

110. Camino, G., & Lomakin, S. *Fire retardant materials* / Horrocks, A. and Price, D. (Eds). Cambridge: CRC Press and Woodhead Publishing Ltd., 2001. 318-336.

111. Piperopoulos, E., Scionti, G., Atria, M., Calabrese, L., Valenza, A., & Proverbio, E. (2024). Optimizing ammonium polyphosphate–acrylic intumescent coatings with sustainable fillers for naval fire safety. *Materials*, 17, 5222. <https://doi.org/10.3390/ma17215222>

112. Zhang, Y., Zhang, L., Chang, Z., Meng, T., Liu, F., Zhou, H., & Zhang D. (2024). Natural polymer agar for enhancing fire resistance and smoke suppression of intumescent fire-retardant coating used in steel structures. *Polymer Degradation and Stability*, 227, 110844. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110844>

113. Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Вибір полімерів для застосування в промислових вогнезахисних реактивних покриттях. *Технології та інжиніринг*, (2), 106-116. <http://dx.doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.10>

114. Li, Y., Yang, H., Chen, X., & Liu, D. (2025). Physicochemical mechanism of flame-retardant enhancement for elastomeric polyurea: A mini-review. *Journal of Polymer Science*, 63, 358-371. <https://doi.org/10.1002/pol.20240453>
115. Fu, A., Ulusoy, B., Ahmadi, H., Wu, H., & Dam-Johansen, K. (2025). Intumescent coatings: Comprehensive advances with a focus on inorganic-dominant systems. *Progress in Organic Coatings*, 199, 108939. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108939>
116. Sai, T., Ran, S., Guo, Z., Song, P., & Fang Z. (2022). Recent advances in fire-retardant carbon-based polymeric nanocomposites through fighting free radicals. *Sus Mat*, 2, 411–434. <https://doi.org/10.1002/sus2.73>
117. Zhan, W., Li, L., Chen, L., Kong, Q., Chen, M., Chen, C., Zhang, Q., & Jiang, J. (2024). Biomaterials in intumescent fire-retardant coatings: A review. *Progress in Organic Coatings*, 192, 108483. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108483>
118. Pimenta, J.T., Gonçalves, C., Hiliou, L., Coelho, J.F.J., & Magalhaes, F.D. (2015). Effect of binder on performance of intumescent coatings. *Coatings Technology and Research*, 13, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9737-5>
119. Canosa, G., Alfieri, P. V., & Giudice, C. A. (2011). Hybrid intumescent coatings for wood protection against fire action. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 11897-11905. <https://doi.org/10.1021/ie200015k>
120. Zafar, F., Ghosal, A., Sharmin, E., Chaturvedi, R., & Nishat, N. (2019). A review on cleaner production of polymeric and nanocomposite coatings based on waterborne polyurethane dispersions from seed oils. *Progress in Organic Coatings*, 131, 259–275. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.02.014>
121. Wang, X., Cui, Y., Wang, Y., Ban, T., Zhang, Y., Zhang, J., & Zhu, X., (2021). Preparation and characteristics of crosslinked fluorinated acrylate modified waterborne polyurethane for metal protection coating. *Progress in Organic Coatings*, 158, 106371. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106371>

122. Song, F., Liu, T., Fan, Q., Li, D., Ou, R., Liu, Z., & Wang, Q. (2022). Sustainable, high-performance, flame-retardant waterborne wood coatings via phytic acid based green curing agent for melamine-urea-formaldehyde resin. *Progress in Organic Coatings*, 162, 106597. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106597>
123. Liu, Y., Liu, W., Wei, S., Yue, Y., Dong, L., Yu, L., & He, G. (2024). Preparation and application of the water-based acrylic self-polishing resin: good storage stability, good film-forming matrix of marine antifouling coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 141, e55532. <https://doi.org/10.1002/app.55532>
124. Haddadi, S. A., A Ramazani, S. A., Mahdavian, M., Taheri, P., Mol, J. M. C., & Gonzalez-Garcia, Y. (2019). Self-healing epoxy nanocomposite coatings based on dual-encapsulation of nano-carbon hollow spheres with film-forming resin and curing agent. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107087. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107087>
125. Zhu, J., Wu, Z., Xiong, D., Pan, L., & Liu, Y. (2019). Preparation and properties of a novel low crystallinity cross-linked network waterborne polyurethane for water-based ink. *Progress in Organic Coatings*, 133, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.033>
126. Mohd Sabee, M. M. S., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Zulkepli, N. A., Shafiq, M. D., & Abdul Hamid, Z. A. (2022). Flame retardant coatings: additives, binders, and fillers. *Polymers*, 14, 2911. <https://doi.org/10.3390/polym14142911>
127. Liang, C., Du, Y., Wang, Y., Ma, A., Huang, S., & Ma, Z. (2021). Intumescent fire-retardant coatings for ancient wooden architectures with ideal electromagnetic interference shielding. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4, 979-988. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00274-5>
128. Zhan, W., Ni, L., Gu, Z., Cui, F., Jiang, J., & Chen, L. (2021). The Influences of graphene and carbon nanotubes on properties of waterborne

intumescent fire resistive coating. *Powder Technology*, 385, 572-579.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.018>

129. Raji, M.A., Hambali, H.U., Khan, Z.I., Binti Mohamad, Z., Azman, H., & Ogabi, R. (2023). Emerging trends in flame retardancy of rigid polyurethane foam and its composites: a review. *Journal of Cellular Plastics*, 59, 65–122.
<https://doi.org/10.1177/0021955X221144564>

130. Ji, J., Huang, S., Liu, S., Yuan, Y., Zhao, J., & Zhang, S. (2022). A novel biomass-derived Schiff base waterborne epoxy coating for flame retardation and anti-bacteria. *Polymer Degradation and Stability*, 199, 109910.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109910>

131. Yang, Z., Xiao, G., Chen, C., Chen, C., Wang, M., Zhong, F., Zeng, S., & Lin, L. (2021). Synergistic decoration of organic titanium and polydopamine on boron nitride to enhance fire resistance of intumescent waterborne epoxy coating. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 621, 126561.
<https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2021.126561>

132. Wang, C., Wang, Z., Liu, S., Luo, H., Fan, W., Liu, Z., Liu, F., & Wang, H. (2021). Anti-corrosion and wear-resistant coating of waterborne epoxy resin by concrete-like three-dimensional functionalized framework fillers. *Chemical Engineering Science*, 242, 116748. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116748>

133. Yang, X., Wan, Y., Yang, N., Hou, Y., Chen, D., Liu, J., Cai, G., & Wang, M. (2024). The effect of different diluents and curing agents on the performance of epoxy resin-based intumescent flame-retardant coatings. *Materials*, 17, 348. <https://doi.org/10.3390/ma17020348>

134. Troitzsch, J. H. (2023). Fire performance durability of flame retardants in polymers and coatings. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.05.002>

135. Kovtun, G., & Cuberes, T. (2025). Impact of glycerol and heating rate on the thermal decomposition of PVA Films. *Polymers*, 17, 2095.
<https://doi.org/10.3390/polym17152095>

136. Pielichowski, K., Njuguna J., & Majka, T.M. (2022). *Thermal degradation of polymeric materials*. 2nd Ed., Elsevier Science, 378 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04932-1>
137. Lou, F., Wu, K., Wang, Q., Qian, Z., Li, S., & Guo W. (2019). Improved flame-retardant and ceramifiable properties of eva composites by combination of ammonium polyphosphate and aluminum hydroxide. *Polymers*, 11. 125-128. <https://doi.org/10.3390/polym11010125>
138. Eremina, T., & Korolchenko, D. (2020). Fire protection of building constructions with the use of fire-retardant intumescent compositions. *Building*, 10, 185-187. <https://doi.org/10.3390/buildings10100185>
139. Li, L., Chen, G., Liu, W., Li J., & Zhang, S. (2009). The anti-dripping intumescent flame retardant finishing for nylon-6,6 fabric. *Polymer Degradation and Stability*, 94 (6), 996-1000. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.009>
140. Anees, S.M., & Dasari, A.A. (2018). review on the environmental durability of intumescent coatings for steels. *Journal of Materials Science*, 53, 124-145. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1500-0>
141. Camino, G., Costa, L., & Martinasso, G. (1989). Intumescent fire-retardant systems. *Polymer Degradation and Stability*, 23 (4), 359-376. [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(89\)90058-X](https://doi.org/10.1016/0141-3910(89)90058-X)
142. Gardelle, B., Duquesne, S., Vandereecken, P., & Bourbigot, S. (2014). Resistance to fire of silicone-based coatings: fire protection of steel against cellulosic fire. *Journal of Fire Sciences*, 32 (4), 374-387. <https://doi.org/10.1177/0734904114522390>
143. Zheng, S. X., & Chen, H. S. (2023). Correlations of rheological methods to coatings' performance. *Progress in Organic Coatings*, 177, 107403. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107403>

