

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Стилик Ігор Геннадійович**

УДК 614.842.616

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА**  
**ОСНОВІ ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ ПОЛІМЕРНИХ СПОЛУК**

Спеціальність – 261 «Пожежна безпека»

Галузь знань – 26 «Цивільна безпека»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 І. Г. Стилик

Науковий керівник: **Жартовський Сергій Володимирович**  
доктор технічних наук, ст. наук. співробітник

Черкаси 2026

## АНОТАЦІЯ

*Стилик І.Г.* Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2026.

### **Зміст анотації:**

Актуальність теми дослідження. Одним із головних напрямів підвищення ефективності водних вогнегасних засобів є удосконалення їх фізико-хімічних властивостей в контексті виконання завдань пасивного та активного протипожежного захисту об'єктів. Суттєвим недоліком води як основної вогнегасної речовини є низький коефіцієнт її корисного використання. Високий поверхневий натяг, недостатня змочувальна здатність призводять до швидкого стікання великої кількості води з поверхонь горючих матеріалів, внаслідок чого вона втрачається в процесі гасіння пожежі. Покращення властивостей води можливо досягти через додавання модифікаторів, що змінюють її поверхневий натяг, змочувальну здатність, в'язкість, дисперсність крапель, та/або введення інгібіторів та формування пінних розчинів (зокрема за допомогою систем примусового подавання додаткового повітря).

Важливим напрямком посилення вогнегасних властивостей води є їх модифікування полімерними гелеутворювальними сполуками. Вони відзначаються простотою застосування, забезпечують економію витрат водних вогнегасних речовин завдяки підвищеній в'язкості, дають змогу утворювати захисні плівки та регулювати дисперсність робочого середовища. Такі системи можуть поєднувати повний комплекс механізмів припинення горіння – охолодження, ізолювання, флегматизування (розведення) та інгібування, що забезпечує їх ефективність під час гасіння пожеж речовин і матеріалів класу А та В.

Значна кількість зарубіжних та вітчизняних досліджень присвячена проблематиці створення складів та технологій застосування вогнегасних розчинів на

основі полімерних гелеутворювальних сполук. У наукових працях E. Appel, L. Zhang, Y. Huang, P. Sun, Y. Hai, S. Jiang, Z. Dai, C. Huang, Y. Chen, M. Zhong висвітлюються питання впливу добавок на фізико-хімічні властивості розчинів, особливості їх генерації та розповсюдження, а також можливості оптимізації дисперсності та стабільності захисних покриттів. В Україні проблемами підвищення ефективності вогнегасних засобів опікувалися Абрамов Ю.О., Кіреєв О.О., Жартовський С.В., Кодрик А.І., Шналь Т.М., Бабенко О.В., Яценко Л.О., Веселівський Р.Б., Шумченко М.О. Більшість відомих гелеутворювальних систем є двокомпонентними, застосування яких зазвичай передбачає роздільне подавання компонентів гелеутворювальних систем на поверхню горючого матеріалу, що суттєво обмежує можливість використання таких вогнегасних речовин. Створення ж ефективних складів концентратів для водних вогнегасних розчинів на базі полімерних гелеутворювальних сполук, що могли б поєднувати чотири основні механізми припинення горіння, досі розкрито недостатньо. Особливо актуальним залишається визначення оптимальних складів та концентрацій гелевих модифікаторів для генерації таких систем та наукове обґрунтування їх впливу на вогнегасну здатність.

З огляду на зазначене розв'язання науково-технічної задачі щодо підвищення ефективності водних вогнегасних речовин, модифікованих полімерними гелеутворювальними сполуками, та розроблення їх нових ефективних складів є актуальним завданням, що має важливе практичне значення для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів.

**Ідея роботи** полягає у розкритті закономірностей впливу складів та концентрацій композицій полімерних гелеутворювальних сполук на ефективність створених водних вогнегасних речовин.

**Мета роботи** – виявити закономірності впливу фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинального гелеутворювального поліакрилату на підвищення ефективності водних вогнегасних речовин.

Основні завдання дослідження:

- проаналізувати сучасні підходи до ліквідації пожеж із використанням водних вогнегасних речовин та визначити напрями підвищення їх ефективності внаслідок застосування гелеутворювальних сполук на полімерній основі;

- дослідити фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин, модифікованих полімерними гелеутворювачами, та обґрунтувати вибір компонентів для розроблення гелеутворювальної композиції на основі поліакрилату;

- розробити рецептуру модифікованої вогнегасної речовини на основі гелеутворювального поліакрилату для гасіння пожеж речовин і матеріалів класів А та В, а також для формування вогнезахисних смуг в екосистемах;

- здійснити перевірку достовірності результатів досліджень модифікованої вогнегасної речовини шляхом проведення вогневих експериментальних досліджень із визначення їх вогнегасної здатності під час гасіння пожеж речовин і матеріалів класу А та В, можливості стримування низових пожеж в екосистемах та розробити методичні рекомендації щодо її приготування та застосування.

**Предмет дослідження** – вплив фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинального гелеутворювального поліакрилату у складі водних вогнегасних речовин на процеси займання, розвитку та припинення горіння речовин і матеріалів пожеж класів А та В.

**Об'єкт дослідження** – вогнегасні та вогнезахисні властивості водних вогнегасних речовин на основі полімерних гелеутворювальних сполук.

**Методи дослідження.** Під час роботи застосовано комплексний підхід, який поєднував аналітичні, експериментальні та математичні методи, що дало змогу забезпечити всебічний аналіз та достовірність отриманих даних.

Теоретичний та аналітичний етап. Дослідження розпочалося з аналізу і синтезу наукових праць, монографій та нормативно-технічної документації. Цей етап був критично важливим для вивчення та узагальнення сучасних підходів до створення нових рецептур вогнегасних гелеутворювальних речовин. Також проаналізовано довідкові дані та нормативні документи, що регламентують методи дослідження

властивостей водних, пінних і гелеутворювальних речовин, що дало змогу визначити оптимальні параметри для проведення експериментів надалі.

Математичне моделювання та статистична обробка. Для точного визначення динамічної в'язкості гелеутворювальних речовин застосовано математичне моделювання процесу руху кульки у в'язкому гелевому середовищі, що дало змогу отримати кількісні показники, які були неможливими для точного вимірювання стандартними методами. Усі отримані експериментальні дані оброблено за допомогою методів математичної статистики, зокрема визначення середньоквадратичного відхилення. Також застосовано метод планування експерименту, що допомогло мінімізувати кількість дослідів і забезпечити високу достовірність результатів.

Експериментальні дослідження. Основну частину роботи становили експериментальні дослідження, метою проведення яких було оцінювання фізико-хімічних властивостей розроблених гелеутворювальних вогнегасних речовин. Значну увагу приділено вивченню залежностей цих властивостей від складу, а також впливу різних типів і концентрацій гелеутворювальних сполук та домішок на кінцеві експлуатаційні властивості гелевих вогнегасних речовин.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинаючого гелеутворювального поліакрилату на процеси займання, розвитку та припинення горіння різних речовин і матеріалів, зокрема:

- уперше встановлено закономірність впливу концентрації полімерного водопоглинального гелеутворювача на основі поліакрилату у складі водної вогнегасної речовини на показник адгезії гідрогелю до поверхні деревини, що дає змогу визначити необхідну концентрацію гелеутворювача для забезпечення високої утримувальної здатності вогнегасної речовини на поверхнях твердих горючих матеріалів та підвищити охолодження осередку пожежі;

- встановлено закономірність впливу концентрації полімерного водопоглинального гелеутворювача на основі поліакрилату у складі водної вогнегасної речовини на в'язкість вогнегасного розчину, що забезпечує можливість

регулювання реологічних властивостей вогнегасної речовини залежно від умов пожежогасіння;

- визначено оптимальний склад концентрату нової водної вогнегасної речовини: гелеутворювальний поліакрилат – 28 мас. %; олія рапсова рафінована – 24 мас. %; піноутворювач загального призначення – 4 мас. %; вода – 44 мас.% та запропоновано технологію його створення, яка полягає в тому, що на першому етапі проводиться змішування поліакрилату з рапсовою рафінованою олією до стану однорідної речовини, а на другому – змішування суміші поліакрилату та олії із піноутворювачем та водою.

**Удосконалено:** методику визначення динамічної в'язкості колоїдних розчинів у діапазоні від 0,05 сП до 20000 сП шляхом використання методу вимірювання динамічної в'язкості на основі закону Пуазейля в піддіапазонні в'язкості від 0,05 сП до 1,5 сП, застосування методу вимірювання уявної динамічної в'язкості Стокса в піддіапазонні в'язкості від 1,5 сП до 40 сП та методу вимірювання уявної динамічної в'язкості Стокса з уточненням Ладенбурга в піддіапазонні в'язкості від 40 сП до 20000 сП, що сприяє підвищенню точності оцінювання реологічних характеристик вогнегасних речовин на основі полімерних гелеутворювачів та обґрунтованому вибору їх параметрів для ефективного застосування в умовах пожежогасіння.

**Набуло розвитку:** уявлення про природу комплексної вогнегасної дії модифікованих водних вогнегасних речовин (реалізацію ефектів охолодження, інгібування, флегматизації (розведення), ізоляції) унаслідок введення багатокомпонентних гелевих систем, які, на відміну від традиційних водних вогнегасних / вогнегасних засобів, додатково забезпечують реалізацію пролонгованого вогнегасного / вогнезахисного ефекту, підвищену адгезію до твердих горючих поверхонь та ефективне стримування повторного займання і поширення пожежі.

**Достовірність отриманих результатів та обґрунтованість наукових висновків** зумовлені послідовним і системним характером проведеного дослідження. У роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує аналітичні, експериментальні та розрахункові методи, засновані на принципах наукової доброчесності й точності.

Вихідні дані сформовано за результатами критичного аналізу наукових джерел, теоретичних моделей та експериментальних спостережень.

Отримані результати підтверджено зіставленням теоретичних положень із результатами вогневих випробувань і верифіковано за допомогою сучасного програмного та математичного інструментарію. Збалансованість між експериментом і розрахунками свідчить про коректність застосованих методичних підходів. Виявлені закономірності узгоджуються з відомими науковими даними, що додатково підтверджує їх наукову достовірність.

Основні положення та результати дослідження пройшли апробацію на міжнародних науково-практичних конференціях і опубліковані у вітчизняних та закордонних фахових виданнях, що засвідчує їх наукову та практичну значущість.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практична цінність проведеного дослідження полягає у створенні методичних рекомендацій щодо приготування та застосування нової водної гелеутворювальної вогнегасної речовини, здатної ефективно поєднувати охолоджувальну, ізолювальну та флегматизувальну дію. Зазначені рекомендації апробовані та впроваджені в діяльність ТОВ НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ФАКТОР» у розрізі розширення номенклатури продукції підприємства шляхом інтеграції запропонованих гелеутворювальних компонентів у складі вогнегасних речовин; Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України (надалі – ІНДЦЗ НУЦЗ України) у розрізі використання у науково-дослідному центрі досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту ІНДЦЗ НУЦЗ України запропонованої методики експериментальних досліджень з визначення динамічної в'язкості колоїдних розчинів вогнегасних речовин в діапазоні від 0,05 сП до 20000 сП; Мобільного центру швидкого реагування безпілотних систем ДСНС шляхом апробації технології застосування водної вогнегасної композиції, модифікованої гелеутворювальними полімерними сполуками, із використанням безпілотних літальних апаратів (дронів) на висоті до 70 метрів. Упровадження довело працездатність технологічних рішень, запропонованих у дисертаційній роботі, а також допомогло створити науково-

практичне підґрунтя для можливості їхнього застосування надалі із використанням безпілотних літальних апаратів.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень. Розкрито недоліки використання сучасних вогнегасних речовин під час гасіння пожеж у екосистемах. Обґрунтовано наукову новизну роботи та визначено її практичне значення. Надано узагальнену характеристику змісту дослідження, розкрито основні етапи його виконання. Відображено особистий внесок здобувача в отриманні результатів, наведено відомості про апробацію матеріалів, публікації на тему дослідження, а також структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**У розділі 1** проведено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку створення водних вогнегасних речовин та супутніх технологій, їх застосування як у вітчизняній, так і у світовій практиці. На підставі ретроспективного огляду та критичного осмислення накопичених даних сформульовано ключові напрями удосконалення рецептур та підвищення ефективності застосування вказаних речовин. Значну увагу приділено оптимізації їх властивостей з урахуванням критеріїв ефективності, економічності та екологічності.

Теоретично обґрунтовано, що вогнегасні розчини на основі модифікованих систем мають значні переваги порівняно з традиційними вогнегасними речовинами, зокрема водою. Ці переваги детерміновані суттєвим збільшенням стабільності колоїдно-дисперсних систем і посиленням вогнегасної дії. Реалізація підвищеної ефективності зумовлена комплексною дією на процес горіння, що включає механізми охолодження, ізолювання, флегматизування (розведення) та інгібування полум'я.

Детально розглянуто застосування інноваційних технологій продукування модифікованих вогнегасних розчинів з метою підвищення їхніх експлуатаційних характеристик.

**У розділі 2** здійснено комплексний аналіз фізико-хімічних характеристик водних вогнегасних речовин, модифікованих полімерними гелеутворювальними добавками. Наголошено на вивченні механізмів взаємодії водного середовища з гідрофільними полімерними домішками, які забезпечують підвищення ефективності

гасіння завдяки зміні в'язкісних, тиксотропних і адгезійних параметрів. Обґрунтовано доцільність вибору основних компонентів системи, зокрема полімерів різної природи – поліакрилату, карбоксиметилцелюлози та інших структуроутворювачів.

Розглянуто особливості приготування розчинів і описано технологічні труднощі, пов'язані з рівномірним диспергуванням порошкоподібних компонентів у водній фазі. Запропоновано практичні прийоми, що дають змогу запобігти утворенню агломератів і нерозчинених частинок, забезпечуючи однорідність отриманих систем.

Значну увагу приділено вивченню реологічних властивостей модифікованих складів. Встановлено, що більшість досліджених зразків проявляють виражену тиксотропну поведінку – у разі зростання швидкості зсуву спостерігається зменшення в'язкості, що сприяє ефективному транспортуванню через системи подавання. Після припинення подавання до зони горіння в'язкість розчинів швидко відновлюється, забезпечуючи утворення стабільного покриття та зниження втрат активної речовини. Додатково проаналізовано вплив концентрації полімеру та введення допоміжних компонентів (емульгаторів, стабілізаторів, поверхнево-активних речовин) на реологічну поведінку складів.

Результати досліджень змочуваності та адгезійних властивостей на різних типах поверхонь (металевих, дерев'яних і полімерних) засвідчили суттєве підвищення здатності модифікованих водних систем утримуватись на похилих і вертикальних площинах. Це зумовлено не лише збільшенням в'язкості, а й формуванням стабільної гелевої структури на поверхні матеріалу. Досліджено вплив від уведення полімерних сполук на основі поліакрилату на кратність піноутворення та стійкість пінних композицій.

Отримані результати формують наукове підґрунтя для визначення складів вогнегасних концентратів надалі і дають змогу встановити раціональні співвідношення компонентів залежно від умов експлуатації. Це створює передумови для ефективного застосування таких речовин під час локалізації та гасіння пожеж на об'єктах із різною структурою.

**У розділі 3** викладено методологію розроблення рецептур концентратів для створення ефективних водних вогнегасних речовин з гелеутворювальними властивостями. Основна увага приділена підбору полімерних компонентів, визначенню їх концентрацій, взаємодії з іншими домішками, а також оцінці можливостей введення у промислові й лабораторні умови. Здійснено порівняння рецептур на основі традиційного піноутворювача загального призначення у поєднанні з гелеутворювальними речовинами. Обґрунтовано вибір композицій, у яких досягається баланс між високою в'язкістю, змочуваністю та стабільністю структури.

До складів уведено додаткові модифікувальні агенти: аеросил для регулювання здатності налипання гелю; сорбітанмоноолеат як емульгатор; рапсова олія як випаростабілізувальна добавка. Згідно з аналізом навіть незначні зміни у вмісті полімеру призводять до суттєвих відмінностей у тиксотропних властивостях. Рецептури з гелеутворювальним поліакрилатом у межах від 1,5 % до 2,0 % показали найкращу здатність до формування однорідної маси без грудок, що спрощує їх використання в польових умовах.

Наведено результати вибору співвідношення компонентів залежно від призначення (локалізація пожежі, гасіння рідин тощо). Показано, що ретельно підібрана рецептура концентрату дає змогу створити універсальний засіб, придатний для гасіння пожеж різного класу з мінімальними витратами речовини. Узагальнено практичні рекомендації щодо приготування розчинів у польових та лабораторних умовах.

**У розділі 4** наведено результати експериментальних досліджень з оцінювання ефективності розроблених концентратів водних вогнегасних речовин. Наукова розвідка проводилася в умовах, максимально наближених до реальних пожежонебезпечних ситуацій. Дослідження охоплювали гасіння модельних вогнищ класу А (тверді матеріали, зокрема деревина) та класу В (горючі рідини). Основними критеріями оцінки були час гасіння, інтенсивність подавання, стійкість нанесеного шару, площа дії та наявність повторного займання.

Під час проведення експериментів доведено перевагу гелевих вогнегасних речовин над водою, як за швидкістю локалізації полум'я, так і за тривалістю термоізоляційного ефекту. Найкращі результати продемонстрували рецептури на основі гелеутворювального поліакрилату з додаванням поверхнево-активних речовин, які утворювали стабільну плівку та повністю покривали зону горіння.

Також увагу приділено гасінню вертикальних поверхонь, де ефективність гелевих вогнегасних речовин виявилася особливо високою через їхню здатність утримуватись на матеріалі та поступово випаровуватись. Встановлено, що завдяки підвищеній в'язкості розчинів зменшується стікання речовини, що дає змогу досягти стабільного захисного покриття навіть у разі високих температур. За результатами досліджень зроблено висновок про придатність розроблених засобів для використання в автоматичних системах та переносних модулях пожежогасіння.

Розроблені водні вогнегасні речовини легко сумісні з наявним пожежно-технічним обладнанням, що забезпечує їх універсальність та простоту впровадження.

**Ключові слова:** водні вогнезахисні речовини, водні вогнегасні речовини, вогнезахист, вогнестійкість, математичне моделювання, ефективність гасіння, поширення вогню, гелеутворення, пожежогасіння, полімерні гідрогелі, пожежна безпека, вогнегасні властивості, гідрогель, гелевий піноутворювач, пожежа.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О., Борисов А., Стилик І., Борисова А. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1 (13). С. 24–34. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34).

*Особистий внесок автора.* Взяв участь у формулюванні наукової проблеми, мети та завдань дослідження; виконав аналітичний огляд сучасних методів підвищення ефективності водних вогнегасних речовин; розробив програму та методику експериментальних досліджень; провів лабораторні та натурні дослідження; здійснив аналіз та узагальнення експериментальних даних; оформив

таблиці та графічні матеріали; брав участь у редагуванні та погодженні остаточного варіанту статті перед поданням до друку.

2. Кодрик А., Тітенко О., Борисов А., Мороз О., Тимошенко О., **Стилик І.** Можливості використання полімерних гелевих розчинів при гасіння сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 122–133. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).122-133](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).122-133).

*Особистий внесок автора.* Виконав детальний аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел щодо методів гасіння пожеж на сміттєзвалищах; приймав участь у розробленні програми та методики експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності полімерних гелевих розчинів; провів серію експериментів з визначення в'язкості гідрогелів та їх впливу на процес просочування в пористих середовищах; здійснив обробку та узагальнення результатів експериментальних досліджень; підготував текстові розділи статті, зокрема опис методів дослідження, експериментальної частини та висновків; брав участь у редагуванні остаточного варіанту рукопису.

3. **Стилик І.**, Кодрик А., Борисов А., Тітенко О., Куценко М. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламідів для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 75–81. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81).

*Особистий внесок автора.* Провів аналітичний огляд наукових публікацій і технічних рішень, що стосуються створення загороджувальних смуг з використанням полімерних гелеутворювачів. Провів заплановані експериментальні дослідження, зокрема дослідження адгезійних властивостей полімерних гелів. Приймав участь в аналізі, узагальненні та інтерпретації отриманих даних. Підготував окремі розділи рукопису, у тому числі опис методології та результатів досліджень.

4. **Стилик І.**, Пономаренко Р., Кодрик А., Тітенко О., Борисов А., Добростан О. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі

полімерів поліакрилату. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 65–78. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1\(19\).65-78](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1(19).65-78).