144. Wang, C.-S., Chapelle, G., Carreau, P., & Heuzey, M.-C. (2021). Prediction of sag resistance in paints using rheological measurements. *Progress in Organic Coatings*, 153, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106139>
145. Bhavsar, R., & Shreepathi, S. (2016). Evolving empirical rheological limits to predict flow-levelling and sag resistance of waterborne architectural paints. *Progress in Organic Coatings*, 101, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.07.016>
146. Hester, R. D., & Squire, D. R. (1997). Rheology of waterborne coatings. *Journal of Coatings Technology*, 69(1), 109-114. <https://doi.org/10.1007/bf02696097>
147. Pourhashem, G. (2020). Coating a sustainable future. *Coatings*, 10(8), 713. <https://doi.org/10.3390/coatings10080713>
148. Briggs, J. L., & Steffe, J. F. (1997). Using brookfield data and the Mitschka method to evaluate power law foods. *Journal of Texture Studies*, 28(5), 517-522. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1997.tb00134.x>
149. Eley, R.R. (2019). Applied rheology and architectural coating performance. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16, 263–305. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00187-5>
150. Rabasco, J. J., Conley, T. L., Fasano, D., & Saucy, D. (2014). Next-generation rheology modifier technology: novel molecular architecture for breakthrough sag/flow balance, universal viscosity retention on tinting, and optimum applied hide. *CoatingsTech*, 63, 58-66.
151. He, M., Lin, Y., Huang, Y., Fang, Y., & Xiong, X. (2025). Research progress of the preparation of cellulose ethers and their applications: a short review. *Molecules*, 30 (7), 1610. <https://doi.org/10.3390/molecules30071610>
152. McMullen, R. L., Ozkan, S., & Gillece, T. (2022). Physicochemical properties of cellulose ethers. *Cosmetics*, 9(3), 52. <https://doi.org/10.3390/cosmetics9030052>

153. Cibangwa, M. K., Ikhu-Omoregbe, D., & Nomnqa, M. (2025). Comparative rheological evaluation of associative thickeners in water-based paint: Influence of polymeric binder and thickener concentration. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101122. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101122>
154. Tzortzi, I., Joundi, I., Kavousanakis, M., Spyriouni, T., Bampouli, A., Michaud, G., Van Gerven, T., & Stefanidis, G. D. (2024). Tailoring waterborne coating rheology with hydrophobically modified ethoxylated urethanes (heurs): molecular architecture insights supported by CG-MD Simulations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(22), 10009-10026. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00253>
155. Larson, R. G., Van Dyk, A. K., Chatterjee, T., & Ginzburg, V. V. (2022). Associative thickeners for waterborne paints: Structure, characterization, rheology, and modeling. *Progress in Polymer Science*, 129, 101546. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101546>
156. Franceschini, M., Pizzetti, F., & Rossi, F. (2025). On the key role of polymeric rheology modifiers in emulsion-based cosmetics. *Cosmetics*, 12(2), 76. <https://doi.org/10.3390/cosmetics12020076>
157. Zhang, Q., Chen, J., Zhu, J., Yang, Y., Zhou, D., Wang, T., Shu, X., & Qiao, M. (2022). Advances in organic rheology-modifiers (chemical admixtures) and their effects on the rheological properties of cement-based materials. *Materials*, 15(24), 8730. <https://doi.org/10.3390/ma15248730>
158. Wołosz, D., Fage, A. M., Paweł Grzegorz Parzuchowski, P. G., Świdarska, A., Brüll, R., & Elsner, P. (2023). Sustainable associative thickeners based on hydrophobically modified ethoxylated poly(hydroxy-urethane)s end-capped by long alkyl chains. *Progress in Organic Coatings*, 179, 107514. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107514>
159. Quienne, B., Pinaud, J., Robin, J.-J. & S. Caillol (2020). From architectures to cutting-edge properties, the blooming world of hydrophobically

modified ethoxylated urethanes (HEURs). *Macromolecules*, 53 (16), 6754-6766
<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.0c01353>

160. Leca, M., Cioroianu, L., Cioroianu, G., Damian, G., Costea, C., & Matei, A.M. (2007). Aqueous ecological intumescent fire retardant coatings for multifunctional applications. 1. Preparation and characterization. *Revue Roumaine de Chimie*, 52(8–9), 745-752.

161. Bhavsar, R.A., & Nehete, K.M. (2019). Rheological approach to select most suitable associative thickener for water-based polymer dispersions and paints. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16(4), 1089–1098.
<https://doi.org/10.1007/s11998-019-00194-6>

162. Richards, J. A., Hodgson, D. J. M., O’Neill, R. E., DeRosa, M. E., & Poon W. C. K. (2024). Optimizing non-Newtonian fluids for impact protection of laminates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(10). e2317832121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2317832121>

163. Rabajczyk, A., Zielecka, M., Popielarczyk, T., Sowa, T. (2021). Nanotechnology in fire protection – application and requirements. *Materials*, 14, 7849. <https://doi.org/10.3390/ma14247849>

164. Guzii, S. (2021). Studies of the effect of viscosity stabilizers of fire retardant aluminosilicate paints for wood products and structures. *Journal of Modern Technology and Engineering*, 6(1), 24–33.

165. Ysiwata-Rivera, A.P., Hernández-Hernández, E., Cadenas-Pliego, G., Ávila-Orta, C.A., González-Morones, P., Jesús, J.A.V., Cuara-Díaz, E., Gallardo-Vega, C.A., & Mata-Padilla, J.M. (2020). Effect of modified hexagonal boron nitride nanoparticles on the emulsion stability, viscosity and electrochemical behavior of nanostructured acrylic coatings for the corrosion protection of aisi 304 stainless steel. *Coatings*, 10, 488. <https://doi.org/10.3390/coatings10050488>

166. Richards J. A., Hodgson, D. J., O’Neill, R. E., et al. (2024). Optimizing Non-Newtonian fluids for impact protection of laminates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121 (10). e2317832121.

167. European Organisation for Technical Approvals. (2012). Fire protective products. (ETAG 018) Part 3: rendering and rendering kits intended for fire resisting applications. URL: <https://www.eota.eu/sites/default/files/uploads/ETAGs/etag-018-part-3-april-2013.pdf>

168. Wang, J., & Zhao, M. (2020). Study on the effects of aging by accelerated weathering on the intumescent fire retardant coating for steel elements. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104920. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104920>

169. Duquesne, S., Jimenez, M., Bourbigot, S. (2014). Aging of the flame-retardant properties of polycarbonate and polypropylene protected by an intumescent coating. *Journal of Applied Polymer Science*, 131, 39566. <https://doi.org/10.1002/app.39566>

170. Ostman, B., Voss, A., Hughes, A. (2001). Durability of fire retardant treated wood products at humid and exterior conditions review of literature. *Fire and Materials*, 25, 95-104. <https://doi.org/10.1002/fam.758>

171. Maciulaitis, R., Grigonis, M., & Malaiskiene, J. (2018). The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance. *Fire Safety Journal*, 98, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.007>

172. Gaddam, S. K., Pothu, R., & Boddula, R. (2021). Advanced polymer encapsulates for photovoltaic devices – A review. *Journal of Materiomics*, 7(5), 920-928. <https://doi.org/10.1016/j.jmat.2021.04.004>

173. Bahrani, B., Hemmati, V., Zhou, & A. Quarles S.L. (2018). Effects of natural weathering on the fire properties of intumescent fire-retardant coatings. *Fire and Materials*, 42, 413-423. <https://doi.org/10.1002/fam.2506>

174. Dong, Y., Wang, G. & Su, Q. (2014). Influence of hydrothermal aging process on components and properties of waterborne fire-resistive coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 11, 207-216, <https://doi.org/10.1007/s11998-013-9549-4>

175. Liu, Z., Dai, M., Hu, Q., Liu, S., Gao, X., Ren, F. & Zhang Q. (2018). Effect of microencapsulated ammonium polyphosphate on the durability and fire

resistance of waterborne intumescent fire-retardant coatings. *Journal of Coatings Technology and Research*, 16 (1), 135-145. <https://doi.org/10.1007/s11998-018-0108-x>

176. Wang, J., & Wang, G. (2014). Influences of montmorillonite on fire protection, water and corrosion resistance of waterborne intumescent fire retardant coating for steel structure. *Surface and Coatings Technology*, 239, 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.11.037>

177. Wang, Z., Han, E., & Ke W. (2007). Influence of expandable graphite on fire resistance and water resistance of flame-retardant coatings. *Corrosion Science*, 49 (5), 2237-2253. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2006.10.024>

178. Wang, L. L., Wang, Y. C., Li, G. Q., & Zhang, Q. Q. (2020). An experimental study of the effects of topcoat on aging and fire protection properties of intumescent coatings for steel elements. *Fire Safety Journal*, 111, 102931. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102931>

179. R. Hensel (2021). Durability of intumescent coatings: Extension of the working life to 25 years in accordance with the European approval principles (German: Dauerhaftigkeit von reaktiven Brandschutz-Beschichtungen: Erweiterung der Nutzungsdauer auf 25 Jahre gemäß der europäischen Zulassungsrichtlinie). URL: <https://www.rudolf-hensel.de/wp-content/uploads/download/RH-Dauerhaftigkeit-RBS-mittel.pdf> (дата звернення: 10.11.2025)

180. Shahidi, S., Mohammadi, S. (2023). Synergistic effect of nano hybrid multi-layered graphene oxide/talc and silica fume on the fire and water -resistance of intumescent coatings. *Progress in Organic Coatings*, 183, 10773. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107736>

181. Daus, L.-H., Korzen, M., & Schartel B. (2018). High-throughput fire tests and weathering-induced degradation behaviour of intumescent coatings. IOP Conference Series: Journal of Physics: Conf. Series 1107, 032014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1107/3/032014>

182. Gaston, F., Dupuy, N., Girard-Perier, N., Sylvain, & Dorey, S. (2021). Investigations at the product, macromolecular, and molecular level of the physical and chemical properties of a γ -irradiated multilayer EVA/EVOH/EVA Film: comprehensive analysis and mechanistic insights. *Polymers*, 13(16), 2671. <https://doi.org/10.3390/polym13162671>
183. Iscen, A., Forero-Martinez, N. C., Valsson, Ó., & Kremer, K. (2023). Molecular Simulation Strategies for Understanding the Degradation Mechanisms of Acrylic Polymers. *Macromolecules*, 56(9), 3272-3285. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.2c02442>
184. Mačiulaitis, R., Grigonis, M., Malaiškienė, J., & Lipinskas, D. (2018). Peculiarities of destruction mechanism of polymeric intumescent fire protective coatings. *Journal of Civil Engineering and Management*, 24 (2), 93-105. <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.447>
185. Kwang Yin, J.J., Yew, M.C., Yew, M.K., Saw, L. H. (2019). Preparation of intumescent fire protective coating for fire rated timber door. *Coatings*, 9 (11), 738. <https://doi.org/10.3390/coatings9110738>
186. Daus, L.-H., Schartel, B., Wachtendorf, V., Mangelsdorf, R., & Korzen, M. (2020). A chain is no stronger than its weakest link: Weathering resistance of water-based intumescent coatings for steel applications. *Journal of Fire Sciences*, 39(1), 073490412096106. <https://doi.org/10.1177/0734904120961064>
187. Alongi, J., Han, Z., & Bourbigot, S. (2015). Intumescence: Tradition versus novelty. A comprehensive review. *Progress in Polymer Science*, 51, 28-73. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2015.04.010>
188. Wang, Z., Han, E., & Ke, W. (2006). Effect of nanoparticles on the improvement in fire-resistant and anti-ageing properties of flame-retardant coating. *Surface and Coatings Technology*, 200 (20), 5706-5716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.102>
189. Xu, Q., Li, G.-Q., Jiang, J., & Wang, Y. C. (2018). Experimental study of the influence of topcoat on insulation performance of intumescent coatings for

steel structures. *Fire Safety Journal*, 101, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.08.006>

190. Wang, L.L., Wang, Y.C., & Li, G.Q. (2013). Experimental study of hydrothermal aging effects on insulative properties of intumescent coating for steel elements. *Fire Safety Journal*, 55, 168-181. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.10.004>

191. Lade, R. K., Musliner, A. D., Macosko, C. W., & Francis, L.F. (2015). Evaluating sag resistance with a multinotched applicator: Correlation with surface flow measurements and practical recommendations. *Journal of Coatings Technology and Research*, 12, 809-817. <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9680-5>

192. ДСТУ Б В.1.1-14:2007. Колони. Метод випробування на вогнестійкість. [Недіючий від 2024-05-01]. Вид. офіц. К.: Укрархбудінформ, 2007. 15 с. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=21676

193. ДСТУ EN 16623:2015. Фарби та лаки. Реакційні покриття для вогнезахисту металевих поверхонь. Визначення, вимоги, властивості та маркування (EN 16623:2015, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Retrieved from https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=83332

194. Casson, N. (1959). A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type. In: C.C. Mill (Ed.), *Rheology of Disperse Systems*, Pergamon Press. Oxford, 84-104.

195. Rafiq, B. A., Bilal, A., Afzal, J. V., Tawade, N. V., Kulkarni, B., Abdullaeva, T., Saidani, M., & Gupta, M. (2025). Thermo-fluid dynamics of non-Newtonian Casson fluid in expanding-contracting channels with Joule heating and variable thermal properties. *Partial Differential Equations and Applications*, 13, 101105. <https://doi.org/10.1016/j.padiff.2025.101105>

196. Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., Раєнко, Г. Ф., Шологон, В. І., Короткіх, М. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Етери целюлози як модифікатори реології вогнезахисних фарб реактивного типу.

Технології та інжиніринг, 3(20), 98-109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.8>

197. Вахітов, Р. А., Шологон, В. І., Таран, Н. А., Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Дослідження вогнестійкості покриття реактивного типу в умовах вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(12), 59-68. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-12-59-68>

198. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Fire-retardant epoxy composition modified with nano-clays. *American Journal of Engineering Research*, 13(8), 41-46. Retrieved from <https://www.ajer.org>

199. Шологон, В. І., Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2023). Модифікація та армування епоксидних покриттів інтумесцентного типу. *Технології та інжиніринг*, 3 (13), 77-88. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.8>

200. de Silva, D., Alam, N., & Cibelli, A., et al. (2025). Exploring the fire behaviour of intumescent coatings for steel structures under different exposure conditions. *Fire Technology*, 61, 5529-5556. <https://doi.org/10.1007/s10694-025-01798-8>

201. Seo, H. J., Kim, S., Huh, W., Park, K. W., Lee, D. R., Son, D. W., & Kim, Y. S. (2016). Enhancing the flame-retardant performance of wood-based materials using carbon-based materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123, 1935-1942. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4553-9>

202. Singh, S., Shivani, S., Siddapureddy, S., & Prabhu, S. V. (2019). Performance of intumescent coatings in cone calorimeter and open pool fires. *Fire Research*, 3(1). <https://doi.org/10.4081/FIRE.2019.45>

203. Jimenez, M., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2006). Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*, 449 (1–2), 16-26. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4553-9>

204. Таран, Н. А., Шологон, В. І., Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., & Бессарабов, В. І. (2024). Розроблення засобів мобільного вогнезахисту –

рулонних протипожежних матеріалів. Огляд літератури. *Технології та інжиніринг*, 5(22), 123-146. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.12>

205. Вахітов, Р. А., Шологон, В. І., Таран, Н. А., Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2025). Дослідження вогезахисних властивостей інтумесцентних рулонних покриттів. *Український журнал природничих наук*, 12, 111-121. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.10>

206. Rheological characterization of paints and coatings. (2015). Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12120>

207. Javanbakht, T. (2021). Comparative study of rheological properties of polyvinyl alcohol and polyethylene glycol. *Journal of Engineering Sciences*, 8(2), F11-F18. [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).f3)

208. Shahzad, H., Wang, X., Ghaffari, A., et al. (2022). Fluid structure interaction study of non-Newtonian Casson fluid in a bifurcated channel having stenosis with elastic walls. *Scientific Reports*, 12, 12219. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16213-3>

209. Mutschlechner, M., Gstir, R., Schöbel, H., et al. (2025). From process to product: Exploring microbial diversity in paints. *Journal of Coatings Technology and Research*, 22, 481-490. <https://doi.org/10.1007/s11998-024-00990-9>

210. Zhang, J., Wang, S., Tang, Y., Liu, F., Zhao, Y., Chen, J., & Edgar, K. (2024). Dess-Martin oxidation of hydroxypropyl and hydroxyethyl cellulose, and exploration of their polysaccharide/polypeptide hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 328, 121732. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121732>

211. Erkselius, S., & Karlsson, O. J. (2005). Free radical degradation of hydroxyethyl cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 62(4), 344–356. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.08.013>

212. Wang, Z., Han, E., & Ke, W. (2006). Fire-resistant effect of nanoclay on intumescent nanocomposite coatings. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(3), 1681-1689. <https://doi.org/10.1002/app.25096>