*Особистий внесок автора.* Здійснив постановку наукової проблеми, визначив мету, завдання та методологію дослідження, організував та виконав експериментальні дослідження з визначення впливу концентрації полімерів на фізико-хімічні властивості розчинів (в'язкість, адгезію, стабільність). Прийняв участь у математичному моделюванні процесів і узагальненні отриманих результатів, сформулював висновки та наукові рекомендації щодо створення нових складів водних вогнегасних речовин на основі поліакрилатів.

5. **Стилик І.**, Кодрик А., Куценко М., Бедратюк О. Дослідження вогнегасної здатності водної вогнезахисної речовини на основі полімерів поліакрилату та поліакриламиду. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 2 (20). С. 109–115. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).109-115](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).109-115).

*Особистий внесок автора.* Визначив цілі та задачі досліджень та провів аналіз публікацій за напрямом досліджень. Підготував та якісно провів експериментальні дослідження з встановлення можливості застосування полімермодифікованих вогнезахисних речовин для гасіння вогнищ класу В (трансформаторна олива). Проаналізував отримані дані та зробив відповідні висновки.

#### **Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази «Scopus» та «Web of Science»**

6. Kodryk A., Titenko O., Borysov A., Moroz O., **Stylyk I.** Methods of creating gel fire extinguishing substances based on aluminum hydroxide. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-2gfl22>.

*Особистий внесок автора.* Розробив новий метод одержання гелевої вогнегасної речовини на основі гідроксиду алюмінію з використанням карбонату калію. Шляхом порівняльного аналізу довів суттєві технічні переваги запропонованого методу порівняно з відомим способом створення гелевої речовини на основі карбонату натрію.

7. **Stylyk I.**, Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. The possibilities of using a fire

extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2025. Vol. 438. P. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-5lnF3T>.

*Особистий внесок автора.* Обґрунтував теоретично та експериментально можливість використання вогнегасної речовини на основі водорозчинного полімеру «ЕСОFLOC А-07» для ліквідації пожеж на сміттєзвалищах твердих побутових відходів. Встановив закономірності впливу концентрації гелеутворювальних добавок на в'язкість речовини, що безпосередньо регулює швидкість її випаровування та глибину проникнення в осередок горіння.

### **Публікації, які засвідчують апробацію дисертації**

1. Кодрик А., Стилик І., Борисов А., Тітенко О., Мороз О. Вогнегасні речовини на основі гідроксиду алюмінію. Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (19 травня 2023 року, м. Харків). Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 240–243.

2. Стилик І., Жартовський С., Кодрик А. Обґрунтування можливості застосування вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату для гасіння пожеж у екосистемах. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: колективна монографія за результатами міжнар. наук.-практ. конф. (27 травня 2025 року, м. Київ). Київ: ГО «Асоціація фахівців цивільного захисту». 2026. С. 125-130.

### **ABSTRACT**

Stylyk I. Improving the efficiency of water-based fire extinguishing agents incorporating gel-forming polymer compounds. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 261 "Fire Safety" - National University of Civil Defense of Ukraine, Cherkasy, 2026.

**The content of the abstract:**

**Actuality of theme.** One of the main directions for increasing the effectiveness of water-based fire extinguishing agents is the improvement of their physicochemical properties in the context of performing tasks of passive and active fire protection of objects. The main disadvantage of water, as the primary fire extinguishing agent, is its low utilization coefficient. High surface tension and insufficient wetting ability lead to the rapid runoff of a large amount of water from the surfaces of combustible materials, which as a result does not participate in the fire extinguishing process. Improving the properties of water is possible by adding modifiers that change its surface tension, wetting ability, viscosity, droplet dispersion, and/or by introducing inhibitors and forming foam solutions (especially using systems for forced supply of additional air).

One of the directions for enhancing the fire extinguishing properties of water is their modification with polymer gel-forming compounds. They are characterized by simplicity of use, provide savings in the consumption of water-based fire extinguishing agents due to increased viscosity, allow for the formation of protective films, and enable the regulation of the working medium's dispersion. Such systems can combine a full complex of combustion termination mechanisms — cooling, insulation, phlegmatization (dilution), and inhibition, which ensures their effective action when extinguishing Class A and B fires.

A significant number of foreign and domestic studies are dedicated to the development of formulations and application technologies for fire-extinguishing solutions based on polymer gel-forming compounds. Scientific works by E. Appel, L. Zhang, Y. Huang, P. Sun, Y. Hai, S. Jiang, Z. Dai, C. Huang, Y. Chen, and M. Zhong highlight the influence of additives on the physicochemical properties of solutions, the specifics of their generation and distribution, as well as the possibilities for optimizing the dispersity and stability of protective coatings. In Ukraine, the issues of increasing the efficiency of fire-extinguishing agents have been addressed by Abramov Yu.O., Kireev O.O., Zhartovskiy S.V., Kodryk A.I., Shnal T.M., Babenko O.V., Yashchenko L.O., Veselivskiy R.B., and Shumchenko M.O.

A significant portion of known gel-forming systems are two-component, the application of which usually involves the separate delivery of components onto the surface

of the combustible material. This imposes substantial limitations on the practical use of such fire-extinguishing substances. Furthermore, the creation of effective concentrate formulations for aqueous fire-extinguishing solutions based on polymer gel-forming compounds—capable of combining four primary fire suppression mechanisms—remains insufficiently explored. Determining the optimal compositions and concentrations of gel modifiers for generating such systems, along with providing a scientific justification for their impact on fire-extinguishing capacity, remains particularly relevant.

Given the above, addressing the scientific and technical challenge of increasing the efficiency of aqueous fire-extinguishing agents modified with polymer gel-forming compounds, and developing new effective formulations, is a timely task of significant practical importance for enhancing the fire safety of facilities.

**The Idea of the Work** consists in revealing the regularities of the influence of the compositions and concentrations of polymer gel-forming compounds on the efficiency of the resulting aqueous fire-extinguishing agents.

**The Aim of the Work** is to identify the regularities of the influence of the physicochemical properties of polymer gel-forming compositions based on water-absorbing gel-forming polyacrylate on increasing the efficiency of aqueous fire-extinguishing agents.

**Main Research Objectives:**

- to analyze modern approaches to fire suppression using aqueous fire-extinguishing agents and to identify directions for increasing their efficiency through the use of polymer-based gel-forming compounds;
- to investigate the physicochemical properties of aqueous fire-extinguishing agents modified with polymer gel-formers and to justify the selection of components for creating a polyacrylate-based gel-forming composition;
- to develop a formulation for a modified fire-extinguishing agent based on gel-forming polyacrylate for extinguishing Class A and B fires, as well as for establishing firebreaks in ecosystems;
- to verify the reliability of the research results for the modified fire-extinguishing agent by conducting experimental fire tests to determine their fire-extinguishing capacity during Class A and B fire suppression and their ability to contain low-intensity surface fires

in ecosystems, and to develop methodological recommendations for its preparation and application.

**The Subject of Research** is the influence of the physicochemical properties of polymer gel-forming compositions based on water-absorbing gel-forming polyacrylate within aqueous fire-extinguishing agents on the processes of ignition, development, and termination of combustion of Class A and B substances and materials.

**The Object of Research** includes the fire-extinguishing and fire-retardant properties of aqueous fire-extinguishing agents based on polymer gel-forming compounds.

**Research Methods.** A comprehensive approach was applied, combining analytical, experimental, and mathematical methods, ensuring an all-encompassing analysis and the reliability of the obtained data.

**Theoretical and Analytical Stage:** The research began with the analysis and synthesis of existing scientific works, monographs, and regulatory and technical documentation. This stage was critical for studying and summarizing modern approaches to creating new formulations for fire-extinguishing gel-forming substances. Reference data and regulatory documents governing the methods for studying the properties of water, foam, and gel-forming agents were also analyzed to determine optimal parameters for further experiments.

**Mathematical Modeling and Statistical Processing:** To accurately determine the dynamic viscosity of gel-forming agents, mathematical modeling of a sphere's motion in a viscous gel medium was applied. This allowed for the acquisition of quantitative indicators that were impossible to measure accurately using standard methods. All experimental data were processed using mathematical statistics, including the determination of standard deviation. Experimental design methods were also employed to minimize the number of trials and ensure high reliability of results.

**Experimental Research:** The core of the work involved experimental studies aimed at evaluating the physicochemical properties of the developed gel-forming fire-extinguishing agents. Particular attention was paid to studying the dependencies of these properties on composition, as well as the impact of various types and concentrations of gel-

forming compounds and additives on the final performance characteristics of the gel fire-extinguishing agents.

**The Scientific Novelty** of the dissertation lies in revealing the regularities of the influence of the physicochemical properties of polymer gel-forming compositions based on water-absorbing gel-forming polyacrylate on the processes of ignition, development, and termination of combustion of various substances and materials, whereby:

- for the first time, a regularity has been established regarding the influence of the concentration of a polyacrylate-based water-absorbing polymer gel-former within an aqueous fire-extinguishing agent on the adhesion index of the hydrogel to a wood surface which allows for determining the required concentration of the gel-former to ensure enhanced retention capacity of the fire-extinguishing agent on the surfaces of solid combustible materials and to improve the cooling of the fire source;

- a regularity has been established regarding the influence of the concentration of a polyacrylate-based water-absorbing polymer gel-former within an aqueous fire-extinguishing agent on the viscosity of the fire-extinguishing solution, which is described which ensures the possibility of regulating the rheological properties of the fire-extinguishing agent depending on the firefighting conditions;

- the optimal composition of the concentrate for the new aqueous fire-extinguishing agent has been determined: gel-forming polyacrylate – 28 wt. %; refined rapeseed oil – 24 wt. %; general-purpose foaming agent – 4 wt. %; water – 44 wt. %. A technology for its creation has been proposed, consisting of two stages: first, mixing the polyacrylate with refined rapeseed oil until a homogeneous substance is formed, and second, mixing the polyacrylate-oil mixture with the foaming agent and water.

**The following have been improved:** the methodology for determining the dynamic viscosity of colloidal solutions in the range from 0.05 cP to 20,000 cP. This was achieved by employing a dynamic viscosity measurement method based on Poiseuille's law for the sub-range of 0.05 cP to 1.5 cP; using the Stokes apparent dynamic viscosity measurement method for the sub-range of 1.5 cP to 40 cP; and utilizing the Stokes method with Ladenburg's correction for the sub-range of 40 cP to 20,000 cP. This allows for increased accuracy in evaluating the rheological characteristics of polymer-based gel-forming fire-

extinguishing agents and ensures a justified selection of their parameters for effective application in firefighting.

**The following have been further developed:** conceptual understandings of the nature of the complex fire-extinguishing action of modified aqueous fire-extinguishing agents (realizing the effects of cooling, inhibition, phlegmatization/dilution, and isolation) through the introduction of multi-component gel systems. Unlike traditional fire-extinguishing agents, these systems additionally provide a prolonged fire-extinguishing/fire-retardant effect, enhanced adhesion to solid combustible surfaces, and effective containment of re-ignition and fire spread.

**The reliability of the results** and the validity of the scientific conclusions are ensured by the consistent and systematic nature of the research. A comprehensive approach was used, combining analytical, experimental, and computational methods based on the principles of scientific integrity and precision. The initial data were formed based on a critical analysis of scientific sources, theoretical models, and experimental observations. The results were confirmed by comparing theoretical propositions with fire test data and verified using modern software and mathematical tools. The consistency between experimental and calculated data indicates the correctness of the methodological approaches.

**Practical Significance of the Results.** The practical value of the conducted research lies in the development of methodological guidelines for the preparation and application of a new aqueous gel-forming fire suppressant, capable of effectively combining cooling, isolating, and phlegmatizing effects.

These recommendations have been tested and implemented in the operations of:

- SCIENTIFIC AND PRODUCTION FIRM "FACTOR" LLC, in terms of expanding the company's product range by integrating the proposed gel-forming components into fire suppressant formulations;
- The Research Institute of Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine (hereinafter – RICP NUCPU), specifically through the use of the proposed experimental methodology for determining the dynamic viscosity of colloidal fire

suppressant solutions (ranging from 0.05 cP to 20,000 cP) at the Institute's Research and Testing Center;

- The SES Mobile Rapid Response Center for Unmanned Systems, by testing the application technology of an aqueous fire-extinguishing composition modified with gel-forming polymer compounds using unmanned aerial vehicles (drones) at altitudes of up to 70 meters.

The implementation has confirmed the efficiency of the technological solutions proposed in the dissertation and established a scientific and practical foundation for their further application using unmanned aerial vehicles.

**In the Introduction**, the relevance of the topic is justified, and the aim, objectives, object, and subject of research are defined. The shortcomings of existing fire-extinguishing agents in ecosystem fires are revealed, and the scientific novelty and practical significance are established.

**In Chapter 1**, an analysis of the current state and trends in the development of aqueous fire-extinguishing agents and related technologies is conducted. Based on a retrospective review, key directions for improving formulations and increasing application efficiency are formulated, with a focus on efficiency, cost-effectiveness, and environmental safety. It is theoretically substantiated that modified systems offer significant advantages over traditional agents (water) due to increased stability of colloidal-dispersed systems and enhanced fire-extinguishing action.

**In Chapter 2**, a comprehensive analysis of the physicochemical characteristics of modified aqueous fire-extinguishing agents is performed. The focus is on the mechanisms of interaction between the aqueous medium and hydrophilic polymer additives that alter viscosity, thixotropy, and adhesion. The choice of components, such as polyacrylate and carboxymethyl cellulose, is justified. The chapter describes technological challenges in dispersing powders and proposes methods to prevent agglomeration. It was established that the samples exhibit pronounced thixotropic behavior – viscosity decreases with increasing shear rate, facilitating transport through delivery systems, and recovers quickly upon application to ensure a stable coating.

**In Chapter 3**, the methodology for developing concentrate formulations is presented. Additional modifying agents were introduced: aerosil to regulate gel adhesion; sorbitan monooleate as an emulsifier; and rapeseed oil as a vapor-stabilizing additive. Formulations with gel-forming polyacrylate between 1.5% and 2.0% showed the best ability to form a lump-free homogeneous mass. Practical recommendations for preparing solutions in both field and laboratory conditions are summarized.

**In Chapter 4**, the results of experimental studies evaluating the effectiveness of the developed concentrates are provided. Testing was conducted on Class A (solids, wood) and Class B (flammable liquids) model fires. Key criteria included extinguishing time, application intensity, layer stability, and re-ignition prevention. The results confirmed the superiority of gel agents over water in terms of localization speed and thermal insulation duration, especially on vertical surfaces where their high viscosity prevents runoff.

**Keywords:** water-based fire retardants, aqueous fire extinguishing agents, fire protection, fire resistance, mathematical modeling, fire suppression efficiency, fire spread, gelation, firefighting, polymer hydrogels, fire safety, fire extinguishing properties, hydrogel, gel-based foaming agent, fire.

## **LIST OF PUBLISHED WORKS ON THE THEME OF THE DISSERTATION**

### **Articles in scientific and professional publications of Ukraine**

1. Kodryk A., Kovalenko V., Titenko O., Borysov A., **Stylyk I.**, Borysova A. Ways to improve the efficiency of water-based fire extinguishing agents based on liquid glass. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2022. No. 1 (13). P. 24–34. DOI:[https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34).

*Personal contribution of the author.* Participated in formulating the scientific problem, objectives, and research tasks; conducted an analytical review of modern methods for improving the efficiency of water-based fire extinguishing agents; developed the program and methodology of experimental research; carried out laboratory and field tests; performed analysis and generalization of experimental data; prepared tables and graphical

materials; participated in editing and finalizing the manuscript before submission for publication.

2. Kodryk A., Titenko O., Borysov A., Moroz O., Tymoshenko O., **Stylyk I.** Possibilities of using polymeric gel solutions for extinguishing landfills and solid waste disposal sites. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2022. No. 2 (14). P. 122–133. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).122-133](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).122-133).

*Personal contribution of the author.* Performed a detailed analysis of national and international sources on methods of extinguishing landfill fires; participated in developing the program and methodology for experimental research aimed at determining the fire-extinguishing efficiency of polymer gel solutions; conducted a series of experiments to determine the viscosity of hydrogels and their influence on infiltration processes in porous media; processed and summarized experimental results; prepared text sections of the article, including the description of methods, experimental part, and conclusions; participated in editing the final version of the manuscript.

3. **Stylyk I.**, Kodryk A., Borysov A., Titenko O., Kutsenko M. On the Possibility of using solutions based on acrylamide copolymers for the formation of firebreak strips during ecosystem fires. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2024. No. 2 (18). P. 75–81. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81).

*Personal contribution of the author.* Conducted an analytical review of scientific publications and technical solutions related to the creation of firebreak strips using polymeric gel-forming agents; performed planned experimental studies, including research on the adhesive properties of polymer gels; participated in the analysis, generalization, and interpretation of obtained data; prepared separate sections of the manuscript, including descriptions of the research methodology and results.

4. **Stylyk I.**, Ponomarenko R., Kodryk A., Titenko O., Borysov A., Dobrostan O. Investigation of the physicochemical properties of water-based fire extinguishing agents based on polyacrylate polymers. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2025. No. 1 (19). P. 65–78. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1\(19\).65-78](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1(19).65-78).

*Personal contribution of the author.* Formulated the scientific problem, defined the purpose, objectives, and research methodology; organized and conducted experimental

studies to determine the effect of polymer concentration on the physicochemical properties of solutions (viscosity, adhesion, stability); participated in mathematical modeling of processes and summarization of the obtained results; formulated conclusions and scientific recommendations for the development of new compositions of water-based fire extinguishing agents based on polyacrylates.

5. Stylyk I., Kodryk A., Kutsenko M., Bedratiuk O. Research of fire extinguishing ability of water-based fire retardant based on polyacrylate and polyacrylamide polymers. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*. 2025. № 2 (20). P. 109–115. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).109-115](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).109-115).

*Author's personal contribution:* Defined the goals and objectives of the research and performed an analysis of publications in the direction of research. Prepared and qualitatively conducted experimental studies to establish the possibility of using polymer-modified fire retardants for extinguishing Class B fires (transformer oil). Analyzed the obtained data and made relevant conclusions.

### **Publications in scientific journals indexed in Scopus and Web of Science databases:**

1. Kodryk A., Titenko O., Borysov A., Moroz O., **Stylyk I.** Methods of creating gel fire extinguishing substances based on aluminum hydroxide. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-2gfl22>.

*Author's personal contribution.* Developed a novel method for obtaining a gel fire-extinguishing substance based on aluminum hydroxide using potassium carbonate. Through comparative analysis, proved the significant technical advantages of the proposed method in comparison with the well-known method of creating a gel substance based on sodium carbonate.

2. **Stylyk I.**, Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2025. Vol. 438. P. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-5lnF3T>.

*Author's personal contribution.* Theoretically and experimentally substantiated the

feasibility of using a fire-extinguishing substance based on the water-soluble polymer "ECOFLOC A-07" to eliminate fires at municipal solid waste landfills. Established the relationships between the concentration of gel-forming additives and the substance's viscosity, which directly regulates its evaporation rate and penetration depth into the center of the fire.

**Materials of scientific and practical conferences certifying the approval of the dissertation:**

1. Kodryk A., **Stylyk I.**, Borysov A., Titenko O., Moroz O. Fire extinguishing agents based on aluminum hydroxide. In: Problems of Emergency Situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (May, 19<sup>th</sup> 2023, city of Kharkiv). Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine. 2023. P. 240–243.