213. Carosio, F., Colonna, S., Fina, A., Rydzek, G., Hemmerle, J., Jierry, L., & Schaaf, P. (2014). Efficient gas and water vapor barrier properties of thin poly(lactic acid) packaging films: Functionalization with moisture resistant Nafion and clay multilayers. *Chemistry of Materials*, 26(19), 5459-5466. <https://doi.org/10.1021/cm501359e>

214. Workman, J., Jr. (2001). *The Handbook of Organic Compounds: NIR, IR, Raman, and UV-Vis Spectra Featuring Polymers and Surfactants*. Elsevier. Academic Press. 503 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-763560-6.X5000-4>

215. Vakhitova, L. M., Taran, N. A., Bessarabov, V. I., Vakhitov, R. A., Rayenko, G. F., & Popov, A. F. (2023). Rheologically improved microemulsion for deactivation of simulants of blister and nerve agents. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 6, 44–52. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2023-151-6-44-52>

216. Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., Короткіх, М. І., Вахітов, Р. А., Бессарабов, В. І., & Попов, А. Ф. (2023). Окислювально-нуклеофільні системи для розкладання отруйних речовин шкірно-наривної та нервово-паралітичної дії. *Технології та інжиніринг*, 2(13), 85-98. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.2.8>

217. Vakhitov, R., Taran, N., Drizhd, V., Kalafat, K., Korotkikh, M., & Vakhitova, L. (2025). Reactive fire-retardant nanocoatings for steel structures. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10(6), 396-411. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25jun234>

218. Таран, Н. А., Шологон, В. І., Вахітов, Р. А., Калафат, К. В. (2025). Вплив графітових наповнювачів на ефективність інтумесцентних вогнезахисних покриттів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 351(3.1), 473-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-60>

219. Vakhitov, R., Drizhd, V., Vakhitova, L., Bessarabov, V., & Strashnyi, V. (2022). Rheological parameters of polymer fire-retardant coatings with R120-R150 fire resistance rate. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and*

current priorities: multi-authored monograph. Levytskyi, V., Plavan, V., Skorokhoda, V. Khomenko, V. (Eds.). Lviv: Lviv Polytechnic National University, 219-221. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/23289>

220. Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Вогнезахисні реактивні покриття для фармацевтичних підприємств. *Chemical and biopharmaceutical technologies: collection of scientific papers*. V. Bessarabov, V. Lubenets. (Eds). Tallinn: Nordic Sci Publisher. 280-289. <https://www.kyivlvivpharma.com/abstract23>

221. Вахітов, Р. А., Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Реологія полімерних вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання*: колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції (18 жовтня 2023 року). м. Київ. Плаван, В., Касич, А., & Бутенко, О. (Ред.), Київ: КНУТД, 135-144. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26253>

222. Пат. 162549 UA, МПК C09D5/18, C09D163/02. Спосіб одержання вогнезахисної інтумесцентної композиції для покриття рулонного матеріалу/ Вахітов Р. А. (UA) , Шологон В. І. (UA), Калафат К. В. (UA), Короткіх М. І. (UA), Бессарабов В. І. (UA), патентовласники Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАНУ (UA), Київський національний університет технологій та дизайну МОН України (UA). – № u202505073; заявл. 17.10.2025; опубл. 01.04.2026, Бюл. № 13/2026. Режим доступу: <https://sis.nipo.gov.ua>

ДОДАТОК А

Список основних публікацій здобувача

1. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, Drizhd, V., Taran, N., & Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100544> (Наукометрична база даних Scopus).
2. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Heliyon*, 10 (14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729> (Наукометрична база даних Scopus).
3. Vakhitova, L., Drizhd, V., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, Taran, N., & Bessarabov, V. (2025). Modeling the rheology of commercial reactive fire-retardant coating materials for steel. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84)), 6-11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.334121> (Фахове видання категорії А, наукометрична база даних Scopus).
4. Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2023). Модифікація та армування епоксидних покриттів інтумесцентного типу. *Технології та інжиніринг*, 3(14), 77-88. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.8> (Фахове видання категорії Б).
5. Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Таран, Н. А., Вахітова, Л. М., & Бессарабов, В. І. (2022). Синтез та ідентифікація оксинітрату графіту. *Технології та інжиніринг*, 5(10), 67-79. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.5.7> (Фахове видання категорії Б).
6. Таран, Н. А., Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, Раєнко, Г. Ф., Калафат, К. В., & Бессарабов, В. І. (2024). Розроблення засобів мобільного вогнезахисту – рулонних протипожежних матеріалів: огляд літератури. *Технології та інжиніринг*, 5(22), 123-146. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.5.12> (Фахове видання категорії Б).

7. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Вибір полімерів для застосування в промислових вогнезахисних реактивних покриттях. *Технології та інжиніринг*, 2(19), 106-116. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.2.10> (Фахове видання категорії Б).
8. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Бессарабов, В. І., Раєнко, Г. Ф., Шологон, В. І., Короткіх, М. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Етери целюлози як модифікатори реології вогнезахисних фарб реактивного типу. *Технології та інжиніринг*, 3(20), 98-109. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.8> (Фахове видання категорії Б).
9. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Таран, Н. А., Раєнко, Г. Ф., Шологон, В. І., & Вахітова, Л. М. (2024). Дослідження вогнестійкості покриття реактивного типу в умовах вуглеводневої пожежі. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(12), 59-68. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2024-1-12-59-68> (Фахове видання категорії Б).
10. Таран, Н. А., Шологон, В. І., **Вахітов, Р. А.**, & Калафат, К. В. (2025). Вплив графітових наповнювачів на ефективність інтумесцентних вогнезахисних покриттів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 351(3.1), 473-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-60> (Фахове видання категорії Б).
11. **Вахітов, Р. А.**, Шологон, В. І., Таран, Н. А., Калафат, К. В., Бессарабов, В. І., & Вахітова, Л. М. (2025). Дослідження вогнезахисних властивостей інтумесцентних рулонних покриттів. *Український журнал природничих наук*, 12, 111-121. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.10> (Фахове видання категорії Б).
12. **Vakhitov, R.**, Drizhd, V., Vakhitova, L., Bessarabov, V., Strashnyi, V. (2022). Rheological parameters of polymer fire-retardant coatings with R120-R150 fire resistance rate. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph*. Levytskyi, V., Plavan, V., Skorokhoda, V. Khomenko, V. (Eds.). Lviv: Lviv Polytechnic National University, 215-217.

https://drive.google.com/file/d/1nwPbZ_aibdKeKd_XAeBxz261QAeiR1MZ/view?usp=drive_link

13. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Вогнезахисні реактивні покриття для фармацевтичних підприємств. *Chemical and biopharmaceutical technologies: collection of scientific papers*. V. Bessarabov, V. Lubenets. (Eds). Tallinn: Nordic Sci Publisher. 280-289. <https://www.kyivlvivpharma.com/abstract23>

14. Vakhitova, L., Kalafat, K., **Vakhitov, R.**, & Drizhd, V. (2024). Fire-retardant epoxy composition modified with nano-clays. *American Journal of Engineering Research*, 13(8), 41-46. <https://www.ajer.org/papers/Vol-13-issue-8/13084146.pdf>

15. **Вахітов, Р. А.**, Калафат, К. В., Шологон, В. І., Вахітова, Л. М., Таран, Н. А., & Бессарабов, В. І. (2023). Реологія полімерних вогнезахисних покриттів для сталевих конструкцій. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання: колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції (18 жовтня 2023 року)*. м. Київ. Плаван, В., Касич, А., & Бутенко, О. (Ред.), Київ: КНУТД, 135-144. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/26253>

16. **Vakhitov, R.**, Taran, N., Drizhd, V., Kalafat, K., Korotkikh, M., & Vakhitova, L. (2025). Reactive fire-retardant nanocoatings for steel structures. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 10(6), 396-411. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/25jun234>

ДОДАТОК Б
Акт впровадження результатів дисертаційної роботи
на виробництві ТОВ «Ковлар Груп»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Раміля ВАХІТОВА

1. **Назва впровадження:** Засіб вогнезахисний для металевих конструкцій «IFR-S».
2. **Установа, автор:** Київський національний університет технологій та дизайну
01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2.
Аспірант Раміль Вахітов.
3. **Об'єкт впровадження:** Технологічна схема виробництва засобу вогнезахисного для металевих конструкцій «IFR-S».
4. **Джерело інформації:** Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. *Helvion*, 10(14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.helivon.2024.e34729>
4. **Впроваджено:** На об'єкті ТОВ «Ковлар Груп» виготовлена дослідна партія вогнезахисного засобу «IFR-S» у кількості 500 кг. Технологічний процес був здійснений за етапами наданої Технологічної схеми та оснащений необхідним обладнанням та сировиною, передбаченими в технологічній карті розробника.
Отриманий продукт відповідає визначеним розробником фізико-хімічним характеристикам засобу вогнезахисту реактивного типу IFR-S та може бути використаним для вогнезахисної обробки металевих конструкцій.
5. **Термін впровадження:** грудень 2025 р.
6. **Зауваження і пропозиції:** немає.