2. **Stylyk I.**, Zhartovskyi S., Kodryk A. Justification of the possibility of using fire extinguishing agents based on polyacrylate polymers for extinguishing fires in ecosystems. In: Current Problems and Innovative Technologies in the Field of Civil Protection and Environmental Safety for the Post-War Reconstruction of Ukraine: collective monograph based on the results of the international scientific and practical conference (May, 27<sup>th</sup> 2025, city of Kyiv). Kyiv: NGO «Association of Civil Protection Specialists». 2026. P. 125–130.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ РЕЦЕПТУР ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ВІТЧИЗНЯНІЙ ТА СВІТОВІЙ ПРАКТИЦІ.....	36
1.1. Аналіз практики застосування водних вогнегасних речовин.....	36
1.2. Аналіз механізмів взаємодії водних вогнегасних речовин з вогнем.....	40
1.3. Перспективні напрямки покращення рецептур водних вогнегасних речовин .....	50
1.4. Висновки до розділу.....	71
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ ПОЛІАКРИЛАТУ НАТРІЮ.....	73
2.1. Визначення компонентів рецептури водної вогнегасної речовини .....	73
2.2. Методи проведення досліджень із визначення випаровуваності, здатності до прилипання, в'язкості та взаємодії із різними компонентами.....	75
2.3. Висновки до розділу.....	108
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ВИХІДНОГО СКЛАДУ КОНЦЕНТРАТУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РОБОЧИХ РОЗЧИНІВ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН.....	109
3.1. Концентрат на основі водопоглинаючого нерозчинного поліакрилату.....	109
3.2. Планування факторного експерименту з метою визначення оптимального складу концентрату.....	118
3.3. Висновки за розділом.....	132
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВОГНЕВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКАЦІЙ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН.....	134

4.1. Програма та методики експериментальних вогневих досліджень.....	134
4.2. Гасіння модельних вогнищ класу А .....	139
4.3. Гасіння модельних вогнищ класу В .....	143
4.4. Дослідження можливості створення вогнеперешкоджувальних смуг в екосистемах.....	148
4.5. Рекомендації щодо приготування та застосування розробленої водної вогнегасної речовини.....	151
4.6. Оцінка економічного ефекту від застосування модифікованої водної вогнегасної речовини .....	153
4.7. Висновки за розділом.....	155
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	156
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	169
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	173
ДОДАТОК В Результати експериментальних досліджень, проведених з рецептурами концентратів та робочих розчинів на основі поліакрилату натрію	177
ДОДАТОК Г Протоколи вогневих досліджень.....	181

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ**

ВВР – водна вогнегасна речовина;

КВ – коефіцієнт використання;

ПАР – поверхнево-активна речовина;

ТГМ – твердий горючий матеріал;

ГЛБ – гідрофільний-ліпофільний баланс;

КМЦ – натрієва сіль карбоксиметилцелюлози;

ТПК – термопластичні крохмалі;

ПА – поліакрилат натрію;

ПАА – поліакриламід;

Span-80 – сорбітанмоноолеат;

ПФЕ – повнофакторний експеримент;

ОЦКП – ортогональний центрально-композиційний план;

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження**

Головними напрямками підвищення вогнегасної здатності води доцільно вважати зниження поверхневого натягу вогнегасного розчину, підвищення змочувальної здатності та в'язкості води шляхом уведення відповідних добавок, отримання оптимальної дисперсності краплин, додавання інгібіторів, утворення пінних розчинів за допомогою систем примусового подавання додаткового повітря.

Порівняно з водою вогнегасні розчини на основі модифікованих гелевих систем нового покоління мають ряд переваг, що полягають у простоті їх застосування, суттєвому зменшенні витрат водних вогнегасних речовин унаслідок підвищення в'язкості розчинів та можливості утворення захисних плівок і регулювання їх дисперсності.

Робота спрямована на розв'язання науково-технічної задачі щодо підвищення ефективності гасіння пожеж класу А та В через створення та застосування нових концентратів водних вогнегасних розчинів полімерних гелеутворювальних сполук, властивості яких дають змогу реалізовувати комплекс факторів припинення горіння, а саме – охолодження, розведення водяною парою, ізолювання та інгібування.

Розроблення складів та концентрацій таких модифікаторів у водному розчині, удосконалення обладнання з генерування та дослідження їх впливу на вогнегасну здатність розчину, вибір технічних параметрів способу отримання таких концентратів вогнегасних речовин є актуальним питанням та потребує наукового дослідження.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертація виконана згідно з основними напрямками наукової діяльності Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України в рамках замовлення Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту на науково-дослідні роботи «Розроблення нових рецептур концентратів водної вогнегасної речовини з підвищеною вогнегасною здатністю шляхом їх модифікації новітніми гелеутворюючими речовинами та технології їх отримання і подавання в залежності

від напрямку подальшого використання під час гасіння пожежі» (ДР № 0123U102128) [1], де дисертаційне дослідження є складовою науково-дослідної роботи.

**Метою роботи** є виявлення закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинального гелеутворювального поліакрилату на підвищення ефективності водних вогнегасних речовин.

**Задачі дослідження:**

1. Проаналізувати сучасні підходи до ліквідації пожеж із використанням водних вогнегасних речовин та визначити напрями підвищення їх ефективності внаслідок застосування гелеутворювальних сполук на полімерній основі.

2. Дослідити фізико-хімічні властивості водних вогнегасних речовин, модифікованих полімерними гелеутворювачами, та обґрунтувати вибір компонентів для розроблення гелеутворювальної композиції на основі поліакрилату.

3. Розробити рецептуру модифікованої вогнегасної речовини на основі гелеутворювального поліакрилату для гасіння пожеж речовин і матеріалів класів А та В, а також для формування вогнезахисних смуг в екосистемах.

4. Здійснити перевірку достовірності результатів досліджень модифікованої вогнегасної речовини шляхом проведення вогневих експериментальних досліджень із визначення їх вогнегасної здатності під час гасіння пожеж речовин і матеріалів класу А та В, можливості стримування низових пожеж в екосистемах та розробити методичні рекомендації щодо її приготування та застосування.

**Предмет дослідження** – вплив фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинального гелеутворювального поліакрилату у складі водних вогнегасних речовин на процеси займання, розвитку та припинення горіння речовин і матеріалів пожеж класів А та В.

**Об'єкт дослідження** – вогнегасні та вогнезахисні властивості водних вогнегасних речовин на основі полімерних гелеутворювальних сполук.

**Методи дослідження.** Під час роботи застосовано комплексний підхід, який поєднував аналітичні, експериментальні та математичні методи, що дало змогу забезпечити всебічний аналіз та достовірність отриманих даних.

Теоретичний та аналітичний етап. Дослідження розпочалося з аналізу і синтезу наукових праць, монографій та нормативно-технічної документації. Цей етап був критично важливим для вивчення та узагальнення сучасних підходів до створення нових рецептур вогнегасних гелеутворювальних речовин. Також проаналізовано довідкові дані та нормативні документи, що регламентують методи дослідження властивостей водних, пінних і гелеутворювальних речовин, що дало змогу визначити оптимальні параметри для проведення експериментів надалі.

Математичне моделювання та статистична обробка. Для точного визначення динамічної в'язкості гелеутворювальних речовин застосовано математичне моделювання процесу руху кульки у в'язкому гелевому середовищі, що дало змогу отримати кількісні показники, які були неможливими для точного вимірювання стандартними методами. Усі отримані експериментальні дані оброблено за допомогою методів математичної статистики, зокрема визначення середньоквадратичного відхилення. Також застосовано метод планування експерименту, що допомогло мінімізувати кількість дослідів і забезпечити високу достовірність результатів.

Експериментальні дослідження. Основну частину роботи становили експериментальні дослідження, метою проведення яких було оцінювання фізико-хімічних властивостей розроблених гелеутворювальних вогнегасних речовин. Значну увагу приділено вивченню залежностей цих властивостей від складу, а також впливу різних типів і концентрацій гелеутворювальних сполук та домішок на кінцеві експлуатаційні властивості гелевих вогнегасних речовин.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у розкритті закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинаючого гелеутворювального поліакрилату на процеси займання, розвитку та припинення горіння різних речовин і матеріалів, зокрема:

- уперше встановлено закономірність впливу концентрації полімерного водопоглинального гелеутворювача на основі поліакрилату у складі водної вогнегасної речовини на показник адгезії гідрогелю до поверхні деревини, що описується квадратичною залежністю:

$$\gamma = -0,06p^2 + 1,8p + 2,5, \text{ мкм}$$

де:  $\gamma$  – показник адгезії, мкм;

$p$  – концентрація гелеутворювача в розчині, мас. %.

Зазначене дає змогу визначити необхідну концентрацію гелеутворювача для забезпечення високої утримувальної здатності вогнегасної речовини на поверхнях твердих горючих матеріалів та підвищити охолодження осередку пожежі;

- встановлено закономірність впливу концентрації полімерного водопоглинального гелеутворювача на основі поліакрилату у складі водної вогнегасної речовини на в'язкість вогнегасного розчину, що описується експоненційною залежністю:

$$\mu = 1,75 \cdot \exp(10,394 \cdot p), \text{ сП}$$

де:  $\mu$  – в'язкість вогнегасної речовини, сП;

$p$  – концентрація гелеутворювача в розчин, мас. %.

Це забезпечує можливість регулювання реологічних властивостей вогнегасної речовини залежно від умов пожежогасіння;

- визначено оптимальний склад концентрату нової водної вогнегасної речовини: гелеутворювальний поліакрилат – 28 мас. %; олія рапсова рафінована – 24 мас. %; піноутворювач загального призначення – 4 мас. %; вода – 44 мас.% та запропоновано технологію його створення, яка полягає в тому, що на першому етапі проводиться змішування поліакрилату з рапсовою рафінованою олією до стану однорідної речовини, а на другому – змішування суміші поліакрилату та олії із піноутворювачем та водою.

**Удосконалено** методику визначення динамічної в'язкості колоїдних розчинів у діапазоні від 0,05 сП до 20000 сП шляхом використання методу вимірювання динамічної в'язкості на основі закону Пуазейля в піддіапазонні в'язкості від 0,05 сП до 1,5 сП, застосування методу вимірювання уявної динамічної в'язкості Стокса в піддіапазонні в'язкості від 1,5 сП до 40 сП та методу вимірювання уявної динамічної

в'язкості Стокса з уточненням Ладенбурга в піддіапазонні в'язкості від 40 сП до 20000 сП, що сприяє підвищенню точності оцінювання реологічних характеристик вогнегасних речовин на основі полімерних гелеутворювачів та обґрунтованому вибору їх параметрів для ефективного застосування в умовах пожежогасіння.

**Набуло розвитку:** уявлення про природу комплексної вогнегасної дії модифікованих водних вогнегасних речовин (реалізацію ефектів охолодження, інгібування, флегматизації (розведення), ізоляції) унаслідок введення багатокомпонентних гелевих систем, які, на відміну від традиційних водних вогнегасних / вогнегасних засобів, додатково забезпечують реалізацію пролонгованого вогнегасного / вогнезахисного ефекту, підвищену адгезію до твердих горючих поверхонь та ефективне стримування повторного займання і поширення пожежі.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** зумовлені послідовним і системним характером проведеного дослідження. У роботі застосовано комплексний підхід, що поєднує аналітичні, експериментальні та розрахункові методи, засновані на принципах наукової добросовісності й точності. Вихідні дані сформовано за результатами критичного аналізу наукових джерел, теоретичних моделей та експериментальних спостережень.

Отримані результати підтверджено зіставленням теоретичних положень із результатами вогневих випробувань і верифіковано за допомогою сучасного програмного та математичного інструментарію. Узгодженість між експериментом і розрахунками свідчить про коректність наявних методичних підходів. Виявлені закономірності узгоджуються з відомими науковими даними, що додатково підтверджує їх наукову достовірність.

Основні положення та результати дослідження пройшли апробацію на міжнародних науково-практичних конференціях і опубліковані у вітчизняних і закордонних фахових виданнях, що засвідчує їх наукову та практичну значущість.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Практична цінність проведеного дослідження полягає у створенні методичних рекомендацій щодо приготування та застосування нової водної гелеутворювальної

вогнегасної речовини, здатної ефективно поєднувати охолоджувальну, ізолювальну та флегматизувальну дію. Зазначені рекомендації апробовані та впроваджені в діяльність ТОВ НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА «ФАКТОР» у розрізі розширення номенклатури продукції підприємства шляхом інтеграції запропонованих гелеутворювальних компонентів у склади вогнегасних речовин; Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України (надалі – ІНДЦЗ НУЦЗ України) у розрізі використання у науково-дослідному центрі досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту ІНДЦЗ НУЦЗ України запропонованої методики експериментальних досліджень з визначення динамічної в'язкості колоїдних розчинів вогнегасних речовин в діапазоні від 0,05 сП до 20000 сП; Мобільного центру швидкого реагування безпілотних систем ДСНС шляхом апробації технології застосування водної вогнегасної композиції, модифікованої гелеутворювальними полімерними сполуками, із використанням безпілотних літальних апаратів (дронів) на висоті до 70 метрів. Упровадження довело працездатність технологічних рішень, запропонованих у дисертаційній роботі, а також допомогло створити науково-практичне підґрунтя для можливості їхнього застосування надалі із використанням безпілотних літальних апаратів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати отримано безпосередньо автором, зокрема проведено самостійний аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових джерел, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження.

У роботах, які опубліковано у співавторстві:

- у науковій праці [42] «Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла» здобувач узяв участь у формулюванні наукової проблеми, мети та завдань дослідження; виконав аналітичний огляд сучасних методів підвищення ефективності водних вогнегасних речовин; розробив програму та методику експериментальних досліджень; провів лабораторні та натурні дослідження; здійснив аналіз та узагальнення експериментальних даних; оформив

таблиці та графічні матеріали; брав участь у редагуванні та погодженні остаточного варіанта статті перед наданням до друку;

- у науковій праці [79] «Можливості використання полімерних гелевих розчинів при гасіння сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів» здобувач виконав детальний аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел щодо методів гасіння пожеж на сміттєзвалищах. Брав участь у розробленні програми та методики експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності полімерних гелевих розчинів; провів серію експериментів з визначення в'язкості гідрогелів та їх впливу на процес просочування в пористих середовищах; здійснив обробку та узагальнення результатів експериментальних досліджень; підготував текстові розділи статті, зокрема опис методів дослідження, експериментальної частини та висновків; брав участь у редагуванні остаточного варіанта рукопису;

- у науковій праці [80] «Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату» здобувач здійснив постановку наукової проблеми, визначив мету, завдання та методологію дослідження, організував та виконав експериментальні дослідження з визначення впливу концентрації полімерів на фізико-хімічні властивості розчинів (в'язкість, адгезію, стабільність). Брав участь у математичному моделюванні процесів і узагальненні отриманих результатів, сформулював висновки та наукові рекомендації щодо створення нових складів водних вогнегасних речовин на основі поліакрилатів;

- у науковій праці [81] «Дослідження вогнегасної здатності водної вогнезахисної речовини на основі полімерів поліакрилату та поліакриламід» здобувач визначив цілі та задачі досліджень, провів аналіз публікацій за цим напрямом. Підготував та якісно провів експериментальні розвідки зі встановлення можливості застосування полімермодифікованих вогнезахисних речовин для гасіння вогнищ класу В (трансформаторна олива). Проаналізував отримані дані та зробив відповідні висновки;

- у науковій праці [82] «Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламід для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах» здобувач провів аналітичний огляд наукових публікацій і технічних

рішень, що стосуються створення загороджувальних смуг із використанням полімерних гелеутворювачів. Провів заплановані експериментальні дослідження, зокрема щодо адгезійних властивостей полімерних гелів. Брав участь в аналізуванні, узагальненні та інтерпретації отриманих даних. Підготував окремі розділи рукопису, зокрема опис методології та результатів досліджень.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження представлені, обговорені та схвалені на науково-практичних конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Problems of Emergency Situations» (Черкаси, Національний університет цивільного захисту України, 19 травня 2023 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України» (Київ, ГО «Асоціація фахівців цивільного захисту, 27 травня 2025 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано дев'ять наукових праць, з яких п'ять статей у виданнях, включених МОН України до переліку фахових, зокрема дві статті у наукових журналах, що входять до бази даних Scopus, а також дві тези доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний об'єм дисертації становить 216 сторінок та містить 32 рисунки, 29 таблиць та 93 джерела використаної літератури.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СКЛАДІВ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН І СУПУТНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ЯК У ВІТЧИЗНЯНІЙ, ТАК І У СВІТОВІЙ ПРАКТИЦІ

### 1.1. Аналіз практики застосування водних вогнегасних речовин

Вогнегасні речовини – це речовини, які мають фізико-хімічні властивості, що дає змогу створити умови для припинення горіння і, відповідно, способи впливу на процес горіння [1].

Відомі [1–4] такі способи припинення горіння:

- охолодження вогнища горіння до температури нижче температури займання;
- ізоляція вогнища горіння або зниження вмісту кисню;
- механічний зрив полум'я;
- флегматизування (розведення);
- гальмування швидкості хімічних реакцій у полум'ї (інгібування).

Відповідно до способів припинення горіння вогнегасні речовини підрозділяються на охолоджувальні, ті, які розбавляють, ізолювальні та інгібувальні.

Однак чіткого розділення вогнегасних речовин за цими ознаками не існує, оскільки усі вони мають комбінований вплив (за наявності домінувальної властивості). На сьогодні [3–5] для цілей пожежогасіння використовуються такі вогнегасні речовини: вода, вода з добавками, піна (хімічна, повітряно-механічна та компресійна), вогнегасні порошки, вуглекислий газ.

Найбільше застосування під час гасіння пожеж [2–4] отримали вода та вода з добавками. Основним недоліком водних вогнегасних речовин (надалі – ВВР) є низький коефіцієнт їх використання (надалі – КВ) безпосередньо під час гасіння пожежі. За різними даними [3,5,6] він становить від 5 % до 10 % від загальної кількості поданої на гасіння води. Фактично від 90 % до 95 % води доцільно вважати надмірно пролитою. Крім втрат води, як вогнегасної речовини, це призводить до великих непрямих збитків [1,2]. Це пояснюється фізико-механічними властивостями води, насамперед низькою в'язкістю, яка визначається як здатність чинити опір переміщенню однієї з частин щодо іншої, властивістю до мінімізації площі поверхні,

що зумовлює поверхневий натяг у рідинах, та слабкою змочувальною здатністю у разі контакту з твердою поверхнею за наявності пари, яка характеризує адгезію (прилипання) рідини до поверхні матеріалу гасіння і розтікання по ній.

Також до недоліків води відноситься висока електропровідність, особливо у разі застосування води з добавками, що мають підвищувати її вогнегасні та експлуатаційні властивості.

Слід зауважити, що не можна застосовувати воду для гасіння речовин, які бурхливо реагують із нею з виділенням тепла, горючих, а також токсичних і корозійно-активних газів, під час гасіння нафти, важкокиплячих нафтопродуктів та оливи, оскільки існує ймовірність розбризкування палаючих продуктів. Не можна також використовувати компактні струмені води для гасіння пилю через ризик формування вибухонебезпечного середовища [7–10].

Проте з огляду на наведені недоліки вода на сьогодні є найбільш застосовуваним засобом гасіння пожеж, пов'язаних із горінням різних речовин і матеріалів через її дешевизну та доступність, відносно високу питому теплоємність, високу приховану теплоту випаровування, хімічну інертність щодо більшості речовин і матеріалів та до об'єкта гасіння. Оскільки вода є ефективним охолоджувальним агентом, то вона широко застосовується для захисту від загоряння сусідніх із палаючим об'єктів, охолодження резервуарів із нафтопродуктами під час їх гасіння іншими вогнегасними речовинами.

Для підвищення вогнегасної здатності води до її складу додають органічні добавки, які знижують її поверхневий натяг (піноутворювачі) або підвищують в'язкість води (загусники). Вогнегасну здатність води підвищують добавки неорганічних солей, добавки глини та інших дрібнодисперсних речовин [10–13].

Для підвищення змочувальної (проникаючої) здатності води в неї додають різні змочувачі, які завдяки зниженню поверхневого натягу сприяють підвищенню дисперсності розпиленої води. Системи пожежогасіння тонко розпиленою водою високого тиску (від 5,0 МПа до 14,0 МПа на зрошувачі) дають змогу знизити до 90 % витрати води на гасіння [6–9]. Такі установки здатні гасити пожежі класу В без

застосування будь-яких добавок. Але цей метод ефективно використовується тільки у разі об'ємного гасіння пожеж у приміщеннях та за малої інтенсивності пожежі.

Найбільш ефективним способом подавання води вважається її розпилення під високим тиском з отриманням мікрокрапель діаметром від 10 мкм до 100 мкм [6,7,9].

Водорозчинні полімерні добавки застосовують для підвищення адгезії (прилипання) вогнегасного засобу до поверхні палаючого об'єкта. Підвищення адгезії (прилипання) відбувається і внаслідок використання газонаповненої піни [14–21]. Можливості підвищення вогнегасної здатності води можуть бути пов'язані з обґрунтованим вибором оптимальної дисперсності краплин розпилених струменів води [22,23], а також використанням піноутворювачів на основі поверхнево-активних речовин [24,25] для отримання піни низької кратності. За кордоном для гасіння пожеж класу А та В застосовують спеціальні піноутворювачі (class A foam, піноутворювачі класу А), робоча концентрація яких становить від 0,3 % до 0,4 %, що від 15 до 20 разів нижче концентрації піноутворювачів загального призначення, які використовуються для гасіння пожеж горючих і легкозаймистих рідин в Україні.

Для досягнення поверхні горіння струмінь вогнегасної речовини повинен мати більшу кінетичну енергію порівняно зі струменем води. Цього можна досягти збільшенням густини рідини через уведення в її склад речовин, що підвищують не тільки густину води, а і її в'язкість. Згідно з [20–22,26–30], як такі добавки використовують домішки неорганічних солей – карбонатів, хлоридів, бікарбонатів лужних металів, а також домішки глини і домішки інших дрібнодисперсних речовин.

Таким чином, головним напрямом підвищення вогнегасної здатності води доцільно вважати зниження поверхневого натягу вогнегасного розчину, підвищення змочувальної здатності та в'язкості води завдяки введенню відповідних добавок, отримання оптимальної дисперсності краплин, використання води для утворення пінних розчинів за допомогою систем примусового подавання додаткового повітря [13,16] та/або додавання водорозчинних інгібіторів горіння.

Вода – найбільш поширений і доступний засіб гасіння. Потрапляючи в зону горіння, вона нагрівається й випаровується, поглинаючи велику кількість теплоти, що сприяє охолодженню горючих речовин.

Повітряно-механічна піна – висококонцентрована, структурована дисперсна система, в якій дисперсною фазою є бульбашки газу, а дисперсійним середовищем – рідина як тонкі плівки, що розділяють ці бульбашки. Розтікаючись по поверхні рідини, що горить, вона гальмує потрапляння парів горючої рідини в зону горіння. Піною можна гасити тверді горючі матеріали. На сьогодні для отримання повітряно-механічної піни низької кратності використовують повітряно-пінні стволи, пінні зрошувачі, стволи високого тиску з пінною насадкою, генератори піни низької кратності, стволи багатофункціональні ручні та лафетні з відповідним оснащенням. Основним механізмом дії зазначених приладів є ежекція атмосферного повітря за нормального тиску і подальше утворення піни.

Альтернативним способом отримання піни є примусове введення повітря в розчин піноутворювача за допомогою компресора. Технологія [24,25] являє собою високоефективний засіб пожежогасіння для використання якого необхідна лише незначна кількість води. Технологія широко використовується в багатьох країнах світу, зокрема в Німеччині, Австрії, Франції, США, Великій Британії.

Аналіз досвіду застосування компресійної піни у США, Австрії та Німеччині доводить [12–18,31–35], що такі системи мають ряд переваг порівняно з традиційними технологіями пожежогасіння, а саме:

- більш високу ефективність гасіння (зменшення часу гасіння);
- зменшені витрати води від 2 до 5 разів і піни від 6 до 10 разів;
- швидке зниження температури в зоні горіння;
- невеликі пошкодження майна через зменшення проливання водою;
- можливість подавання піни по сухотрубках на велику висоту;
- збільшення дальності подавання піни.

Застосування інертних та негорючих газів (діоксид вуглецю, азот, водяна пара) сприяє зниженню концентрації кисню в осередку горіння. Ними можна гасити будь-які пожежі, зокрема й електроустановки. Виняток становить діоксид вуглецю, який не можна застосовувати для гасіння лужних металів, оскільки за такої умови відбувається реакція його відновлення.

Водні вогнегасні засоби – це зазвичай, водні розчини солей. Наприклад, солі хлоридів кальцію і амонію, глауберова сіль.

Вогнегасні засоби, що містять галогенопохідні вуглеводнів [36,37], дають змогу гальмувати реакції горіння. До них належать: тетрафтордибромметан (хладон 114B2), бромистий метилен, трифторбромметан (хладон 13B1). Ці сполуки мають низькі температури замерзання, тому їх можна використовувати саме за низьких температур.

## **1.2. Аналіз механізмів взаємодії водних вогнегасних речовин з вогнем**

Відомо, що для припинення горіння необхідно виконання хоча б однієї з таких умов [2]:

- ізолювання осередку горіння від повітря;
- зниження концентрації кисню шляхом розведення негорючими газами;
- охолодження осередку горіння нижче визначених температур спалахування;
- інтенсивне гальмування (інгібування) швидкості хімічних реакцій в полум'ї;
- механічний зрив полум'я струменем рідини або газу;
- вогнеперешкодження, тобто унеможливлення поширення полум'я через вузькі канали (сітки).

Усі відомі вогнегасні речовини чинять зазвичай комбінований вплив на процес горіння. Наприклад, вода може охолоджувати, ізолювати осередок горіння, розводити водяною парою горючу газову суміш тощо. Водночас будь-яка вогнегасна речовина має домінуючу властивість. Для води – це охолоджувальна дія. Крім того, прояв будь-якої властивості вогнегасної речовини залежить від умов її використання. Використання води вважають ефективним засобом під час гасіння пожеж, що пов'язані з горінням речовин і матеріалів у всіх трьох агрегатних станах (твердому, рідкому, газоподібному). Воду застосовують без добавок або з добавками, формуючи компактні, розпилені і тонко розпилені струмені [6–11,18–23].

Основний механізм гасіння компактними водними струменями полягає в охолодженні горючої речовини, а в окремих випадках використовується й механізм відривання полум'я з поверхні горючої речовини [7,8,10,11]. Застосування компактних водяних струменів залишається найбільш поширеним. Недолік цього

традиційного способу пожежогасіння полягає у нерівномірності зрошування зони пожежі, далеко не вся вода впливає на процес горіння. Із загальної кількості води, яка подається як компактні струмені, безпосередньо на гасіння використовується всього від 6 % до 10 % поданого об'єму води, а інколи не більше 1 % [2,18]. Це зумовлено тим, що протягом короткого проміжку часу контакту з високотемпературною зоною горіння краплі відносно великого розміру (понад 2 мм) не встигають перетворитись у пару і, таким чином, значна частина тепло-відбірного потенціалу води не використовується.

Крім охолоджувальної дії, водяна пара ефективно розбавляє горюче середовище. Ефект розбавлення, що забезпечує зниження кисню в навколишньому повітрі, пояснюється тим, що об'єм пари в 1700 разів перевищує початковий об'єм води, що випаровується [21–23]. Однак унаслідок невеликої в'язкості та поганої змочувальної здатності вода швидко стікає з палаючих предметів і значна її частка не бере участі у процесі гасіння. З огляду на це доводиться збільшувати інтенсивність подавання і витрату води. У разі переходу від модельних вогнищ до реальних умов пожежогасіння спостерігається суттєве зростання відхилення між теоретично розрахованими та фактичними показниками витрати води [2,20,21].

Отже, з погляду пожежогасіння найбільш негативними характеристиками води є високе значення поверхневого натягу та низька в'язкість. Для зміни поверхневого натягу найбільш часто до води додають поверхнево-активні речовини (надалі – ПАР). Для цього застосовують аніоноактивні, катіоноактивні та неіоногенні сполуки. Їх концентрація у воді зазвичай перебуває залежно від типів і складу у межах від 0,5 % до 10 % [7].

Завдяки низькій в'язкості вода швидко стікає з поверхні матеріалу, на яку її подано. Послаблення такого ефекту можна досягти шляхом введення невеликих кількостей загусників – водорозчинних полімерів, наприклад ефірів целюлози, що призводить до підвищення в'язкості водного розчину. В'язкість розчинів є характеристикою сил когезії (сил взаємодії макромолекул у рідині) [2,10,24,25,31–35]. У разі підвищення в'язкості підвищуються і сили адгезії – сили взаємодії між двома фазами (між водним розчином і поверхнею твердого горючого матеріалу

(надалі – ТГМ). Унаслідок зростання сил когезії та адгезії швидкість стікання ВВР з поверхні зменшується, а отже, збільшується час контакту ВВР з горючою речовиною і тому вогнегасна ефективність ВВР збільшується.

Поширеними добавками, що використовують як загусники є поліакриламід, натрієва сіль карбоксиметилцелюлози, поліакрилова кислота, альгінат натрію, поліоксиетилен, метилцелюлоза, полівиніловий спирт [14,28,30].

Згідно з [27–29,38–41] водні розчини з полімерними добавками мають вищу вогнегасну здатність порівняно із водою, оскільки вони не тільки загущують, а й у разі підвищення температури здатні до гелеутворення або до утворення на поверхні горючої речовини негорючого покриття, яке виконує вогнезахисну функцію. Застосування водних розчинів із гелеутворювальними добавками може підвищити вогнегасну ефективність води від 1,5 до 2 разів.

Об'єктом досліджень [7,10,11,20–23] були водні і водопінні вогнегасні речовини та модифікувальні добавки до них. Предметом досліджень був вплив виду і концентрацій модифікувальних добавок до ВВР на процеси припинення горіння, показники їх якості, а також ефективність їх застосування для цілей пожежогасіння та в системах протипожежного захисту об'єктів. Встановлено, що в умовах випробувань вогнегасна здатність ВВР із вмістом піноутворювача залежно від виду і концентрації від 1,2 до 11,7 раза перевищує вогнегасну здатність води, що зумовлено зниженням поверхневого натягу, зменшенням розмірів краплин, підвищенням швидкості їх випаровування, тобто підвищенням швидкості охолодження поверхні горіння макетного вогнища.

Значне підвищення вогнегасної здатності завдяки введенню до рецептури водної вогнегасної речовини солей калію (найбільш ефективний – карбонат калію) пояснюється домінувальним внеском інгібувального ефекту.

У роботі [20] стверджується, що вогнегасна дія води або її соляних водних розчинів проявляється в основному завдяки охолоджувальному чиннику і зазвичай розбавленню зони реакції під час утворення водяної пари, а також зміні теплофізичних властивостей горючої системи.

Автор роботи [9] на основі експериментальних даних дослідження великої групи дисперсних частинок встановив, що одні речовини дуже слабо впливають на швидкість горіння, а інші навіть за незначних концентрацій різко знижують швидкість поширення полум'я. До першої групи належать термічні інгібітори (сполуки кремнію, алюмінію, натрію та інші), що діють тільки, як холодна стінка, знижуючи кінетичну енергію активних частинок. Концентрація таких речовин у розчині для гасіння полум'я повинна бути високою. Друга група – хімічні інгібітори (зазвичай солі лужних металів), яких для гасіння потрібно значно менше.

Автори [8,21] вказують, що дисперсні солі  $\text{KHCO}_3$  та  $\text{NaHCO}_3$  зі зменшенням розмірів частинок з 63 мкм до 38 мкм під час гасіння пропан-повітряного бунзенівського факела збільшують свою ефективність (зменшення вогнегасної концентрації з  $100 \text{ г/м}^3$  до  $30 \text{ г/м}^3$ ). У роботі [13] головним напрямом підвищення ефективності ВВР автор вважає одержання потоку необхідної дисперсності через додавання до води інгібіторів активних центрів полум'я та речовин, які змінюють фізико-хімічні властивості рідин.

Зазвичай в системах водяного пожежогасіння використовують воду або воду з додаванням певної кількості піноутворювачів (до 6 %), загальновідомі як пінні розчини або піна. Одним із основних показників якості піни є стійкість до теплових і механічних впливів. На думку автора [30], усі необхідні вимоги до цих властивостей піни забезпечуються підбором піноутворювачів на основі поверхнево-активних речовин. У роботі [12–16] досліджувалися фактори, які впливають на експлуатаційні характеристики компресійної піни. Встановлено, що експлуатаційні характеристики піни значною мірою залежать і від технологічних параметрів процесу піноутворення:

- тиску у системі;
- кількості повітря;
- конструктивних особливостей реактора та сопел.

Згідно з [13,16,38] середній розмір бульбашок піни середньої та низької кратності піноутворювачів загального призначення перебуває у межах від 2 мм до 4 мм. Однак у разі застосування спеціальних піноутворювачів та обладнання можливо

отримувати піну з розмірами бульбашок від 1,2 мм до 1,8 мм. Щодо однорідності бульбашок, то інформації немає. У роботах [8–11,24,25] досліджувалися:

- дисперсність піни та гомогенність (оцінювали або середнім розміром бульбашки, або розподілом бульбашок за розмірами. Чим вища дисперсність, тим більша стійкість піни);
- кратність, стійкість (руйнування 25 % від початкового об'єму) та адгезивні властивості.

Встановлено, що експлуатаційні характеристики якості піни для конкретної установки залежать від режимів і методів її утворення, типу і концентрації піноутворювача, наявності стабілізуючих речовин.

Аналізуючи наведені у роботі залежності, можна відзначити, що:

- є залежність кратності піни від тиску у передкамері, зокрема збільшення тиску призводить до збільшення кратності;
- кратність піни залежить від відсоткового вмісту піноутворювача в розчині, (оптимальне співвідношення за вмістом піноутворювача в розчині – 6 %);
- у разі збільшення стійкості піни зменшується її кратність;
- у разі додавання до водного розчину піноутворювача стабілізатора (полівінілового спирту) кратність і стійкість піни зростають;
- полідисперсність піни зменшується у разі збільшення її кратності.

Можна зробити висновок, що гомогенність характеризується полідисперсністю піни та залежить від її кратності. У разі збільшення кратності піни полідисперсність зменшується, тобто гомогенність зростає. Отже, зменшення розмірів бульбашок буде свідчити про підвищення стійкості піни.

У роботах [39–44] пропонується використання рідкого скла в концентраціях від 5 % до 50 %. Рідке скло змішується з водою в будь-яких співвідношеннях і змінює в'язкість розчину від 0,004 Па·с до 0,5 Па·с у разі зміни густини розчину з 1020 кг/м<sup>3</sup> до 1250 кг/м<sup>3</sup>. У зазначеному діапазоні концентрації рідкого скла в складі водного розчину в'язкість розчину збільшується в 4500 разів порівняно з в'язкістю води 0,001 Па·с при 20 °С. Таким чином, істотно підвищується щільність розчину, що сприяє збільшенню кінетичної енергії руху струменя розчину порівняно з енергією

струменя води, спрямованої в осередок горіння з однаковою швидкістю. Дальність польоту струменя розчину також збільшується.

Післ час розробляння складу ВВР на основі рідкого скла вбачалось перспективним додавання компонентів, що додатково забезпечують підсилення ефекту інгібування ланцюгових реакцій горіння. Водночас очікували підвищення ефективності гасіння як полуменевого горіння ТГМ, так і протидії його повторному займанню. В цьому сенсі для підвищення вогнегасної ефективності до гелеутворювальних водних розчинів додавали солі, хлорид натрію, карбонат амонію, бікарбонат калію [21–23] і, таким чином, створювали комбіновані ВВР.

Згідно з [45–53] інгібування можливо реалізувати, у разі додавання до води деяких неорганічних добавок: солі амонію, сірчаної, фосфорної кислот, сполук кремнію, магнію, бору, заліза, цинку, міді тощо. Сполуки алюмінію належать до лідерів щодо застосування в промислових масштабах для виробництва антипіренів (речовин, що пригнічують горіння) [47–50]. Таким чином, використовуючи модифіковані водні розчини разом з додаванням солей, наприклад алюмінію, з'являється можливість поєднати в одній технологічній операції гасіння одразу два способи гасіння: охолодження та інгібування, що має за рівних умов призвести до зниження витрати вогнегасної речовини.

У роботах [13,34] розглянуто способи підвищення ефективності гасіння пожеж у разі застосування монодисперсної розпорошеної води з розмірами крапель до 100 мкм для рідин з низькою температурою спалахування та з розмірами крапель до 500 мкм для рідин з температурою спалахування вище 60 °С. Підвищенню вогнегасної здатності води, на думку автора, сприяє також додавання до неї речовин, що мають лужну природу. Найбільш ефективно гасіння пожежі в приміщеннях і на відкритому повітрі досягається у розчині з дрібними краплями від 10 мкм до 50 мкм з масовим вмістом від 5 % до 15 % разом із великими від 50 мкм до 150 мкм з масовою концентрацією від 85 % до 95 %. У разі збільшення частки дрібно розпорошеної води у пропорції з повітрям час гасіння експоненційно скорочується. Процес випаровування відбувається швидше для невеликих крапель води, ніж для більших. Отже, виробники протипожежного обладнання досліджували різні способи щодо

зменшення розмірів крапель води. Більшість робить це за рахунок збільшення тиску, щоб розбити струмінь води на краплі води всередині сопла. Проте, збільшення тиску має декілька недоліків. Це включає велику кількість захопленого повітря, менше контролю над гарячими газами, безпечну відстань для розпилення безпосередньо на людей, значну віддачу та неконтрольоване поширення палаючого сміття тощо.

Якщо тиск знизиться, це не тільки збільшить розмір крапель води, а й зменшить діапазон розпилення, що небажано. Конструктивні заходи більшості компаній для досягнення малих крапель води, низького тиску та великого діапазону розпилення протидіють одне одному, що призводить до того, що виробники йдуть на компроміс і не досягають оптимальних характеристик сопла.

Фірма «Firexpress» (Данія) сконструювала сопло таким чином, що воно забезпечує оптимальне поєднання розміру краплі, тиску та діапазону розпилення своїх мікрокрапель. Установки Firexpress [45] мають резервуари для попередньо змішаної води та піноутворювача, який перебуває під тиском стисненого повітря. Розчин витісняється з ємності стисненим повітрям. Повітря подається з повітряного бака з композитного матеріалу під тиском від 20,0 МПа до 30,0 МПа. Робочий тиск знижується до 2,0 МПа перед входом у резервуар з водою. Витрати ВВР становлять 22 л/хв, час роботи – приблизно 120 с. Установка може подавати як компактний, так і розпорошений струмінь. Установка має мінімальну витрату води, яка випаровується і в процесі випаровування утворює пару високого тиску, що перешкоджає доступу кисню з навколишнього середовища. Через високоефективне використання води системі потрібно значно менше її порівняно з іншими системами гасіння пожежі. Через малий розмір мікрокрапель разом з ВВР до осередку пожежі майже не потрапляє повітря. Повітря всмоктується в пульверизатор, який запобігає надходженню на вогонь кисню з повітря, що тягнеться краплями ВВР.

У роботах [47–49] пропонується спосіб гасіння низових пожеж із застосуванням як вогнегасних складів гідрогелів алюмінію (надалі – алюмогелі) з різною концентрацією. Алюмогель отримували шляхом гідролізу сульфату алюмінію з водою з додаванням бікарбонату натрію до масової часткою алюмогелю 0,34 %. Вогнегасну здатність алюмогелів порівняли з вогнегасною здатністю води і водними

розчинами карбонату натрію і сульфату натрію. Ефективність гасіння оцінювали через порівняння результатів сумарних витрат вогнегасних засобів до одиниці довжини кромки пожежі та одиниці площі пожежі. Найкращою вогнегасною здатністю рекомендовано водний розчин алюмогелю з масовою часткою від 3,5 г/л до 7,0 г/л. Стверджується, що вагомого вкладу в гасіння застосування інших водних розчинів (соди та сульфату натрію) не виявлено, тому вогнегасний ефект повністю зумовлений хімічним складом і фізико-хімічними властивостями алюмогелю. На рисунку 1.1 наведено використання алюмогелю під час гасіння степової пожежі [48– 49].

Необхідно відзначити, що згідно з [47–51] сульфат алюмінію має високу розчинність у воді: 342 г/л, а утворення кристалічного гідроксиду алюмінію проходить через стадію утворення колоїдного розчину. Але колоїдний розчин нестійкий в часі і поступово руйнується, формуючи кристалічний гідроксид алюмінію, який нерозчинний у воді. Отже, для визначення придатності алюмогелю як вогнегасної речовини під час гасіння реальної природної пожежі необхідно знати стійкість в часі його водного розчину.



а

б

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд ділянки обробленої алюмогелем:

а) поверхня ділянки оброблена алюмогелем до пожежі;

б) поверхня ділянки оброблена алюмогелем після пожежі

У роботі [54] розглянуто один із перспективних напрямів підвищення ефективності водних вогнегасних речовин – створення гелевих систем на основі

гідроксиду алюмінію. Автори здійснили науково обґрунтоване порівняння двох методів синтезу алюмогелю із застосуванням карбонатів натрію та калію з метою визначення їх впливу на фізико-хімічні та вогнегасні властивості одержаних розчинів. Проведений комплекс експериментальних досліджень дав змогу визначити оптимальні умови утворення гелеутворювальної системи, а також оцінити її ефективність під час гасіння модельних осередків пожеж класу А.