Відповідальний за впровадження
Керівник науково-дослідної лабораторії
ТОВ «Ковлар Груп»

Наталія ПОЦЕЛЯК

ДОДАТОК В
Звіт з оцінки вогнезахисної ефективності

ЗАТВЕРЖЕНО
Директор ТОВ «Ковлар Груп»
_____ Калафат К.В.
«24» червня 2025 р.



ЗВІТ З ОЦІНКИ ВОГНЕЗАХИСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
вогнезахисного покриття IFR-S

2025

Виконавець: Товариство з обмеженою відповідальністю «Ковлар Груп»
Україна, 04116, м. Київ, вул. Старокиївська, 10 літера Г, а/с 27,
тел.: +38 044 331 24 30,
E-mail info@kovlargroup.com.

Замовник: Вахітов Раміль Азатович

Об'єкт оцінки: Вогнезахисний покрив для сталевих конструкцій IFR-S.

Мета випробувань: Метою випробувань є визначення граничного стану за ознакою втрати несучої здатності сталевій колоні двотаврового перерізу зі зведеною товщиною 5,4 мм, на яку нанесено вогнезахисний покрив для сталевих конструкцій IFR-S.

Загальний опис методу оцінки: Граничний стан за ознакою втрати несучої здатності сталевих колон з вогнезахисним покриттям визначається за ДСТУ EN 1365-4:2023 «Випробування несучих будівельних конструкцій на вогнестійкість. Частина 4. Колони».

Граничним станом за ознакою втрати несучої здатності є досягнення температури 500 °С сталевій колоні, за умови вогневого впливу при стандартному температурному режимі згідно з ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT) у випробувальній печі.

Під час проведення випробувань надлишковий тиск у печі на відстані 100 мм від поверхні зразка, повинен складати 10^{+3} Па після 5 хв. випробувань.

Зразки для оцінки: Оцінюванню піддавався один зразок сталевій колоні двотаврового перерізу довжиною 1 м зі зведеною товщиною металу 5,4 мм, на якій на висоті 500 мм встановлено три термоелектричних перетворювача (термопар) та нанесено вогнезахисний покрив IFR-S.

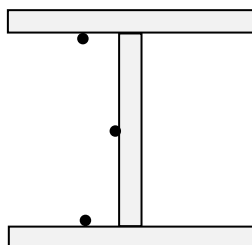


Рис.1 Схема встановлення термопар на зразку

Перед нанесенням вогнезахисного покриття IFR-S колона була покрита ґрунтом ГФ-021 завтовшки 0,08 мм (за даними Замовника).

Середнє значення товщини вогнезахисного покриття IFR-S в сухому стані без врахування товщини ґрунта склало $(7,75 \pm 0,56)$ мм.

Умови проведення оцінки вогнестійкості:

Таблиця 1

Дата	17.06.2025 г.
Температура повітря, °С	17
Відносна вологість повітря, %	64

Засоби оцінки вогнестійкості:

- Малогабаритна випробувальна піч з підтримкою стандартного температурного режиму згідно з ДСТУ EN 1363-1:2023.
- Перетворювачі термоелектричні (термопари) типу К - 0,7 мм та 1,2 мм.
- Тягонапоромір ТНЖ-Н
- Автоматизований вимірювально-реєструючий комплекс АВРК «TEST-1».
- Товщиномір покриттів ТП-1 з датчиком М-12.
- Гігрометр ВІТ-1.



Рисунок 2. Зовнішній вигляд зразка до та після випробувань

Таблиця 2 – Температура в печі

Час, хв	Т.п. 1	Т.п. 2	Т.п. 3	Т.п. 4	Тп1ср	Тст. ном	Тст. мах	Тст. мін
0	25	24	24	26	25	20	50	5
1	365	350	368	395	371	349	402	297
2	439	469	434	456	453	445	511	378
3	529	583	507	554	548	502	578	427
4	571	593	534	560	562	544	625	462
5	605	613	565	620	599	576	663	490
6	647	657	604	649	637	603	694	513
7	649	671	625	624	640	626	720	532
8	665	676	638	692	669	645	742	549
9	673	691	665	650	669	663	762	563
10	675	684	668	688	680	678	780	577
11	702	676	685	710	690	693	793	592
12	681	672	681	705	686	705	804	607
13	718	713	725	728	722	717	814	620
14	700	708	728	719	718	728	823	634
15	741	735	746	746	742	739	831	646
16	751	745	766	767	759	748	838	658
17	760	757	767	785	770	757	844	670
18	735	757	767	741	755	766	850	681
19	750	778	797	790	788	774	855	692
20	779	774	802	785	787	781	859	703
21	776	791	807	813	804	789	864	714
22	804	806	821	831	819	796	867	724
23	800	792	820	783	798	802	870	734
24	813	823	828	834	828	809	873	744
25	797	814	826	832	824	815	876	754
26	811	821	828	819	823	820	878	763
27	807	822	835	807	821	826	880	772
28	810	825	835	824	828	832	881	782
29	821	835	854	823	837	837	883	791
30	839	847	863	860	857	842	884	800
31	833	850	860	838	849	847	888	805
32	841	867	874	858	866	851	893	810
33	852	866	880	867	871	856	897	815
34	878	886	893	864	881	860	901	820
35	872	879	885	878	881	865	904	825
36	875	880	884	843	869	869	908	830
37	868	871	877	866	871	873	912	835
38	877	877	878	856	870	877	915	839
39	877	880	880	866	875	881	918	843

40	877	883	884	862	876	885	922	848
41	882	887	892	874	884	888	925	852
42	891	897	894	870	887	892	928	856
43	887	897	895	884	892	896	931	860
44	900	905	904	889	899	899	933	864
45	902	907	905	901	904	902	936	868
46	909	910	910	898	906	906	939	872
47	900	908	911	885	901	909	941	876
48	916	920	918	907	915	912	944	880
49	911	924	921	894	913	915	946	884
50	925	925	921	924	923	918	949	887
51	922	929	924	910	921	921	951	891
52	925	935	930	914	926	924	953	895
53	933	935	936	925	932	927	955	898
54	937	938	934	913	928	930	958	902
55	941	946	944	918	936	932	960	905
56	935	942	938	920	933	935	962	908
57	930	949	945	924	939	938	964	912
58	943	955	952	938	948	940	965	915
59	956	960	961	938	953	943	967	918
60	945	959	950	934	948	945	969	922
61	961	966	965	952	961	948	972	924
62	955	967	963	952	961	950	974	926
63	959	969	966	957	964	953	976	929
64	966	975	972	954	967	955	979	931
65	969	977	976	965	973	957	981	933
66	970	980	978	966	975	960	984	936
67	972	981	979	974	978	962	986	938
68	969	981	979	969	976	964	988	940
69	974	985	981	966	977	966	990	942
70	972	986	986	969	980	968	993	944
71	981	988	984	964	979	971	995	946
72	974	988	984	974	982	973	997	948
73	981	990	986	976	984	975	999	950
74	976	990	989	977	985	977	1001	952
75	989	998	991	971	987	979	1003	954
76	992	1002	1000	984	995	981	1005	956
77	993	1006	1004	984	998	983	1007	958
78	984	997	990	981	989	985	1009	960
79	984	997	992	978	989	986	1011	962
80	982	998	992	982	991	988	1013	964
81	980	999	992	975	989	990	1015	965
82	987	1004	997	976	992	992	1017	967