Результати досліджень показали, що використання карбонату калію замість натрієвого карбонату сприяє значному підвищенню ефективності гасіння (у 5 разів) та подовженню часу стабільності гелевої структури з 60 до 100 хвилин. У процесі гасіння виявлено поєднання декількох механізмів дії — охолодження, інгібування та ізоляції, що забезпечує комплексний протипожежний ефект. Встановлено, що на поверхні горючого матеріалу формується оксидний шар  $Al_2O_3$ , який підсилює ізолювальну дію та зменшує ймовірність повторного займання.

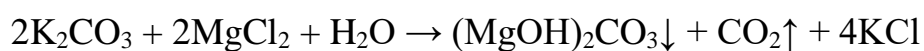
Автори дійшли висновку, що запропонований спосіб одержання алюмогелю на основі калієвих сполук забезпечує зростання вогнегасної ефективності приблизно на 35 %, підвищує термостійкість і адгезійні властивості гелевих композицій. Розроблена речовина відзначається технологічною простотою, екологічною безпечністю та може бути рекомендована для практичного використання в системах гасіння пожеж класів А і В.

Таким чином, результати дослідження [54] є важливим етапом розвитку наукових уявлень про механізми гелеутворення у водних вогнегасних системах і створюють експериментально підтверджену основу для подальших робіт, спрямованих на модифікацію таких складів полімерними компонентами з метою підвищення їхньої ефективності та стабільності.

У роботі [55] запропонована композиція для отримання вогнегасного та вогнезахисного гелю, яка включає водний розчин карбонату калію, що містить карбонат калію у концентрації від 40 % до 50 %, і водний розчин хлориду магнію, що містить хлорид магнію у концентрації від 17,4 % до 20,0 %.

У другому варіанті композиція для отримання вогнегасного та вогнезахисного гелю включає водний розчин карбонату калію, що містить карбонат калію у

концентрації від 35 % до 50 %, пропіленгліколь від 3 % до 8 % і розчин хлориду магнію, що містить хлорид магнію від 12,2 % до 24,9 %, пропіленгліколь від 23 % до 37 %. Запропоновані композиції формуються із двох складів, що окремо зберігаються і подаються для змішування. Компоненти цих двох складів підбираються таким чином, щоб під час їх змішування та взаємодії утворювалася нетекуча желеподібна композиція. У разі взаємодії водних розчинів  $K_2CO_3$  і  $MgCl_2$  утворюється гідроксокарбонат магнію, який призводить до різкого підвищення в'язкості та утворення желеподібної маси, що додатково містить вуглекислий газ і розчин хлориду калію.



Водні розчини карбонату калію та магнію хлориду можуть додатково містити добавку, що знижує температуру замерзання, наприклад, пропіленгліколь. Слід зазначити, що для реалізації використовувався вогнегасник, який містить дві ємності, у кожній з яких окремо зберігаються компоненти, які подаються до змішувача-розпилювача. Реакція взаємодії карбонату калію і хлориду магнію з утворенням твердої фази, що являє собою гідроксокарбонат магнію, відбувається в потоці розпилених частинок компонентів перед попаданням на палаючу поверхню.

Недоліком є неможливість попереднього змішування компонентів, з подальшим їх розпорошенням на поверхню, що призводить до значного зменшення площі зрошення, оскільки речовини вступають у реакцію, і в'язкість ВВР уже у реакторі збільшується, що ускладнює його застосування. Також ВВР потребує постійної корекції витрати компонентів перед їх змішуванням.

Однак застосування ВВР у формі гелів, виготовлених з водопоглинальних полімерів, що утримують воду, мають і недоліки. До них належать:

- зменшення їх ефективності залежно від тривалості часу їх використання як профілактичного захисту елементів екосистеми;
- вони можуть бути знесені сильними вітрами або змиті дощами (водою, яка була використана для боротьби з лісовими пожежами);

- ефективність суттєво знижується внаслідок інтенсивного фазового перетворення (випаровування) води під дією високих температур безпосередньо у зоні горіння.

### **1.3. Перспективні напрями покращення рецептур водних вогнегасних речовин**

Істотним недоліком ВВР є їх великі втрати через стікання із вертикальних і похилих поверхонь. У разі подавання води в розпиленому стані втрати через стікання істотно зменшуються, проте збільшуються втрати через виніс дрібних крапель висхідними конвективними потоками. Ще одним недоліком рідинних вогнегасних речовин є низький тепловідбір з нагрітих поверхонь внаслідок ефекту плівкового кипіння, а саме – охолодження твердих поверхонь, що горять, є необхідною умовою припинення горіння ТГМ [54].

У роботах [49–50,56–60] запропоновано нове покоління гелеутворювальних складів – гідрогелів. За твердженням авторів, ці речовини характеризуються спрощеною технологією застосування, підвищеною ефективністю та надійністю, а також є екологічно безпечними й не чинять агресивного впливу на обладнання. Гідрогелі за своєю структурою є зшитими сополімерами калієвої та амонійної солей акрилової кислоти; відсутність у їхньому складі солей натрію дає змогу мінімізувати негативний вплив на металеві та інші типи поверхонь.

За видом зберігання у вогнегаснику або установці продукт поділяють на:

- порошок, розчинений у воді (гель, гідрогель);
- порошок, що розчиняється в момент приведення вогнегасника або установки в дію (змішування в процесі).

Згідно з [50,59] для гасіння пожеж та вогнезахисту рекомендовано використання різних концентрацій. Концентрація також залежить і від характеристик вогнища пожежі. Вогнегасний склад з добавкою гідрогелю під впливом температури утворює полімерну плівку, яка збільшує адгезію (прилипання), як до палаючої, так і до поверхні, що захищається від загоряння, водночас ізолює її від доступу кисню, перешкоджаючи стіканню вогнегасної речовини, має підвищені вогнегасні

властивості та суттєво зменшує втрати вогнегасної речовини. Після гасіння плівка легко видаляється водою. У роботі [53] з метою підвищення вогнегасної здатності ВВР проведена успішна спроба перевести термореактивний поропласт у піну низької кратності, за рахунок зміни складу матеріалу, із застосуванням наявного штатного пожежного обладнання. Проводили механічне змішування двох розчинів – водного (піна) та водно-полімерного (смола). Кожен із розчинів готували окремо, а перед подаванням змішували за допомогою повітря. Як добавки до ВВР використовували полісилікат натрію до 12 %. На рисунку 1.2 показано загальний вигляд отриманої піни.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд піни низької кратності, отриманої під час механічного перемішування

Проведено успішні експериментальні дослідження гасіння модельних вогнищ пожеж 2А та 55В із запропонованою піною, лабораторним обладнанням та у разі застосування ствола фірми ПАК (Франція). Вивчалась можливість подавання піни на поверхню з фіксацією витрат компонентів, визначення відстані подавання матеріалу, адгезійних властивостей піни та її стійкості. Відстань подавання дорівнювала від 14 м до 15 м. Зазначено, що стійкість піни, що подавалась, становила від 40 хв до 60 хв, а після її осідання на поверхні утворювалась тонка гелева негорюча плівка, яка продовжувала виконувати функції ізоляційного матеріалу (рисунок 1.3 - 1.5).

Водночас, виявлено проблеми, пов'язані з подаванням виробленої піни на вогнище за допомогою наявного обладнання.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд піни, витримка 5 хв



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд піни, витримка 40 хв



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд піни, витримка 70 хв

За інформацією Proceedings of the National Academy of Sciences, фахівці зі Стенфордського університету створили гелеві речовини на основі целюлози з невеликими добавками діоксиду кремнію [61].

Зазначено, що для боротьби з активними пожежами американські екстрені служби використовують гелі, що вбирають воду, та суперабсорбуючі полімери. Для їх виробництва найактивніше застосовують фосфат амонію та його похідні.

Однак, як показала практика гасіння пожеж, склади на такій основі втрачають ефективність, як тільки випаровується захоплена ними вода. У звичайних умовах лісової пожежі вже через годину речовина стає непридатною. Дослідження створеної вогнегасної речовини, яке пройшло на траві та чагарнику виду *Adenostoma fasciculatum*, продемонструвало, що гель продовжував захищати рослинність від дії вогню навіть після випадання 1,5 см опадів. Слід зазначити, що речовини, які використовуються у повсякденні, за цей час змиваються з листя повністю. Крім того, розроблений гель містить шкідливі речовини, які не є безпечними ні для рослин, ні для тварин і людей.

Працюючи над засобом нового покоління, фахівці зі Стенфордського університету поставили завдання продовжити час випаровування води. Внаслідок цього створено желеподібну речовину на основі целюлози з невеликими добавками діоксиду кремнію. Вона довго залишається на поверхні, незважаючи на вітер або дощ, і це дає змогу використовувати її не тільки в момент гасіння пожеж, а й превентивно – обробивши дерева в зоні ризику.

Розроблений в Стенфордському університеті засіб обробки містить нешкідливі матеріали, широко використовувані в харчовій, фармацевтичній, косметичній та сільськогосподарській продукції. Унікальні властивості цих желеподібних речовин дають змогу наносити їх за допомогою звичайної сільськогосподарської техніки або з літака. Питання використання целюлози як основи для утворення гелевих складів і вивчення технології її отримання та застосування викладені також у [30,43].

Як було зазначено вище, недоліком використання води для гасіння пожеж є те, що значна її кількість безпосередньо не гасить пожежу. Іншим недоліком використання води для гасіння пожеж є те, що вода, яка розбризкується

безпосередньо на вогонь, випаровується на верхньому рівні пожежі, внаслідок чого значно менше обсягів води, ніж застосовано, здатні проникнути і бути достатніми для гасіння основи пожежі. Вода зазвичай використовується для гасіння пожежі та запобігання її поширенню на сусідні споруди. Коли вода спрямовується на споруду, що прилягає до пожежі, щоб запобігти її поширенню, вогонь має забезпечити достатню кількість тепла для її випаровування на сусідній конструкції, перш ніж конструкція досягне температури займання. Одним із недоліків використання води для запобігання поширенню вогню на сусідні конструкції є те, що більша її частина, не поглинається конструкцією, щоб забезпечити протипожежний захист, а має тенденцію до стікання з конструкції на землю. Як наслідок, значна кількість води витрачається даремно. Іншим недоліком є те, що будь-яка вода, яка вбирається в конструкцію, забезпечує лише обмежений захист від вогню, оскільки більшість конструкцій поглинає лише обмежену кількість води, і ця обмежена кількість поглиненої води швидко випаровується, отже потрібно проводити постійне повторне подавання води на сусідні споруди, щоб забезпечити безперервний протипожежний захист. Щоб усунути зазначені вище недоліки застосування води для боротьби з пожежами, у патенті [62] пропонується використання водної системи, що містить сухі абсорбуючі полімери, для гасіння та/або запобігання пожежам. Полімерні частинки мають розміри від 20 мкм до 500 мкм і диспергуються у воді шляхом перемішування таким чином, що кінцева динамічна в'язкість не перевищує 100 сантипуазів (сП). Ця система містить дискретні полімерні частинки, які поглинають воду, не розчиняючись у ній. Сухі тверді гранульовані частинки зазвичай попередньо змішують із джерелом води. Як альтернатива, сухі тверді гранульовані частинки також можна додавати безпосередньо перед насадкою.

У патенті [62] також описано використання водної системи, що містить сухі абсорбуючі полімери, для гасіння та/або запобігання пожежам. Сухі, тверді полімерні частинки вкриті водорозчинним вивільнювачем для запобігання аглютинації частинок. Час, потрібний для наповнення водою капсульованих твердих гранульованих частинок (тобто розширення від поглинання води), становить від десяти секунд до декількох хвилин. Зазначимо, що час гасіння пожежі стандартною

довжиною рукава на десять секунд більше, ніж час проходження води через пожежний рукав. Отже, використання стандартного протипожежного обладнання не дає достатнього часу для наповнення водою частинок, їх в'язкість не збільшується настільки, щоб дати змогу часткам прилипати до поверхонь. У патенті [63], також описується застосування для пожежогасіння сухих, твердих, гранульованих полімерних частинок із високими водопоглинальними властивостями. Використання таких частинок пропонується здійснювати за допомогою спеціального додаткового обладнання для пожежогасіння. Застосовувати такі полімери у стандартному пожежному рукаві зі стандартним обладнанням майже неможливо через частинковий характер таких полімерів. Суха тверда природа полімерів сприяє злипанню частинок і подальшому блокуванню потоку води з пожежного рукава. Отже, необхідно застосування спеціальне обладнання, пристосоване для роботи з такими матеріалами, щоб використовувати сухі, тверді гранульовані частинки для пожежогасіння. Крім того, якщо природне джерело води, таке як струмок або річка, буде використовуватися як джерело води, то це унеможливить попереднє змішування полімеру шляхом його порційного додавання до джерела води. Наприклад, якщо вилити полімерну добавку в потік або річку, більша частина полімерної добавки просто витече через точку всмоктування води для використання в боротьбі з пожежами. Згідно з патентом [64], добавка до води для пожежогасіння, містить нерозчинний у воді полімер як желатинізуючий агент. Такі речовини мають високу абсорбційну здатність і можуть у стислі терміни поглинати воду, яка перевищує їх вагу приблизно в 100 – 200 разів, однак не розчиняючись у ній. Ці речовини мають вигляд частинок гелю, які сильно набрякають внаслідок гідратації та диспергуються у воді для гасіння пожежі. Якщо додати до настільки набряклих частинок гелю надлишок води, остання залишиться як чиста водна фаза. В'язкість води для гасіння пожежі після додавання такого желатинізувального агента лише трохи вища за в'язкість чистої води. Досить низька в'язкість важлива для того, щоб вода для гасіння пожежі залишалася легкою у використанні, зокрема повністю прокачувалася. Перевагами застосування води для гасіння пожежі, до якої додається добавка зазначеного виду, є зменшення об'ємів води, необхідної для гасіння пожежі,

скорочення часу ліквідації пожежі, а також зменшення об'ємів води для вгамування вогню, яку безпосередньо не використовують у процесі гасіння, що стікає на землю повз джерело загоряння.

Оскільки клейстеризувальні речовини попереднього рівня техніки потребують часу наповнення водою від однієї до декількох хвилин, використання води для гасіння пожежі, що містить добавки зазначеного типу, у разі великих пожеж потребувало б зберігання води для цієї мети в проміжному контейнері для досягнення необхідного часу його наповнення. Використання проміжних контейнерів стало б зайвим, якби можна було скоротити час наповнення водою до декількох секунд. Такого скорочення часу наповнення водою можна досягнути шляхом зменшення розміру частинок желатинізувального агента. З одного боку, тим самим збільшується робоча поверхня води під час процедури наповнення водою, а з іншого – зменшується шлях дифузії. Однак використання дуже дрібних частинок клейстеризувального агента підвищує ризик аглютинації. Через схильність до утворення грудок можна використовувати тільки зернистий матеріал (наприклад, 0,2...0,4 мм) і додавати його лише невеликими порціями. Подрібнити матеріал неможливо, оскільки він починає грудкуватись. Однак цей матеріал має переваги. Якщо для крупнозернистого матеріалу потрібно від 1 хв до 2 хв, щоб наповнитись водою, то для дрібного матеріалу потрібно лише приблизно 10 с, і це єдиний матеріал, який достатньо швидко наповнюється водою, щоб його можна було подавати до осередку гасіння. Як агенти, що можуть запобігти процесу аглютинації, запропоновано використання поліетиленгліколю, який не поглинається гелеутворювальної речовиною. Стверджується, що шар поліетиленгліколю захищає частинки желатинізувального агента від надто швидкого їх злипання між собою під час проникнення води та від аглютинації. Поліетиленгліколь малонебезпечна речовина і дуже швидко розкладається, тому може вважатися екологічною речовиною. Автор стверджує, що потрібно змочувати частинки желатинізувального агента кількістю від 10 % до 100 % поліетиленгліколю 300 або 400 з огляду на кількість желатинізувальної речовини. Гасіння пожеж морською водою, у якій міститься у високій концентрації хлорид натрію, а також солі, призводить до сильного зниження здатності до наповнення водою желатинізувальної

речовини. Цей негативний ефект значно зменшується, якщо як розділювач використовують гідрофосфат (як антиадгезив). Фосфат-іон блокує речовину, що спричиняє твердість, а іон амонію компенсує негативний вплив іонів натрію на здатність до наповнення водою. Особливо вигідно використовувати гідрофосфат у кількості від 20 % до 100 %, з огляду на клейстеризувальної речовини. Рекомендовано під час приготування добавки для води для гасіння пожежі змішувати желатинізувальні речовини з 50 % біфосфату амонію у високошвидкісному змішувачі. Водночас кристали біфосфату діамонію подрібнюються. Розчиняють від 10 % до 30 % маси води в розрахунку на желатинізувальні речовини. Частинки желатинізувальної речовини на невеликий термін стають липкими, а біфосфат діамонію постійно закріплюється на поверхні частинок желатинізувальної речовини. Відзначена можливість використання цукру як розділювача, зокрема моно- та дисахаридів. Хороші результати отримані, наприклад з цукрами та похідними, такими як цукрові спирти, зокрема маніт.

Наведене вище [64] стосовно придатних добавок, з якими комбінують розчинні у воді агенти, викладено у патентах [64–68].

Відповідними зшивальними агентами є такі олефінові біфункціональні мономери, такі як метилен-біс-акриламід, дивінілбензол, трис-аліціанурат, трис-алілфосфат тощо. Приготування відповідних зшитих полімерів шляхом радикальної або окислювально-відновної полімеризації відоме у техніці. Щоб прискорити процес наповнення водою, можна додавати (за бажанням) тонко подрібнену активну кремнієву кислоту та/або силікати. Активні кремнієві кислоти, які можна додавати, є вже відомими продуктами, зокрема як наповнювачі або поглиначі, такі як ксерогелі кремнієвої кислоти, що мають поверхню понад 30 м<sup>2</sup>/г, або активні кремнієві кислоти з поверхнею від 50 м<sup>2</sup>/г до 450 м<sup>2</sup>/г (аеросил), виміряні згідно з методом БЕТ (Brunauer-Emmett-Teller). Замість активних кремнієвих кислот також можливо використовувати також активні силікати, що осаджуються, з рідкого скла та відповідні солі металів і, можливо, мінеральні кислоти, зокрема силікати кальцію, магнію або алюмінію з поверхнею, виміряною за методом БЕТ, понад

30 м<sup>2</sup>/г, у формі їх ксерогелів, що застосовні для цілей винаходу в поєднанні з високопоглинальними полімерами.

У патенті [69] пропонується використання водної добавки для запобігання та/або гасіння пожежі. Добавка являє собою дисперсію, що містить рослинну олію та зшитий полімер, який наповнюється водою, до того ж:

- дисперсію отримують шляхом диспергування подрібненого сухого полімеру, який наповнюється водою у воді, у рослинній олії, необов'язково з відповідними поверхнево-активними речовинами та стабілізуючими речовинами, якщо це необхідно або бажано. У кращому варіанті здійснення дисперсія містить сухий зшитий полімер у рослинній олії та відповідний(і) емульгатор(и) і суспендувальний(і) агент(и). Переважно дисперсія являє собою сухий зшитий полімер щонайменше одного гідрофільного мономеру, диспергованого в рослинній олії. Зазвичай полімер є сополімером акриламідів та похідних акрилової кислоти (наприклад, акрилатної солі). Здебільшого, полімер є полімером акрилатної солі, акриламідів та солі 2-акриламідо-2-метилпропансульфонової кислоти (AMPS);

- полімерні частинки, отримані внаслідок полімеризації, зазвичай подрібнюються до розміру менше ніж 74 мкм, здебільшого 70 % частинок мають розмір менше ніж 37 мкм. Однак можуть використовуватися полімерні частинки розміром від приблизно 10 мкм до приблизно 200 мкм;

- для приготування дисперсії можна використовувати практично будь-яку нерозчинну у воді рослинну олію. Доцільно, щоб рослинна олія була рапсовою (її рафінованою формою або олією коноплі). Здебільшого після додавання дисперсії у воду для гасіння пожежі утворюється гель. Вибір олії та розмір частинок диспергованих поперечно-зшитих полімерних частинок, що наповнюється водою, визначається необхідною в'язкістю гелю, який утворюється після додавання дисперсії у воду для гасіння пожежі. Утворення іммобілізованого гелю зазвичай відбувається приблизно за три секунди або менше, таким чином частинки переважно мають час наповнення водою менше ніж 3 с. Здебільшого гель має в'язкість щонайменше приблизно 100 сП, переважно щонайменше 500 сП, аж до 50000 сП. «Іммобілізоване» утворення гелю означає, що гель буде прилипати до вертикальної

поверхні у разі контакту. Поверхнево-активні речовини з низьким гідрофільно-ліпофільним балансом (надалі – ГЛБ) можна використовувати для сприяння диспергуванню сухих полімерних частинок у рослинній олії. Поверхнево-активні речовини з вищим ГЛБ можуть бути додані до дисперсії, щоб змінити текучість гелю для конкретних вимог пожежогасіння. Особливо прийнятною поверхнево-активною речовиною з низьким ГЛБ є сорбітан моноолеат. Переважно добавка міститься в достатній кількості, щоб після поглинання води вона утримувала більше 50 % загальної води. Для забезпечення стабільності та текучості дисперсії можна використовувати суспендувальний агент, такий як діоксид кремнію. Це дає змогу вводити дисперсію у водопостачання в рідкій формі, щоб її можна було легко видаляти за допомогою стандартного протипожежного обладнання. Використання пінистого діоксиду кремнію не тільки забезпечує стабільність дисперсії, а також несподівано підвищує стабільність суміші вода-добавка (гелю) і дає змогу за більш низької концентрації добавки отримувати іммобілізований гель. Діоксид кремнію також схвалений, як пряма харчова добавка. Полімерні дисперсії, які містяться, складаються в основному з рослинної олії (наприклад, ріпакової олії), сорбітан моноолеату та пінистого кремнезему, є особливо доцільним з огляду на охорону здоров'я, безпеку, захист навколишнього середовища та аспектів поводження, оскільки ці складові компоненти є або харчовими продуктами, або схвалені як прямі харчові добавки. Добавку рекомендовано додавати у воду в концентрації приблизно від 0,1 об'ємного відсотка (об.%) до приблизно 3 об.%, або від 1 об.% приблизно до 2 об.%. Добавка поєднує в собі властивості супер абсорбувального полімеру, оскільки він може поглинати значну кількість води порівняно зі своїм розміром і вагою, і загусника, оскільки отримана суміш водної добавки має відносно високу в'язкість. Таким чином, водно-добавкова суміш, яка розпилюється з кінця пожежного рукава, легко прилипає до функціональної товщини як на вертикальних, так і на горизонтальних поверхнях. Це зчеплення дає змогу суміші вода-добавка запобігти пошкодженню вогнем конструкції, до якої вона прилипає, протягом відносно тривалого часу, таким чином мінімізуючи робочу силу, необхідну для повторного покриття конструкції. Розпорошення зазвичай виконується, якщо

частина води, що утримується полімером, випаровується, оскільки її кількість, яку поглинає добавка, випаровується менш швидко, ніж вода, яку забезпечує чиста вода. Застосування добавки забезпечує більше води для запобігання та/або гасіння пожеж. Спосіб додавання цієї добавки до води для гасіння пожежі переважно здійснюється шляхом виведення, перекачування або порційного додавання у вихідну воду. Природа і властивості добавки дають змогу виділяти за допомогою стандартного протипожежного обладнання. Наповнені водою частинки дисперсії рослинної олії утворюють однорідну високов'язку рідину. Через характер дисперсії отримана водно-добавкова суміш має короткий (близько 3 секунд або менше) час наповнення водою або поглинання та відносно високу в'язкість, що дає змогу суміші легко прилипати як до вертикальних, так і до горизонтальних поверхонь. Крім того, суміш вода-добавка має достатню текучість, щоб легко виводитися через стандартне протипожежне обладнання. Під час розпилювання водно-добавкової суміші на вертикальну або горизонтальну поверхню суміш прилипає до поверхні, тим самим гасить пожежу та/або забезпечує розширений протипожежний захист конструкцій, розташованих поблизу пожежі. Суміш розпорошується на поверхні, водонавантажені полімерні частинки укладаються одна на одну в декілька шарів. Це схоже на використання піни, але полімерні частинки наповнені водою, а традиційні бульбашки піни наповнені повітрям. Таке водне заповнення значно підвищує теплозахисні якості добавки.

Щоб компенсувати обмеженість водних ресурсів, які застосовуються для гасіння пожеж, розробляються добавки, що сприяють підвищенню вогнегасної ефективності води. Деякі з цих добавок є полімерами, що розбухають у воді, як зшиті акрилові або акриламідні. Вони можуть поглинати воду, маса якої багаторазово перевищує їхню власну масу, утворюючи гелеподібні частинки. Ці дисперговані у воді частинки можуть бути розпорошені безпосередньо на вогонь, зменшуючи кількість часу та масу води, що необхідні для гасіння пожеж, а також кількість води, яка стікає у стоки [68,69].

Інші добавки згідно з [66,67] містять сополімери акрилової кислоти, зшиті за допомогою похідних поліефірів, які застосовують для надання тиксотропних властивостей воді.

Подібні тиксотропні суміші стоншуються під дією зсувних зусиль, даючи змогу розпорошувати їх із гідрантів на об'єкти, що горять, або на землю. Як тільки ці зусилля зсуву усуваються, суміш потовщується, що допомагає їй зачіплятися на поверхні і покривати її [67,70], гасити полум'я і запобігати поширенню вогню або повторному займанню будівлі. Недоліком таких добавок є те, що вони не виробляються з природних джерел і не є легкобіорозкладними. Подібні полімерні добавки можуть зберігатися в навколишньому середовищі після їх застосування під час гасіння вогню та/або можуть накопичуватися за допомогою біоаккумуляції та завдавати шкоди навколишньому середовищу.

Є дослідження, що спрямовані на створення нетоксичних, здатних до біорозкладання, відновлюваних та/або отриманих із природних джерел матеріалів і з метою заміни матеріалів на основі галогенів / синтетичних матеріалів для гасіння вогню та зниження їх впливу на навколишнє середовище. Спеціалісти в цій галузі запропонували термопластичні крохмалі (надалі – ТПК), такі як модифіковані крохмалі або сополімери крохмалю, як один з таких нетоксичних, відновлюваних та/або одержуваних з природних джерел матеріалів. Крохмаль не є натуральним термопластичним матеріалом за кімнатної температури, проте за підвищених температур може утворювати гідрогель у разі змішування з водою; як альтернатива, його можна додатково змішувати з пластифікаторами, такими як гліцерин, також для утворення гідрогелів [71]. Змішування ТПК із полімерами, такими як полівініловий спирт [72], полілактил [73], може збільшувати гідрофільні властивості ТПК і перетворювати ТПК на такий, що спучується. Також повідомляється, якщо ТПК посилені натуральними волокнами, що біорозкладаються [74], то його займистість може бути зменшена.

У патенті [75] пропонується використовувати такий склад:

- (а) 10–75 % щонайменше одного засобу для загущення, що містить камедь або комбінацію камеді та крохмалю;

- (b) 15–89,9 % щонайменше одного рідкого середовища, яке є харчовим маслом, та (c) один або більше суспендуючий засіб.

Водночас композиція складається більш ніж на 75 % з компонентів категорії широкого споживання. Композиція являє собою концентрат, який у разі змішування з водою або водним розчином утворює гідрогель для пожежогасіння, що підсилює дію води. Композиція виготовлена з добавок, що підсилюють дію води, отриманих із природних джерел та з категорії матеріалів широкого застосування, що робить композицію нетоксичною або повністю біорозкладною. Запропоновані рецептури та технології і способи отримання гелевого вогнегасного розчину. Зазначимо, що отримання таких модифікованих крохмалів потребує специфічних хімічних реагентів та покращених реакцій синтезу.

Своєю чергою, надвисокомолекулярні полімери є популярними завдяки їх широкому застосуванню у продуктах гігієни, сільськогосподарських господарствах, фармацевтичних препаратах тощо. Вони також є матеріалами на основі гідрогелів: полімерних матеріалів з можливістю наповнення та утримування значної кількості води (до 99,9%) без розчинення та руйнування у цій воді. Однак застосування ВВР як гелів, виготовлених з надпоглинальних полімерів, що утримують воду, має і недоліки. Зокрема, це зменшення їх ефективності залежно від часу використання як профілактичного захисту елементів екосистеми. Вони можуть бути знесені сильними вітрами або змиті дощами (або водою, використовуваною для боротьби з лісовими пожежами). Вони також втрачають ефективність, оскільки вода, що потрапила в епіцентр пожежі, випаровується від тепла.

Оскільки синтетичні гідрогелі зазвичай є біорозкладними, є ряд природних джерел крохмалю, що досліджуються, як потенційні гідрогелі, таких як: кукурудзяний крохмаль, хітозан, гуарова камедь, целюлоза та її похідні. Зазначимо, що отримання таких модифікованих крохмалів часто потребує хімічних реагентів та покращених реакцій синтезу. Тільки деякі з цих крохмалів є комерційно доступними (наприклад, похідні целюлози, гідроксиетилкрохмаль).

У разі виникнення пожеж легкозаймистих та горючих рідин необхідно мати вогнегасні засоби для їх ліквідації. З огляду на це розроблення ефективних

піноутворювальних складів є пріоритетом у пожежогасінні. У роботах [76–79], розглядаються питання розроблення нових піноутворювальних складів із використанням водорозчинних полімерних добавок різної природи. У роботах зазначено, що введення до піноутворювального складу на основі ПО-6УМ поліакриламідів з високою молярною масою підвищує стійкість піни та скорочує час гасіння дизельного палива. Зазначено, що стійкість піни залежить від виду піноутворювача, його концентрації в розчині, структури та кратності піни. Стверджується, що введення полімерів у піноутворювальний склад призводить до утворення структурованих адсорбційних шарів, що уповільнюють час руйнування повітряно-механічної піни. Зазначено, що введення сополімерів акриламідів з акриловою кислотою в піноутворюючий розчин на основі ПАР Е - 30 навіть у мінімальних концентраціях (0,01 – 0,05%) призводить до збільшення стійкості піни у двічі. Разом із тим час повного руйнування піни зростає в 6 разів, кратність піни зменшується на 30% внаслідок збільшення її в'язкості. Запропоновано піноутворювальний склад на основі бінарної композиції 6% біологічно м'якого піноутворювача ПЗ-6УМ і 0,5% розчину поліакриламідів, який дає змогу отримати повітряно-механічну піну з властивостями, необхідними для застосування її як засобу, що скорочує час гасіння. До недоліків цієї роботи належать проблеми із тривалістю приготування складу, оскільки повне розчинення полімеру з утворенням розчину ВВР відбувається протягом 6–7 діб. Цей недолік можна усунути через введення до складу активних сучасних емульгаторів і стабілізаторів, а також керуючи фракційністю полімеру.

У роботі [79] для розкриття більшого потенціалу води як вогнегасної речовини пропонують застосування відповідних добавок поверхнево-активних речовин, які утворюють у воді гідрогель і підвищують її адгезивні властивості. Автори стверджують, що за своєю природою гідрогелі є структурованими двофазними колоїдними вільно зв'язаними дисперсіями, що складаються з високомолекулярних компонентів ПАР – дисперсної фази, заповнених і оточених дисперсійним середовищем, в цьому разі водою.

Пропонується гелеутворювальний порошок (являє собою порошок, який диспергується у воді), що складається з матеріалу твердої дисперсної фази і стабілізатора, чії властивості, на думку авторів, забезпечують:

- дезагрегацію дисперсної фази, що перешкоджає її седиментації;
- тиксотропну зміну в'язкості водно-дисперсної композиції;
- регульовану зміну теплопровідності залежно від матеріалу твердої дисперсної фази та його вмісту у використовуваній композиції;
- тривалу стабільність дисперсної системи, зокрема після часткового випаровування води, що забезпечує їй відновлюваність властивостей у разі повторного додавання води;
- можливість швидкого формування вогнегасної речовини у надзвичайних ситуаціях.

На думку авторів, ключовою особливістю таких стабілізованих композицій є, з одного боку, їх здатність перешкоджати доступу кисню повітря до зони горіння, за рахунок високої адгезії до поверхонь, що горять, а з іншого – більш швидка, ніж у води, здатність забезпечувати відведення тепла.

Пропонується його використання під час гасіння лісових пожеж за допомогою авіації. Автори стверджують, що застосування дасть змогу також мінімізувати процес пульверизації рідини за рахунок перетворення її у водний пил (аерозоль) і забезпечити, таким чином, підвищену купчастість вогнегасної маси під час її скидання. Отже, це допоможе суттєво збільшити мінімальну висоту роботи авіатехніки, до 250 м над рівнем землі, та внаслідок чого підвищити рівень безпеки.

Аналізуючи розглянуті матеріали стосовно створення гідрогелів для пожежогасіння, які підсилюють дію води, можна зазначити:

- усі вони складаються щонайменше з одного засобу для загущення та з одного рідкого середовища і можуть мати один або більше суспендувальних засобів;
- композиція зазвичай є концентратом, який може бути змішаний з водою або водним розчином для утворення гідрогелю для пожежогасіння, що підсилює дію води;

- концентрат може додатково містити одну або більше добавок. Прикладами добавок, які можуть бути в концентраті, є: солі, стабілізувальні та диспергувальні засоби, протимікробні та протигрибкові засоби, антиоксиданти, барвники, глини. Добавки можуть бути введені власними силами або в будь-якій комбінації будь-яких двох або більше добавок; композиція концентрату містить суспендувальний засіб, який може бути поверхнево-активною речовиною, емульгатором або обома речовинами відразу;

- засоби для згущення можуть бути твердими чи рідкими. Придатні засоби для загущення містять, наприклад, поліакрилати, камеді, крохмалі або їх комбінації, натрієву сіль карбоксиметилцелюлози або їх комбінації;

- як рідке середовище використовується харчова олія, гліцерин або поліетиленгліколь з низькою молекулярною масою або будь-яка їх комбінація. Харчова олія являє собою горіхове масло, олію, вичавлену з насіння, рослинну олію, рослинний жир або олію коноплі чи їх комбінацію;

- у пропонованих технологіях обов'язково регламентується в'язкість розчину концентрату або робочого розчину. Важливою характеристикою розчину є здатність розчину до адгезії. Під час реалізації гідрогель прилипає до поверхонь, на яких він застосовується. Гідрогель, що має зменшену в'язкість, застосовується (наприклад, шляхом розпилення) для затікання, покриття та/або зчеплення з поверхнями;

- у процесі подавання під час нанесення гелю його в'язкість зменшується (залежить від швидкості) та повертається до попередньої за нульової швидкості, тому гідрогель залишається на поверхнях, на які він був нанесений без стікання, або з мінімальним стоком порівняно із ВВР, що застосовуються в певний час для пожежогасіння;

- гідрогель рекомендують для придушення і/або гасіння вогню під час нанесення на поверхню, що горить, або для запобігання займанню вогню у разі нанесення на поверхню. Зазначається важливість забезпечення цільного перемішування складових у розчині під час їх змішування.

У роботі [69] пропонується подавання поперечно зшитих полімерних частинок у формі дисперсії рослинної олії з подальшим її подаванням як водо-поглинальної

добавки до води в кількості, що достатня для збільшення в'язкості отриманої суміші, вище 100 сП та її подавання на поверхню для запобігання та/або гасіння. Після поглинання води добавка має утримувати більш ніж 50 % від загальної кількості води. Важливо зазначити, що отриману дисперсію можна об'єднати з водою для отримання водно-добавкової суміші з достатньо високою в'язкістю, щоб суміш легко прилипала до вертикальних і горизонтальних поверхонь у функціональній товщині. Крім того, полімер, що міститься в дисперсії, має дуже короткий час наповнення водою і легко виводиться у пожежний рукав за допомогою стандартного обладнання для пожежогасіння та не потребує введення спеціалізованого обладнання та додаткових добавок. Оскільки дисперсія винаходу містить рослинну олію її використання, як добавки для боротьби з пожежами є екологічно сприятливим порівняно з полімерами на основі емульсії мінеральної оливи. Вибір олії та розмір частинок диспергованих поперечно-зшитих полімерних частинок, що наповнюється водою, визначається бажаною м'якістю / жорсткістю гелю, який утворюється після додавання дисперсії у воду для гасіння пожежі. Утворення іммобілізованого гелю (гель буде прилипати до вертикальної поверхні у разі контакту здебільшого відбувається приблизно за 3 с або менше. Зазвичай гель має в'язкість щонайменше приблизно 100 сП. Для зміни текучості гелю для конкретних вимог пожежогасіння рекомендовано [79] додавати до дисперсії поверхнево-активні речовини з високим ГЛБ, наприклад натрієву сіль карбоксиметилцелюлози (надалі – КМЦ), а поверхнево-активні речовини з низьким ГЛБ, наприклад з групи сорбітан моноолеату, рекомендовано використовувати для сприяння дисперсії сухих полімерних частинок у рослинній олії. У роботі [79] для забезпечення стабільності та текучості дисперсії використовували суспендувальний агент пінистий діоксид кремнію. Це дало змогу вводити дисперсію у водопостачання в рідкій формі.

Використання пінистого діоксиду кремнію, як зазначено у [79], не тільки забезпечує стабільність дисперсії, а й підвищує стабільність суміші вода-добавка (гелю) і дає змогу за більш низької концентрації добавки отримувати іммобілізований гель. Діоксид кремнію також схвалений як пряма харчова добавка.

У [70] рекомендовано застосовувати полімерні дисперсії, які включають або складаються з рослинної олії (наприклад, ріпакової олії), сорбітан моноолеату та пінистого кремнезему, що особливо доцільно з огляду на вимоги охорони здоров'я, безпеки навколишнього середовища, оскільки ці складові компоненти або харчові продукти схвалені як прямі харчові добавки.

Аналізуючи викладені матеріали, зазначимо, що:

- добавка може поглинати воду у значних кількостях відносно власної ваги;
- після того, як частинки добавки додані до вогнегасного розчину і поглинули воду до своєї ємності (доцільно за три секунди або менше), частинки можуть нести понад 90% води, яка використовується для гасіння пожежі;
- полімер переважно являє собою сухий, зшитий, здатний до набрякання у воді полімер у дисперсії рослинної олії;
- полімер може бути полімером гідрофільних мономерів, таких як акриламід, похідні акрилової кислоти, ангідрид малеїнової кислоти, похідними 2-акриламідо-2-метилпропансульфонової кислоти та інші гідрофільні мономеру;
- переважно, полімер є співполімером похідних акриламіду та акрилової кислоти;
- солі зазвичай можуть бути будь-якими одновалентними солями, але переважно є солями натрію або калію;
- в'язкість, що значно перевищує 100 сП і навіть перебуває в діапазоні від 500 сП до 50 000 сП, легко досягається і з користю використовується для зазначеної добавки;
- добавку зазвичай додають у воду в концентрації приблизно від 0,1 об.% до 2 об.%.

Добавка поєднує в собі властивості суперабсорбувального полімеру, оскільки він може поглинати значну кількість води порівняно зі своїм розміром і вагою та загусника з огляду на те, що отримана водно-добавкова суміш має відносно високу в'язкість.

Під час розпилювання водно-добавкової суміші на вертикальну або горизонтальну поверхню суміш прилипає до поверхні, тим самим гасить пожежу

та/або забезпечує розширений протипожежний захист конструкцій, розташованих поблизу пожежі. Коли суміш розпорошується на поверхні, водонавантажені полімерні частинки утворюють поверхні, складені одна на одну. Таке водне заповнення значно підвищує теплозахисні якості добавки. У роботах [79–81] під час дослідження займання дерев'яної стружки, обробленої більш ніж 0,025 % гелем у розчині, автори показали, що займання не відбувається. На рисунку 1.6 наведено фото процесу визначення часу займання деревини, обробленої розчином полімерного гелеутворювача, та загальний вид деревини, що перебуває під впливом полум'я. Відбувається піроліз нижнього шару обробленої гелем деревини та повільне випаровування нижнього прошарку гелю. Водночас температура на поверхні зразку не перевищує 100 °С. На рисунку 1.6 ілюструються частки гелю, який ще зберіг свої властивості утримуватися на поверхні разом з водою.



а

б

в

Рисунок 1.6 – Процес визначення часу займання деревини, обробленої розчином полімерного гелеутворювача:

- а) вигляд деревини через 400 с дії полум'я;
- б) вигляд зверху деревини через 500 с дії полум'я;
- в) вигляд знизу деревини через 500 с дії полум'я.

Аналізуючи дані, наведені в [81], можна висловити думку, щодо механізму захисту поверхні гелевим розчином. Якщо вогонь наближається до нижньої поверхні, зовнішні водо-навантажені полімерні частинки, які перебувають найближче до вогню, поглинають тепло, доки вода не досягне точки випаровування. Таким чином, водо-навантажені полімерні частинки, які перебувають зверху, захищені, поки вода нижніх навантажених полімерних часток випаровується. Потім відпрацьовує



досягає вогню, а й використовується її менше, ніж під час застосування простої води або навіть звичайних добавок, таких як вогнегасна піна. Крім того, у разі простого застосування води більша її частка, яка подається безпосередньо на вогонь (і не випаровується), стікає або вбирається землею і, таким чином, витрачається даремно.