83	987	1000	998	984	994	994	1019	969
84	990	1003	999	983	995	996	1021	971
85	990	1003	998	987	996	997	1022	972
86	999	1010	1004	990	1001	999	1024	974
87	992	1007	1000	989	999	1001	1026	976
88	994	1009	1002	989	1000	1003	1028	978
89	1000	1013	1008	991	1004	1004	1029	979
90	995	1014	1006	992	1004	1006	1031	981
91	998	1015	1010	999	1008	1008	1033	982
92	1005	1020	1014	996	1010	1009	1035	984
93	1009	1018	1012	1000	1010	1011	1036	986
94	1011	1024	1017	1004	1015	1012	1038	987
95	1010	1023	1020	1010	1018	1014	1039	989
96	1012	1024	1020	1008	1017	1016	1041	990
97	1018	1031	1024	1009	1021	1017	1043	992
98	1015	1027	1020	1010	1019	1019	1044	993
99	1013	1028	1022	1012	1021	1020	1046	995
100	1019	1031	1027	1017	1025	1022	1047	996
101	1015	1034	1026	1018	1026	1023	1049	998
102	1018	1036	1032	1014	1027	1025	1050	999
103	1022	1040	1036	1020	1032	1026	1052	1001
104	1025	1041	1037	1023	1034	1028	1053	1002
105	1024	1042	1038	1025	1035	1029	1055	1003
106	1023	1040	1037	1024	1034	1030	1056	1005
107	1028	1047	1043	1027	1039	1032	1058	1006
108	1026	1045	1039	1028	1037	1033	1059	1007
109	1036	1049	1046	1028	1041	1035	1061	1009
110	1034	1047	1044	1032	1041	1036	1062	1010
111	1030	1047	1039	1034	1040	1037	1063	1011
112	1036	1055	1047	1036	1046	1039	1065	1013
113	1036	1057	1048	1044	1050	1040	1066	1014
114	1040	1057	1050	1034	1047	1041	1067	1015
115	1043	1058	1055	1042	1052	1043	1069	1017
116	1038	1057	1048	1043	1049	1044	1070	1018
117	1045	1058	1052	1040	1050	1045	1071	1019
118	1042	1060	1054	1044	1053	1047	1073	1020
119	1051	1064	1058	1043	1055	1048	1074	1022
120	1050	1066	1064	1051	1060	1049	1075	1023
121	1056	1069	1064	1054	1062	1050	1077	1024
122	1053	1066	1060	1052	1059	1052	1078	1025
123	1050	1068	1062	1048	1059	1053	1079	1026
124	1051	1070	1064	1053	1062	1054	1080	1028
125	1053	1074	1063	1050	1062	1055	1082	1029

126	1056	1073	1065	1047	1062	1056	1083	1030
127	1063	1079	1074	1061	1071	1058	1084	1031
128	1058	1073	1068	1056	1066	1059	1085	1032
129	1062	1079	1073	1062	1071	1060	1086	1033
130	1065	1080	1074	1063	1072	1061	1088	1034
131	1060	1080	1073	1059	1071	1062	1089	1036
132	1053	1070	1060	1046	1059	1063	1090	1037
133	1048	1068	1057	1046	1057	1064	1091	1038
134	1055	1071	1060	1051	1061	1066	1092	1039
135	1054	1072	1064	1052	1063	1067	1093	1040
136	1054	1072	1063	1052	1062	1068	1094	1041
137	1056	1073	1062	1054	1063	1069	1096	1042
138	1056	1072	1064	1050	1062	1070	1097	1043
139	1054	1072	1064	1056	1064	1071	1098	1044
140	1061	1077	1068	1058	1068	1072	1099	1045
141	1062	1078	1067	1057	1067	1073	1100	1046
142	1064	1080	1072	1056	1069	1074	1101	1047
143	1066	1081	1072	1061	1071	1075	1102	1048
144	1064	1083	1073	1061	1072	1076	1103	1049
145	1067	1074	1073	1065	1071	1077	1104	1050
146	1067	1074	1076	1064	1071	1078	1105	1051
147	1071	1077	1078	1065	1073	1079	1106	1052
148	1070	1075	1079	1068	1074	1080	1107	1053
149	1072	1075	1078	1070	1074	1081	1108	1054
150	1070	1076	1078	1071	1075	1082	1110	1055
151	1074	1078	1082	1069	1076	1083	1111	1056
152	1072	1078	1080	1071	1076	1084	1112	1057
153	1097	1051	1045	1092	1063	1085	1113	1058
154	1102	1048	1041	1082	1057	1086	1114	1059
155	1097	1054	1045	1087	1062	1087	1115	1060
156	1092	1053	1046	1079	1059	1088	1116	1061
157	1098	1050	1047	1079	1059	1089	1117	1062
158	1102	1056	1049	1087	1064	1090	1117	1063
159	1114	1060	1069	1079	1069	1091	1118	1064
160	1097	1077	1084	1084	1082	1092	1119	1065

Таблица 3 – Температура зразка

Час, хв	T1	T2	T3	Tcp
0	24	24	25	24
1	34	31	35	33
2	48	44	49	47
3	64	60	67	64
4	79	75	83	79

5	92	91	97	93
6	105	102	110	106
7	114	112	120	115
8	124	120	128	124
9	129	127	135	130
10	134	132	140	135
11	139	137	145	140
12	144	142	149	145
13	149	147	155	150
14	154	152	160	155
15	158	156	165	160
16	163	160	170	164
17	169	164	174	169
18	172	169	179	173
19	177	173	183	177
20	182	177	187	182
21	186	182	191	186
22	190	185	196	190
23	193	189	199	194
24	197	192	203	197
25	199	196	206	200
26	202	199	210	204
27	206	203	212	207
28	208	207	216	210
29	212	209	220	213
30	215	212	222	216
31	219	216	226	220
32	221	218	229	223
33	224	222	231	226
34	227	224	234	228
35	229	226	236	230
36	231	229	238	233
37	233	231	241	235
38	235	233	243	237
39	238	235	245	239
40	239	237	247	241
41	241	239	248	243
42	243	241	250	245
43	245	243	252	247
44	246	245	254	248
45	248	247	255	250
46	250	249	257	252
47	252	251	259	254

48	254	253	261	256
49	255	255	262	257
50	257	257	264	259
51	259	259	266	261
52	261	261	267	263
53	262	262	269	265
54	264	264	271	266
55	266	266	273	268
56	268	268	274	270
57	269	270	276	272
58	271	272	278	274
59	273	274	280	276
60	275	276	281	277
61	276	278	283	279
62	278	280	285	281
63	280	282	286	283
64	282	284	288	285
65	284	286	290	286
66	285	288	292	288
67	287	290	293	290
68	289	292	295	292
69	291	294	297	294
70	292	295	298	295
71	294	297	300	297
72	296	299	302	299
73	298	301	304	301
74	299	303	305	303
75	301	305	307	304
76	303	307	309	306
77	305	309	311	308
78	306	311	312	310
79	308	313	314	312
80	310	315	316	314
81	312	317	317	315
82	313	319	319	317
83	315	321	321	319
84	317	323	323	321
85	319	325	324	323
86	321	326	326	324
87	322	328	328	326
88	324	330	330	328
89	326	332	331	330
90	328	334	333	332

91	329	336	335	333
92	331	338	336	335
93	333	340	338	337
94	335	342	340	339
95	336	344	342	341
96	338	346	343	342
97	340	348	345	344
98	342	350	347	346
99	343	352	349	348
100	345	354	350	350
101	347	356	352	352
102	349	358	354	353
103	351	359	355	355
104	352	361	357	357
105	354	363	359	359
106	356	365	361	361
107	358	367	362	362
108	359	369	364	364
109	361	371	366	366
110	363	373	368	368
111	365	375	369	370
112	366	377	371	371
113	368	379	373	373
114	370	381	374	375
115	372	383	376	377
116	373	385	378	379
117	375	387	380	380
118	377	389	381	382
119	379	391	383	384
120	380	392	385	386
121	382	394	386	388
122	384	396	388	390
123	386	398	390	391
124	388	400	392	393
125	389	402	393	395
126	391	404	395	397
127	393	406	397	399
128	395	408	399	400
129	396	410	400	402
130	398	412	402	404
131	400	414	404	406
132	402	416	405	408
133	403	418	407	409

134	405	420	409	411
135	407	422	411	413
136	409	423	412	415
137	410	425	414	417
138	412	427	415	418
139	416	430	421	422
140	421	433	427	427
141	425	436	433	431
142	429	439	439	436
143	434	442	445	440
144	438	445	451	445
145	442	448	457	449
146	447	450	463	453
147	451	453	469	458
148	455	456	475	462
149	460	459	481	467
150	464	462	487	471
151	468	468	491	476
152	472	473	495	480
153	476	479	500	485
154	480	484	504	490
155	484	490	509	494
156	488	496	513	499
157	492	501	517	504
158	496	507	522	508
159	500	512	526	513
160	504	518	531	518