Завдяки цим властивостям добавки водно-добавкова суміш також придатна для використання як штучна протипожежна смуга розриву під час гасіння лісових або чагарникових пожеж. Суміш можна розпорошити напередодні пожежі, і вона вкріє конструкцію, наприклад кущі та дерева, таким чином, що вогонь не поширюватиметься, коли він досягне обробленої ділянки, даючи змогу загасити полум'я, не просуваючись далі. Це завдає значно меншої шкоди, ніж використання звичайних засобів, наприклад використання бульдозерів або контрольоване спалювання, щоб розчистити територію для протипожежного захисту.

За підсумками аналітичних досліджень встановлено вимоги щодо властивостей ВВР на основі поліакрилату для гасіння пожеж речовин і матеріалів класу А та В і для протидії розвитку та забезпечення ліквідації низових пожеж в екосистемах:

- необхідно передбачити можливість оперативного приготування робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини із заздалегідь створеного концентрату;
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини повинен бути однорідним без розшарувань;
- в'язкість робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини повинна бути в межах від 250 сП до 3000 сП;
- полімерна добавка повинна поглинати та утримувати більше 50 мас.% води від її загальної кількості;
- для забезпечення подавання робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини до осередку пожежі необхідно, щоб речовина мала тиксотропні властивості;
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини повинен мати показник адгезії не менше ніж у 5 разів вищим порівняно із водою для забезпечення підвищеної адгезії до твердих поверхонь, що проявляється, зокрема, у здатності утримуватися на вертикальних і похилих поверхнях;

- розмір частинок полімеру має становити до 200 мкм, що забезпечить тривалість наповнення частинок полімеру до 150 с;
- для забезпечення стабільності системи робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини у своєму складі повинен мати стабілізатор (наприклад, діоксиду кремнію) та поверхнево-активну речовину з низьким гідрофільно-ліпофільним балансом (до 2 об. %);
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини повинен забезпечувати нормовану кратність та стійкість утвореної піни;
- використання модифікованої вогнегасної речовини має забезпечувати підвищену ефективність гасіння порівняно з аналогами вогнегасних речовин та запобігати повторному займанню речовин і матеріалів пожеж класів А та В;
- рецептура модифікованої вогнегасної речовини має складатись із екологічно безпечних та біорозкладних компонентів.

#### **1.4. Висновки до розділу**

1. Перспективним напрямом створення концентратів ВВР є використання дисперсій поперечно-зшитих полімерів у рослинній олії, які забезпечують підвищення в'язкості робочих розчинів (понад 100 сП), утримання більше 50 мас.% води та формування стійкого адгезійного шару на поверхнях.

2. Полімерна система має характеризуватися швидким водонаповненням, можливістю подавання стандартним пожежним обладнанням та формуватися шляхом диспергування подрібнених полімерів (10–200 мкм) у рослинній олії з використанням поверхнево-активних речовин із низьким ГЛБ і стабілізаторів.

3. Використання гідрофільних полімерів (поліакрилат натрію (надалі – ПА), поліакриламід (надалі – ПАА)) дає змогу поєднати властивості суперабсорбентів і загусників, забезпечуючи утворення гелевих систем, що ефективно утримують воду, зменшують її витрати та підвищують ефективність гасіння пожеж різних класів.

4. Застосування ПАР з різним ГЛБ та стабілізаторів, зокрема діоксиду кремнію, забезпечує стабільність, регулювання реологічних властивостей і утворення

однорідного гелю, водночас екологічно доцільними є системи на основі рослинних компонентів.

5. Розроблення нових ВВР має базуватися на аналізі сучасних аналогів із підвищеною в'язкістю (від 250 сП до 3000 сП) та враховувати відсутність рецептур піноутворювачів у відкритих джерелах інформації, а досягнення необхідних реологічних властивостей доцільно забезпечувати шляхом введення гелеутворювальних полімерів з адаптацією складів до гасіння пожеж класів А і В.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ ПОЛІАКРИЛАТУ НАТРІЮ

### 2.1. Визначення компонентів рецептури водної вогнегасної речовини

**Рідке середовище.** Гідрогельоутворювальний концентрат може бути сумішшю твердих компонентів (порошок) або рідкою суспензією / розчином, який змішують з водою для утворення гідрогелю для пожежогасіння, що посилює дію води. Попереднє розчинення або суспендування компонентів концентрату в рідкому середовищі може полегшити її змішування з водою і потенційно збільшити швидкість і/або легкість, з якою утворюється гідрогель. До нього належать харчові олії (бажано рафінована форма), гліцерин і низькомолекулярний поліетиленгліколь. Також концентрат може містити суміш із декількох рідких середовищ, до якого належать і ПАР з низьким рівнем ГЛБ, наприклад сорбітан моноолеат.

**Суспендуючі засоби.** Рідкі концентрати, утворені з твердих компонентів (наприклад, засобів для загущення), суспендовані або розчинені в рідкому середовищі (наприклад, олії), можуть виявляти осідання твердих компонентів з часом. Для запобігання осадження рідкий концентрат повинен бути фізично перемішаний для повторного суспендування або повторного розчинення його компонентів. У рідкий концентрат може бути доданий суспендувальний засіб (наприклад, поверхнево-активна речовина або емульгатор) або комбінація суспендувальних засобів для стабілізування композиції або полегшення утримання твердих компонентів, суспендованих або розчинених в рідкому середовищі, або без обмеження за часом, або протягом періоду часу, достатнього для підтримки корисності концентрату для утворення гідрогелю. Приклади нетоксичних ПАР та/або емульгаторів – це летицини, лізолецитині, полісорбати, казеїнат натрію, моногліцериди, жирні кислоти, жирні спирти, гліколіпіди та/або білки. Доцільно, щоб ПАР та/або емульгатори мали рідку форму. Такі рідкі ПАР легше змішуються з рідким середовищем концентрату та запобігають підвищенню в'язкості концентрату та/або в'язкості гідрогелю, що утворився після розведення концентрату водою. Цей ефект ПАР або їх комбінації

виникає в результаті суспензійної дії та/або за рахунок збільшення кількості матеріалу, який може міститися в концентраті або гідрогелі, що виходить.

**Добавки.** Можливі й інші компоненти або добавки, що можуть бути додані в концентрат, щоб впливати на/або змінювати одну або декілька властивостей концентрату чи гідрогелю, утвореного з концентрату.

Можуть бути додані добавки, що впливають на в'язкість та/або стабільність концентрату та/або одержуваного гідрогелю. Додаткові добавки, які можуть міститися в цьому концентраті та композиціях гідрогелю, містять модифікатори рН, диспергувальні засоби (наприклад, поверхнево-активні речовини, емульгатори, глини), солі, антимікробні засоби, протигрибкові засоби та барвники, наприклад, буру, бікарбонат натрію, сульфат натрію, сульфат магнію, які можуть впливати на в'язкість та/або стабільність гідрогелю, хітозан або епсілон-полілізін як протимікробні засоби, пектин, який може допомогти в утворенні гідрогелів.

Концентрат отримують за допомогою змішування компонентів у довільному порядку зазвичай в умовах навколишнього середовища. Відносні кількості кожного компонента, зокрема засоби для загущення, рідкого засобу і, якщо є, засобу, що суспендує, вибирають на основі (принаймні частково) бажаної в'язкості концентрату.

**Утворення та застосування гідрогелю.** Гідрогель для пожежогасіння може бути утворено за допомогою змішування концентрату, як описано вище, з водою чи водним розчином, а потім застосовано щодо цільових об'єктів для гасіння чи запобігання пожежі. Устаткування для пожежогасіння, придатне для застосування гідрогелів, містить пристрої для змішування концентрату з водою або водним розчином та пристрої для розпилення отриманого гідрогелю на цільові об'єкти. Приклади обладнання для гасіння вогню включають наплічники, обладнані розпилювальною насадкою, або спринклерні системи. Обладнання для гасіння вогню можуть встановлюватися на таких транспортних засобах, як вантажівка, літак або вертоліт. Гідрогель застосовують для гасіння вогню із застосуванням пожежних автомобілів або інших пожежних транспортних засобів, зокрема літальних апаратів. Гідрогельутворювальний концентрат додають до резервуара заповненого водою, та/або до іншої портативної ємності і змішують з водою через циркуляційний гідрант

або його еквівалент; гідрогель викачують після утворення з резервуара і наносять гідрогель на цільові об'єкти (наприклад, на будівлі або елементи ландшафту) за допомогою жорсткого всмоктувального рукава або еквівалентного обладнання.

Концентрат доцільно додавати безпосередньо до водяного бака на борту транспортного засобу або вручну, або за допомогою системи закачування і змішують у вигляді циркуляції в резервуарі.

Склад концентрату потрібно додавати до піноутворювачів із застосуванням надалі технології гасіння піною. Концентрати можуть бути додані до системи водопостачання спринклерної системи таким чином, що у разі активації внаслідок нагрівання, диму та/або виявлення пожежі система розпоршує гідрогель.

**Загальний спосіб отримання рідких концентратів.** Усі сухі інгредієнти зважували за допомогою електронних ваг і komponували в хімічній склянці. Зазначені інгредієнти повільно змішували за допомогою шпателя до отримання однорідної сухої суміші.

Необхідну кількість вибраного рідкого середовища (наприклад, олії) вимірювали із застосуванням градуйованого циліндра, потім додавали в хімічну склянку, що містить зазначену суху суміш, і повільно перемішували шпателем. Рідкий концентрат потім вважали готовим до застосування.

**Загальний спосіб отримання гідрогелів.** Одержання гідрогелю із наведеного вище рідкого концентрату містило етап змішування рідкого концентрату зі свіжою водопровідною водою у хімічній склянці об'ємом 150 мл. Потім компоненти ретельно перемішували у гомогенізаторі ІКА Т25 (8600 об/хв протягом 10 с), після чого утворювався гідрогель.

## **2.2. Методи проведення досліджень із визначення випаровуваності, здатності до адгезії (прилипання), в'язкості та взаємодії із різними компонентами**

Окрім значної кількості позитивних властивостей вода як вогнегасна речовина має низку недоліків, одним із яких є низький коефіцієнт її використання під час гасіння пожеж класу А. Великі втрати води у разі гасіння пожеж в основному

зумовлені стіканням з вертикальних і похилих поверхонь та явищем плівкового кипіння.

Для зменшення втрат води під час гасіння практикують введення до вогнегасного розчину загусників і змочувачів. Це дає змогу знизити її втрати за рахунок стікання, але кардинально не вирішує проблему стікання таких розчинів із вертикальних та похилих поверхонь. Для розширення можливостей води використовують різні органічні та неорганічні добавки, що модифікують її властивості. Найбільших можливостей щодо поліпшення вогнегасних характеристик води досягають через застосування композицій різних добавок. Добавки вносять свій специфічний внесок у зміну фізико-хімічних характеристик води, які можуть підвищити її вогнегасні властивості. Змочувачі та ПАР – знижують поверхневий натяг води, сприяють її розпорошенню на більш дрібні краплі, збільшують змочуваність горючих матеріалів, забезпечують утворення суцільного шару на поверхні горючого матеріалу з метою ізоляції його від кисню повітря. Загусники на основі водних розчинів термостійких полімерів впливають на в'язкість водного розчину, утворюють стабільні плівки на поверхні горючих матеріалів. Недоліком вогнегасних гелів на основі високомолекулярних органічних речовин [64,66,69] та технологій їх отримання є можлива втрата теплоізоляційних властивостей після випаровування води, можливість грудкування під час взаємодії з водою, необхідність ретельного змішування гелеутворювального концентрату і води в розчині, що ускладнює як розпилення гелю, так і обслуговування технічних засобів подавання після гасіння пожежі.

Одним із напрямів, усунення вказаних вище недоліків є створення рідких стабілізованих концентратів гелеутворювальних сполук із подальшим їх розчиненням у воді, або з проміжним розчиненням у піноутворювачі.

Для досягнення ефективності застосування добавки залежно від класу пожежі можливе використання як високопоглинальних нерозчинних полімерів, зокрема поліакрилату, так і водорозчинних полімерів з високою молекулярною масою, поліакриламід.

Деякі з цих добавок [82,83] являють собою полімери, що розбухають у воді, такі як зшиті акрилові або акриламідні полімери, які можуть поглинати воду, маса якої багаторазово перевершує їхню власну масу, однак не розчиняються у воді. Потім ці речовини наявні як частинки гелю, які сильно набрякають внаслідок гідратації та диспергують у воді для гасіння пожежі (рисунок 2.1). Якщо додати до настільки набряклих частинок гелю надлишок води, остання залишиться як чиста водна фаза обгортаючи гелеподібні частинки. Ці дисперговані у воді частинки під час їхнього розпоршення безпосередньо на вогонь налипають на поверхню та поступово випаровуються, що зменшує кількість часу та масу води, необхідних для гасіння пожежі.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд високо поглинального нерозчинного полімеру ПА, розчиненого у воді

Для проведення експериментальних досліджень фізико-хімічних властивостей ВВР як складових добавок для покращення експлуатаційних характеристик застосовувалися:

- нерозчинний високопоглинальний поліакрилат (зшитий сополімер калієвої і амонійної солей акрилової кислоти), що поглинає воду, (маса якої багаторазово перевищує його власну), утворюючи гелеподібні частинки, сумісні з ПАР та мінеральними високо-дисперсними добавками, фракційністю від 20 меш до 60 меш,

за концентрації у воді від 0,01% до 0,5%;

- пінистий колоїдний діоксид кремнію як суспендувальний агент для регулювання стабільності та текучості дисперсії;

- рафінована ріпакова олія як рідке середовище та емульгатор;

- сорбітан моноолеат як ПАР з низьким ГЛБ для сприяння дисперсії сухих полімерних частинок у рослинній олії;

- натрієва сіль карбоксиметилцелюлози як загусник та для коригування в'язкості розчину.

Як ПАР також використовували плівкоутворюючі піноутворювачі закордонного та вітчизняного виробництва – типу AFFF.

#### **У роботі досліджували:**

- випаровуваність розчину на основі гелеутворювальної речовини ПА (надалі – гідрогель) у статичному стані залежно від її концентрації;

- здатність до адгезії (прилипання) гідрогелю залежно від концентрації гелеутворювача у розчині;

- в'язкість гідрогелю залежно від концентрації гелеутворювача у розчині;

- взаємодія гідрогелю з різними можливими компонентами.

#### **Випаровуваність розчину на основі гелеутворювальної речовини ПА у статичному стані залежно від її концентрації**

Для кількісної оцінки величини випаровування вогнегасних речовин у статичному стані (за відсутності руху повітря) проведено досліді [84] таким чином:

- чашки Петрі, що використовувались як ємності з відкритою поверхнею, наповнювались досліджуваним розчином;

- вимірювалась маса досліджуваного розчину з періодичністю в 24 год (за допомогою ваг з точністю зважування  $\pm 0,01$  г);

- вимірювалась зовнішня поверхня досліджуваного розчину кожної з чашок Петрі (за допомогою штангенциркуля з точністю  $\pm 0,25$  мм);

- усі вимірювання проводилися протягом 144 год в умовах температури ( $20 \pm 2$ ) °С, атмосферному тиску ( $750 \pm 5$ ) мм, та вологості повітря ( $72 \pm 5$ ) %.

Оброблення одержаних даних проводилося таким чином. Відносна середньодобова втрата маси  $j$ -го складу досліджуваного розчину обчислювалась за формулою (2.1):

$$m_{R,j} = \frac{1}{n} \cdot \sum_i^n \left( \frac{m_{j,i+1} - m_{j,i}}{m_{j,i}} \right) \cdot 100\% , \% , \quad (2.1)$$

де  $m_{R,j}$  – відносна середньодобова втрата маси для  $j$ -го складу досліджуваного розчину, %;

$n$  – кількість днів спостереження;

$m_{j,i}$  – маса чашки Петрі разом з досліджуваним розчином під час  $i$ -ї доби спостереження, г.

Випаровуваність середньодобова для кожного  $j$ -го складу досліджуваного розчину обчислювалась за формулою (2.2):

$$R_j = \frac{m_{Rj}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_j^2} , \text{ кг/м}^2 , \quad (2.2)$$

де  $R_j$  – випаровуваність середньодобова для  $j$ -го складу досліджуваного розчину, кг/м<sup>2</sup>;

$D_j$  – внутрішній діаметр чашки Петрі для  $j$  складу досліджуваного розчину, м.

Величина відносної випаровуваності у статичному стані (за одиницю приймалася випаровуваність середньодобова для дистильованої води) для кожного складу досліджуваного розчину обчислювалась за формулою (2.3):

$$V_j = \frac{R_j}{R_0} , \quad (2.3)$$

де  $V_j$  – відносна випаровуваність для  $j$  складу досліджуваного розчину;

$R_j$  – випаровуваність середньодобова для  $j$ -го складу досліджуваного розчину,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$R_0$  – випаровуваність середньодобова для дистильованої води,  $\text{кг}/\text{м}^2$ .

Результати дослідів із визначення залежності випаровуваності вогнегасних речовин у статичному стані наведені у додатку В. У таблиці 2.1 наведено зведені дані про залежність випаровуваності вогнегасних розчинів від відсоткового складу гелеутворювача, а на рисунку 2.2 – її графічна залежність.

Таблиця 2.1 – Залежність випаровуваності розчинів від відсоткового складу полімеру

Вміст гелеутворювача	Відносна втрата маси, (mR)	Випаровуваність добова, ( $R_j$ )	Відносна випаровуваність (V)
%	%	$\text{г}/\text{м}^2$	%
0,00	2,09	476,02	100,0
0,05	1,81	449,55	94,4
0,10	1,75	445,19	93,5
0,20	1,71	434,17	91,2
0,30	1,70	429,18	90,2
0,40	1,66	424,56	90,0
0,50	1,59	418,79	89,9

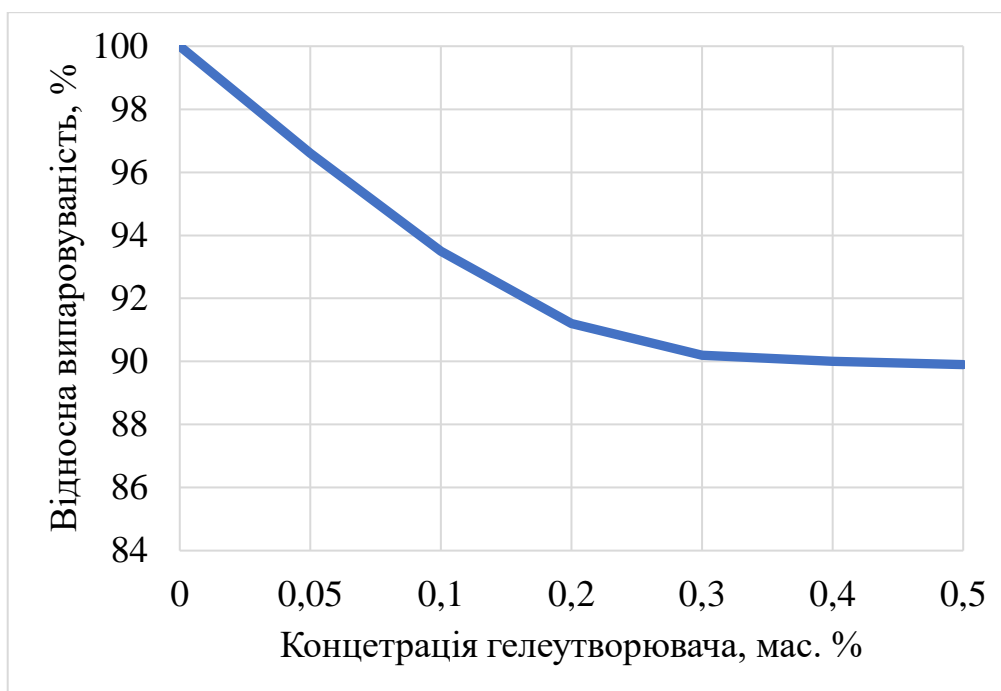


Рисунок 2.2 – Залежність випаровуваності розчинів від концентрації полімеру

Випаровуваність досліджуваних рідин у статичному стані для гідрогелю на основі ПА за типових значень процентного вмісту полімерного гелеутворювача (0,3%) становить близько 90% (відносно випаровуваності води).