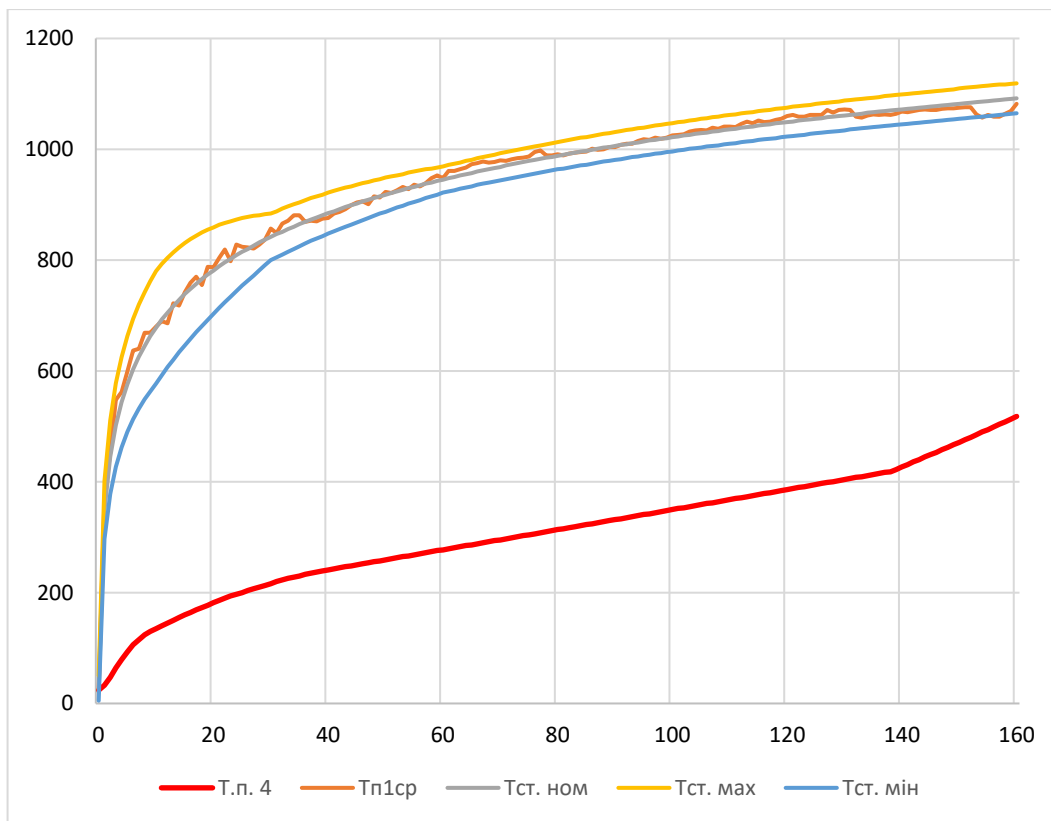


Рис. 2 Температурний режим в печі та середня температура зразка з вогнезахисним покритвом для сталевих конструкцій IFR-S.

Результати оцінки:

Час досягнення середньої температури сталеві колони зі зведеною товщиною металу 5,1 мм, на яку нанесено вогнезахисний покритв IFR-S товщиною 7,75 мм (див. зразки для оцінювання) за умови впливу стандартного температурного режиму згідно з ДСТУ EN 1363-1:2023 становить **156 хвилин**.

Особа, яка підготувала звіт

Керівник відділу з стандартизації,
сертифікації та якості

Добичін О.В.

ДОДАТОК Г

Акт випробувань з нанесення вогнезахисної фарби IFR-S

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «Фасер Інжиніринг»
 Антон ЛУГІНЕЦЬ
 « 9 » грудня 2025 р.

АКТ

випробувань з нанесення вогнезахисної фарби IFR-S на поверхню сталевих конструкцій «15» листопада - «2» грудня 2025 р

Об'єкт випробувань: три зразка вогнезахисної фарби IFR-S з різними показниками динамічної в'язкості у кількості 150 кг. Фарба надана Замовником в особі Вахітова Раміля Азатовича у 6 металевих відрах по 25 кг кожне.

Замовник: Київський національний університет технологій та дизайну, вул. Мала Шияновська, 2, Київ, 01011, тел.: 044 256 2975, <https://knutd.edu.ua>.

Характеристика фарби IFR-S за інформацією Замовника:

№	Характеристика	Значення
1	Вміст нелетких речовин у вогнезахисній фарбі, %	71,2
2	Ступінь перетиру вогнезахисної фарби, мкм	40
3	Адгезія вогнезахисного покриття, не більше, бал	1
4	Динамічна в'язкість за Брукфілдом, (20 °С, №7, 30 грм), Па·с	
	IFR-S-1	25
	IFR-S-2	53
	IFR-S-3	71

Умови нанесення: температура 12-14 °С, відносна вологість повітря 76 %, закриті приміщення.

Обладнання для нанесення: фарбувальний агрегат Wagner Control Pro 350 M (Німеччина). Для безповітряного розпилення застосовані наступні параметри обладнання:

тиск на засіб, що подається не менше 180 бар;

внутрішній діаметр шлангів 10 мм;

сопло №219 - 227 (діаметром – 0,019" - 0,027").

З установки безповітряного розпилення видалено всі фільтри тонкого очищення на лінії подачі засобу.

Для вимірювання товщини мокрого шару фарби використовували гребінку Elcometer 25-3000 мкм (Великобританія). Сухий шар покриття вимірювали приладом неруйнівного контролю - товщиноміром Venetech GM100X 1,2-300 мм (Китай).

Результати випробування:

Нанесення фарб на підготовлену для вогнезахисту поверхню виконували за один прохід до утворення максимальної товщини мокрого шару, на якому не спостерігаються провисання, стікання, підтйоки та інші дефекти.

Вимірювання товщин мокрого вогнезахисного покриття здійснювали через кожні 20 см довжини сталеві конструкції, Точки вимірювання були розташовані на відстані не менше 30 мм від краю конструкції. При цьому мінімальна кількість вимірювань складала не менше 50. Середне-арифметичне значення усіх вимірних товщин мокрого шару наведено у таблиці (D₁, мм).

Кінцевий контроль якості покриття здійснювали через 15 діб після нанесення фарб візуальним контролем. При огляді захищеної конструкції визначали наявність недоліків вогнезахисної обробки - тріщини, відшарування, здуття, кратероутворення тощо. Контроль товщини сухого покриття проводили приладом неруйнівного контролю з мінімальною кількістю вимірювань не менше 50. Середне-арифметичне значення усіх вимірних товщин сухого шару наведено у таблиці (D₂, мм).

Фарба	D ₁ , мм	D ₂ , мм	Якість покриття	Час висихання, годин	
				до ступеня 3	повне висихання
IFR-S-1	0,98±0,08	0,71±0,06	без дефектів	6	20
IFR-S-2	1,61±0,14	1,12±0,08	без дефектів	10	28
IFR-S-3	2,14±0,18	1,48±0,11	без дефектів	14	38

1. Максимальна середня товщина мокрого шару покриття FS-120 за один прохід складає 2,14 мм.
2. Час висихання шару з максимальною товщиною покриття FS-120 в умовах нанесення при товщині мокрого шару 2,14 мм складає 38 годин.
3. При нанесенні фарби FS-120 на вертикальні колони зі зведеною товщиною більше 5,4 мм технологічні втрати складають не більше 15%.

Висновки: Фарба FS-120 є високотехнологічною при нанесенні, утворює щільний покрив без підтйоків, стікань, кратероутворення. Реологічні властивості матеріалу дозволяють наносити фарбу шаром підвищеної товщини, який складає 2,14 мм. За попередніми оцінками це дозволить скоротити витрати на роботи з нанесення приблизно на 100 %.

Відповідальний за випробування
гол. інженер



Павло ЧЕРЕПЕНЧУК

«2» грудня 2025 р.

ДОДАТОК Д

Звіт з досліджень стійкості до зовнішніх впливів

ЗВІТ

З ДОСЛІДЖЕНЬ СТІЙКОСТІ ДО ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИВУ ДЛЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ IFR-S

м. Київ, 22.12.2025 р.

1. Підстави для проведення досліджень: договір про співробітництво №3 від 21.01.2025 р. між Київським національним університетом технологій та дизайну і ТОВ «Інтердез».

2. Замовник: Київський національний університет технологій та дизайну

3. Мета досліджень: вплив зовнішніх чинників в умовах типу Z2, що встановлені у таблиці В.4 Додатку В ДСТУ EN 16623:2015, на зразки вогнезахисного покриття IFR-S та подальшої його класифікації за довговічністю згідно розділу 7 ДСТУ EN 16623:2015.

4. Дослідження проводились 29.01.2025 - 26.02.2025

5. Зразки надані: Замовником (акт передачі зразків № 1 від 27.01.2025)

6. Результати візуального обстеження перед проведенням досліджень: якісний зовнішній вигляд, без дефектів та механічних пошкоджень, допускається для проведення досліджень.

7. Тип та основні характеристики обладнання:

- Камера кліматична Nema TV-100
- Гігрометр психрометричний ВІТ-1
- Барометр-анероїд БАММ-1
- Термометр скляний (-80...+60°C) ТН-8М

8. Нормативні посилання: перелік нормативних документів, на які є посилання у цьому звіті, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік нормативних документів

Позначення нормативних документів	Назви нормативних документів
ДСТУ EN 16623:2015 (EN 16623:2015, IDT)	Лаки та фарби. Реакційні покриття для вогнезахисту металевих поверхонь. Визначення, вимоги, властивості та маркування
ДСТУ EN 16623:2015 (EN 16623:2015, IDT)	Лаки та фарби. Реакційні покриття для вогнезахисту металевих поверхонь. Визначення, вимоги, властивості та маркування
ДСТУ EN 13190:2018 (EN 13190:2001, IDT)	Термометри зі шкалою

9. Проведення досліджень.

9.1. Вплив зовнішніх чинників.

9.1.1. Для впливу зовнішніми чинниками типу Z2 (таблиця В.4 Додатку В ДСТУ EN 16623:2015) Замовник надав Виконавцю два зразки сталевих пластин 200x300x5 мм з лакофарбовою системою:

– пофарбовані ґрунтом ГФ-021 (середня товщина 80 мкм) сталеві пластини з вогнезахисним покритвом IFR-S з середньою товщиною 1,1 мм. Товщини шарів лакофарбової системи наведено за даними Замовника.

9.1.2. Загальний вигляд дослідних зразків наведено на рис. 1.



Рисунок 1 – Загальний вигляд дослідних зразків вогнезахисного покритву

9.1.3. Умови проведення впливу:

Дослідні зразки розміщуються вертикально.

Дослідження проводились згідно з умовами впливу для типу Z2 Додатку В ДСТУ EN 16623:2015 та наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Умови впливу для типу Z2 дослідних зразків.

Кількість циклів	Проміжок часу		
	4 год	16 год	4 год
21	Температура: (23 ± 3) °C; Вологість: (80 ± 5) %	Температура: (40 ± 3) °C; Вологість: (50 ± 5) %	Температура: (5 ± 3) °C; Вологість: (50 ± 5) %

9.1.4. Результати досліджень впливу зовнішніх чинників.

За результатами досліджень зразків вогнезахисного покриття IFR-S відповідно до ДСТУ EN 16623:2015 таблиці В.4 Додатку В (умови впливу для типу Z2) проведено візуальне обстеження зразків: зразки мають якісний зовнішній вид, без дефектів та пошкоджень, колір покриття не змінився.

Після досліджень щодо впливу зовнішніх чинників на зразки вогнезахисного покриття IFR-S згідно умов таблиці В.4 Додатку В (умови впливу для типу Z2) ДСТУ EN 16623:2015, зразки передані для подальших випробувань згідно з Додатком С ДСТУ EN 16623:2015.

9.2. Проведення вогневих випробувань

9.2.1. Після впливу зовнішніх чинників згідно умов таблиці В.4. Додатку В ДСТУ EN 16623:2015 (умови впливу типу Z2) зразки вогнезахисного покриття IFR-S передані для подальших вогневих випробувань у дослідну лабораторію ТОВ «Ковлар Груп» (акт передачі зразків №б/н від 19.02.25 р.) з метою визначення збереження вогнезахисної ефективності.

9.2.2. За результатами вогневих випробувань згідно з Додатком С ДСТУ EN 16623:2015 (Звіт з оцінки вогнезахисної ефективності від 20.02.25 р. дослідної лабораторії ТОВ «Ковлар Груп») встановлено, що час досягнення температури 500 °С на зразках, які не піддавались та піддавались впливу зовнішніх чинників типу Z2 становить:

- до впливу зовнішніх чинників: зразок №1 – 34 хв., зразок №2 – 35 хв;
- після впливу зовнішніх чинників: зразок №3 – 34 хв., зразок №4 – 36 хв;

9.2.3. Згідно з п.5.3.2 (а) та п.5.3.2 (б) ДСТУ EN 16623:2015 час досягнення температури на поверхні сталевих пластин з системою лакофарбового покриття (див. п.9.1.1), які піддавались впливу зовнішніх чинників типу Z2, не менше за 85% (кожен окремий результат не менше за 80%) від середнього проміжку часу впливу пластин, які не піддавались впливу, у зв'язку з чим критерій відповідності щодо впливу зовнішніх чинників типу Z2 згідно умов таблиці В.4 Додатку В ДСТУ EN 16623:2015 вважається виконаним.

10. Висновки

10.1. Згідно з результатами досліджень система лакофарбового покриття, яка складається з ґрунта ГФ-021 середньої товщиною 80 мкм та нанесеним поверх нього вогнезахисним покритвом IFR-S з середньою товщиною 1,1 мм (див. п. 9.1.1) класифікована як стійка до впливу зовнішніх чинників типу Z2 відповідно до ДСТУ EN 16623:2015.

10.2. Згідно з п. 5.3.1, п. 5.3.2, розділу 7 та таблиці В.4 Додатку В ДСТУ EN 16623:2015 термін служби системи лакофарбового покриття, яка складається з ґрунта ГФ-021 середньої товщиною 80 мкм та нанесеним поверх нього вогнезахисним покритвом IFR-S з середньою товщиною 1,1 мм (див. п. 9.1.1) залежить від умов

експлуатації, належного використання, відповідного догляду та становить від 10 до 25 років.

Завідуючий хіміко-мікробіологічною лабораторією

ТОВ «Інтердез», к.т.н., доцент

Качан Р.В.



ДОДАТОК Є
Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження
в дослідження ІнФОВ НАН України

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В. о. заступника директора з наукової роботи
 Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії
 ім. Л. М. Литвиненка НАН України,

доктор філософії з хімічних технологій та інженерії

Вадим ЛІСОВИЙ

«24» березня 2026 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії
 Вахітова Раміля Азатовича
 в діяльність Інституту фізико-органічної хімії і
 вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України

1. **Назва пропозиції для впровадження:** методика дослідження засобів пасивного вогнезахисту за алгоритмом для прогнозування вогнезахисної ефективності інтумесцентного покриття.
2. **Установа, автор:** Київський національний університет технологій та дизайну, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, 01011 Київ, вул. Мала Шияновська, 2; аспірант Вахітов Р.А.
3. **Джерело інформації:** Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., & Drizhd, V. (2024). Improving the fire-retardant performance of industrial reactive coatings for steel building structures. Heliyon, 10(14), e34729. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34729>
4. **Впроваджено:** в умовах наукової лабораторії відтворено алгоритм лабораторних досліджень для прогнозування вогнезахисної ефективності інтумесцентного покриття.
5. **Термін впровадження:** I квартал 2026 року.
6. **Зауваження і пропозиції:** немає.

Відповідальний за впровадження

В. о. завідувача відділу досліджень
 нуклеофільних реакцій ІнФОВ НАН України,
 канд. хім. наук, с. н. с.



Надія ТАРАН


ДОДАТОК Ж
Акт впровадження результатів дисертаційного дослідження
в освітньо-науковому процесі кафедри промислової фармації КНУТД

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор з наукової та інноваційної діяльності
 Київського національного університету
 технологій та дизайну
 проф.  Любова ГАНУШАК-ЄФІМЕНКО
 «17» 05 2026 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
 результатів дисертаційного дослідження
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії
 Вахітова Раміля Азатовича
 в освітньо-науковому процесі кафедри промислової фармації
 Київського національного університету технологій та дизайну

1. **Назва пропозиції для впровадження:** методика модифікації реологічних властивостей полімерних композицій естерами целюлози, наноглинами та гідрофобно модифікованими етоксильованими уретанами.
2. **Установа, автор:** Київський національний університет технологій та дизайну, кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження, 01011 Київ, вул. Мала Шияновська, 2; аспірант Вахітов Р.А.
3. **Джерело інформації:**
 - Vakhitova, L. M., Taran, N. A., Bessarabov, V. I., Vakhitov, R. A., Rayenko, G. F., Popov, A. F. (2023). Rheologically improved microemulsion for deactivation of simulants of blister and nerve agents. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 6, 44-52.
 - Vakhitova, L., Drizhd, V., Kalafat, K., Vakhitov, R., Taran, N., & Bessarabov, V. (2025). Modeling the rheology of commercial reactive fire-retardant coating materials for steel. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(84), 6-11.
4. **Впроваджено:** в освітньо-науковий процес підготовки фахівців за спеціальністю G1 Хімічні технології та інженерія за освітньо-професійними програмами «Інноваційна фармацевтика» та «Європейська косметевтика» на кафедрі промислової фармації КНУТД. Використовуються у лекційних матеріалах з дисципліни «Полімерні матеріали у фармації» для здобувачів вищої освіти КНУТД.
5. **Термін впровадження:** I квартал 2026 року.
6. **Зауваження і пропозиції:** немає.

Відповідальний за впровадження:
 Т.в.о. завідувача кафедри промислової фармації
 д-р техн. наук, професор
 «17»  2026 р.

Олена ІЩЕНКО