### **Здатність до адгезії (прилипання) гелевих вогнегасних речовин залежно від концентрації гелеутворювача у розчині**

Щоб визначити адгезію гідрогелів до дерев'яних дощочок [1,85], останню, розміром 100×50×8 (А×В×С) мм, зважували, перед тим, як дощочка буде занурена у гідрогель на глибину 50 мм протягом 60 с. Після видалення дощочки з гідрогелю, її суспендували протягом 10 хвилин та знову зважували. Маса гідрогелю, що залишалася прилиплою до поверхні, розраховували з різниці в масі до і після занурювання. Потім визначали товщину утвореної плівки гідрогелю з огляду на його маси та площі поверхні зануреної до гелевого розчину. Отримані результати наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Адгезія гелеутворювача до дерев'яних дощочок залежно від його концентрації

Концентрація гелеутворювача у розчині, мас. %	1	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
№ дощечки	1	2	3	4	5	6
Вага чистої дощечки, г	12,44	13,41	13,23	13,62	16,44	15,92
Вага дощечки після 10 хв суспендування	13,35	14,09	13,76	14,01	16,70	16,15
Вага гелю на дощечки, г	2,24	0,69	0,53	0,39	0,26	0,23
Вага гелю мг/см <sup>2</sup>	0,0224	0,0160	0,126	0,0090	0,0054	0,0034
Товщина утвореної гелевої плівки, мм	0,0210	0,0150	0,0120	0,0085	0,0049	0,0032

У графічному вигляді результати дослідів визначення величини здатності до прилипання для гелеутворювача на основі ПА зображені на рисунку 2.3.

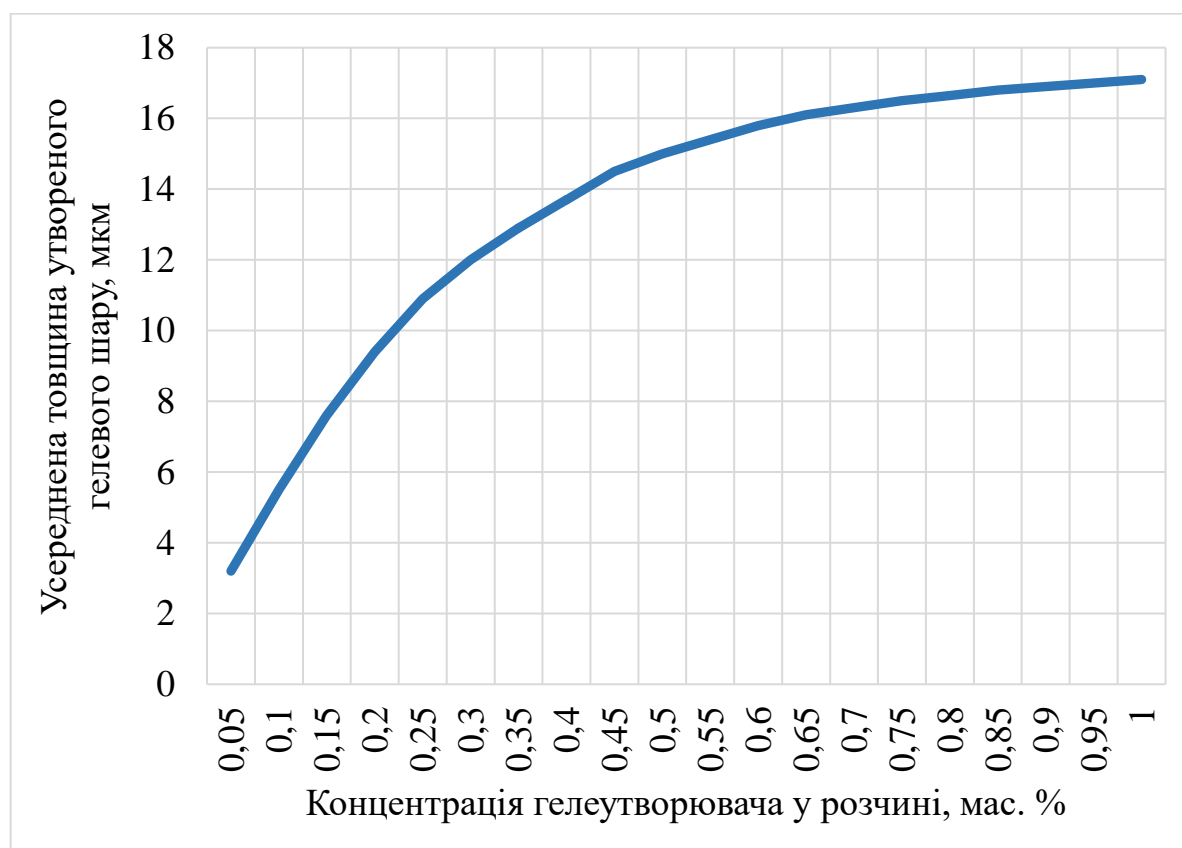


Рисунок 2.3 – Залежність адгезійних показників гелевого розчину залежно від концентрації гелю

## **В'язкість розчину на основі гелеутворювальної речовини ПА залежно від її концентрації**

Величина в'язкості важлива для визначення раціональної концентрації водної вогнегасної речовини на основі ПА, адже чим вона більша, тим краще вогнегасна рідина утримується на поверхні, з іншого боку, рух рідини через всі деталі механізмів, через які вона проходить має досить високу швидкість, що потребує невисокої величини в'язкості. Отже, під час розроблення раціональної концентрації особливу увагу приділено вимірам в'язкості.

Відомо, що сухі полімерні частинки ПА потребують певного часу для змішування з водою, а також перемішування для більшої однорідності. Час, потрібний для наповнення капсульованих твердих гранульованих частинок ПА (тобто розширення від поглинання води), становить від десяти секунд до декількох хвилин. За відсутності цих умов відбувається аглютинація (склеювання в грудки і випадання в осад). Таким чином важливо розробити концентрат попередньо для швидкого та якісного змішування з водою вже готового концентрату. З огляду на зазначене до складу концентрата, крім ПА вводиться рапсова олія, що є диспергатором для такої суміші. Вона утворює тонку оболонку навколо гранульованих часток ПА, що не їм дає змоги склеюватися у суміші. Крім того, полімер ПА у суміші рапсової олії має дуже короткий час набухання (для поглинання води) і легко виводиться у пожежний рукав за допомогою стандартного обладнання для пожежогасіння. Для утримання частинок у такому диспергованому стані до суміші додається ще суспендувальний агент – діоксид кремнію (Аеросил А-80).

Необхідність в експериментальному дослідженні в'язкості вогнегасних речовин пов'язана зі створенням концентратів ВВР на основі гелеутворювальних сполук. У разі використання гідрогелю, отриманого з цих концентратів, як вогнегасної речовини маємо дуже високі значення діапазону в'язкості. Залежно від складу вогнегасної речовини та умов дослідження значення в'язкості гідрогелю, відрізняються приблизно 20000 разів від: 1 сП до 21723 сП. Для вимірювання динамічної в'язкості [1,81,82,86,87] використовувались 2 методи:

- метод 1. Для вимірів, близьких до нижньої межі діапазону (динамічна в'язкість від 0,05 сП до 1,5 сП) вимірів використовувався метод вимірювання динамічної в'язкості на основі закону Пуазейля (ламіарна течія у капілярі) з використанням наявного спеціального обладнання для вимірів в'язкості – прилад ВПЖ-1;

- метод 2. Для вимірів у середині діапазону (динамічна в'язкість від 1,5 сП до 40 сП), або близьких до верхньої межі (динамічна в'язкість від 40 сП та вище) використовувався метод вимірювання уявної динамічної в'язкості (apparent dynamic viscosity) Стокса (падіння кульки в рідинному середовищі вздовж осі трубки) з відповідними для кожного для цих двох діапазонів математичних моделей.

Вимірювання уявної динамічної в'язкості методом 2 виконувалося шляхом відеозйомки та подальшого оброблення відеофайлу з використанням комп'ютерної системи Movavi Video Suite 17.5.0, за допомогою якої обчислювались висота та час падіння кульки у випробуваному середовищі, що показано на рисунку 2.4.

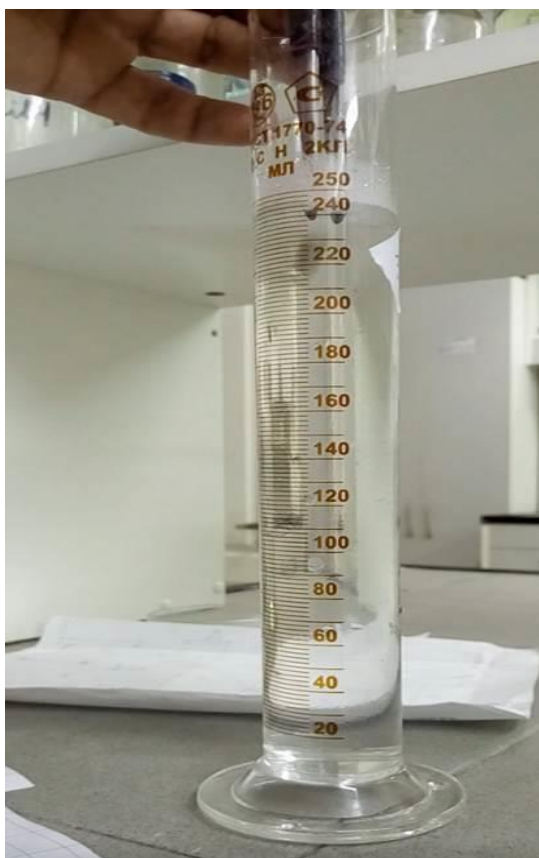


Рисунок 2.4 – Вимірювання величини в'язкості ВВР методом 2

Досліджувалась залежність уявної в'язкості (apparent viscosity) гідрогелю від концентрації гелеутворювача та величини градієнта швидкості (velocity gradient) або швидкість відносної деформації зсуву (shear rate) за різних умов руху гідрогелю. У разі зміни концентрації гелеутворювача від мінімальної 0 % до максимальної 2 % змінювались фізичні властивості рідин від характерних для ньютонівських рідин до неньютонівських псевдопластичних (pseudoplastic liquids), для яких характерне зменшення уявної в'язкості (apparent viscosity) під час зростання напруження зсуву (shear stress) та тиксотропних (thixotropic liquids), для яких характерним є залежна від часу уявна в'язкість в умовах сталого градієнта швидкості.

Вимірювання методом 2 значень у середині діапазону, а саме – в'язкість від 1,5 сП до 40 сП, що відповідає часу падіння кульки у середовищі рідини, в'язкості, яку ми вимірюємо: від 0,2 с до 0,7 с.

З огляду на величину в'язкості у вказаному діапазоні відбувається прискорений рух кульки (рисунки 2.5 а). Для цього разу (вимірів у середині діапазону) розроблено математичну модель руху з прискоренням кульки у рідинному середовищі. Сила спротиву руху кулі може бути виражена як загальне рівняння Ньютона:

$$F_{fr}(t) = \xi(Re(t)) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2}, \text{ Н}, \quad (2.4)$$

де,  $t$  поточний час руху кульки, с;

$\xi(Re(t))$  – коефіцієнт гідравлічного спротиву кулі, що рухається у середовищі гідрогелю, який визначається на основі критерію Рейнольдса;

$S$  – площа поперекового перетину кулі, м<sup>3</sup>;

$\rho_g = 1100$ , густина гелю, кг·м<sup>-3</sup>;

$\omega(t)$  – швидкість руху кулі у середовищі гідрогелю, м·с<sup>-1</sup>.

Рівняння, що описує динаміку руху кулі має вигляд (2.5):

$$m \cdot \frac{d}{dt}(\omega(t)) = m \cdot (\rho_d - \rho_g) - F_{fr}(t), \text{ Н}, \quad (2.5)$$

де  $m$  – маса кулі, кг,

$\rho_d = 7800$ , густина кулі,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Для розрахування коефіцієнта гідравлічного спротиву обтікання кулі вибрано модель Glift та Gauvin (Glift and Gauvin), яка з точністю до 2% відповідає кривій Релея у діапазоні:  $0,1 < \text{Re} < 200000$  (2.6):

$$\xi(\text{Re}(t)) = \frac{24}{\text{Re}(t)} \cdot \left( 1 + 0.15 \cdot \text{Re}(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{\text{Re}(t)^{1.16}}} \right), \quad (2.6)$$

Отже, величина критерію Рейнольдса, розраховується за традиційною формулою (2.7):

$$\text{Re}(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)}, \quad (2.7)$$

де  $d$  – діаметр кулі, м.

Тоді, використовуючи 2.4 - 2.7 отримаємо математичну модель руху кулі у середовищі гідрогелю для визначення взаємної залежності часу падіння кулі між довжиною падіння та в'язкістю у вигляді загальної системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}(\omega(t)) = (\rho_d - \rho_g) - \frac{24}{\text{Re}(t)} \cdot \left( 1 + 0.15 \cdot \text{Re}(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{\text{Re}(t)^{1.16}}} \right) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2} \\ \text{Re}(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)} \\ L = \int_{t_0}^{t_f} (\omega(t)) dt \end{array} \right. \quad (2.8)$$

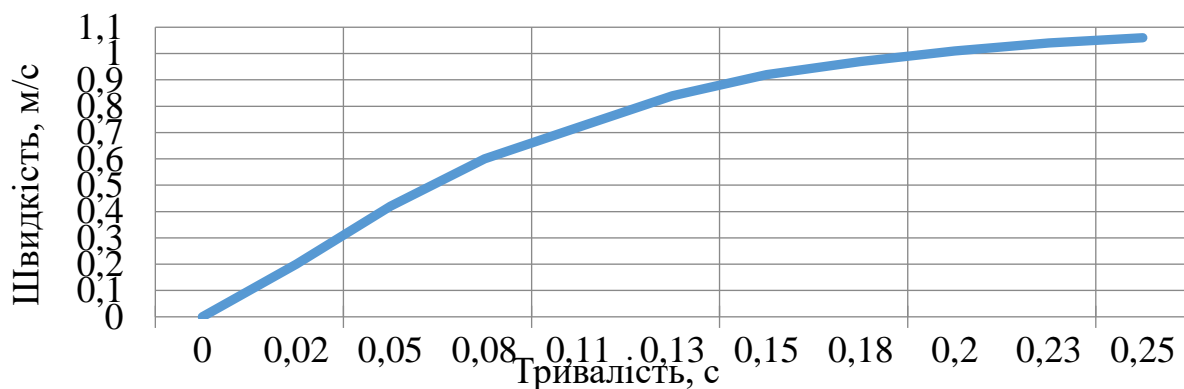
де  $L = 0,25$  – довжина падіння кулі, м;

$t_0, t_f$  – час початку та кінця падіння кулі, с;

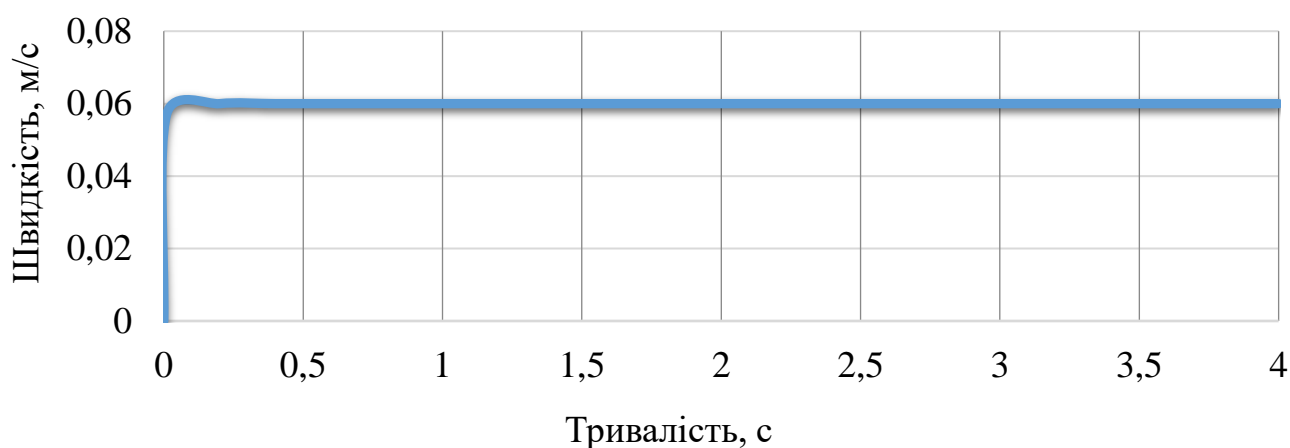
$\mu(\omega(t))$  – уявна динамічна в'язкість, Па·с.

Вимірювання методом 2 значень у діапазоні величин в'язкості близьких до верхньої межі, а саме: динамічна в'язкість від 40 сП і вище, що відповідає часу падіння кульки у середовищі рідини, в'язкість, яку ми вимірюємо – від 0,7 с і більше.

З огляду на величини в'язкості у вказаному діапазоні має місце рух кульки практично з постійною швидкістю (рисунок 2.5. б).



а



б

Рисунок 2.5 – Залежність швидкості процесу падіння від часу падіння кульки в умовах проведення дослідів на наявному обладнанні:

а) за значень динамічної в'язкості у середньому діапазоні;

б) за високих значень динамічної в'язкості, що близькі до верхньої межі

Для цього випадку (вимірів високих значеннях динамічної в'язкості близьких до верхньої межі) використано відому математичну модель руху з постійною швидкістю кульки у рідинному середовищі – модель Стокса з уточненням Ладенбурга:

$$\mu = \frac{D_s^2 \cdot (\rho_F - \rho) \cdot g \cdot t_{fin}}{18 \cdot L \cdot \left(1 + 2.4 \cdot \frac{D_s}{D_{tube}}\right)}, \text{ М}^3, \quad (2.9)$$

де  $\omega(t)$  – поточна швидкість кульки, м/с;

$D_s$  – діаметр кульки, м;

$D_{tube}$  – діаметр циліндра, м

$\rho, \rho_F$  – густина випробуваної рідини та сталі, кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9.81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$  – прискорення вільного падіння;

$\mu$  – величина динамічної в'язкості випробуваної рідини, Па·с;

$t$  – поточний час, с;

$L$  – довжина падіння кульки, м.

### **Знаходження регресійної моделі залежності в'язкості водного середовища гелю від процентного вмісту ПА**

Результати експериментів з вимірювання в'язкості робочого розчину від вмісту гелеутворювача ПА у водному середовищі та у межах концентрацій, що забезпечують максимальний діапазон динамічної в'язкості, наведені у таблиці 2.3 та на рисунку 2.6.

Таблиця 2.3 – Залежність уявної динамічної в'язкості від концентрації гелеутворювача ПА у водному середовищі

№ досліду	Концентрація ПА, %	Час падіння кулі, с	Динамічна в'язкість, Па·с
1	0,00	0,36	0,001
2	0,05	0,44	0,007
3	0,10	0,67	0,040
4	0,15	1,09	0,120
5	2,00	8,25	8,000
6	2,50	10,27	9,000
7	3,00	30,36	2040,000
8	3.50	128,08	23030,000

### Знаходження формули залежності в'язкості від концентрації ПА

Був проведений регресійний аналіз проведених дослідів залежності в'язкості водного середовища гелю від концентрації гелеутворювача (ПА) згідно з методикою, викладеною в [88,89]. На основі проведених дослідів була застосована як первинна формула нелінійної регресії цієї залежності:

$$\mu(p) = \vartheta_0 \cdot \exp(\vartheta_1 \cdot p); \quad (2.10)$$

де,  $\mu(p)$  – в'язкість водного середовища гелю, сПа,

$p$  – концентрація гелеутворювача (ПА), %,

Для знаходження невідомих величин – коефіцієнтів  $\vartheta_i$  та оцінки достовірності отриманих значень був проведений регресійний аналіз з використанням лінеаризації формули (2.10), яка, очевидно є нелінійною:

$$\begin{aligned} \ln(\mu(p)) &= \ln(\vartheta_0) + \vartheta_1 \cdot p; \\ y^* &= \ln(\mu(p)); \beta_0 = \ln(\vartheta_0); \beta_1 = \vartheta_1; \\ y^* &= \beta_0 + \beta_1 \cdot p; \end{aligned} \quad (2.11)$$

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів  $\beta_i$  методом найменших квадратів на основі лінійної алгебри подані у таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 - Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів  $\beta_i$ : матриця незалежної змінної «р» - відсотковий вміст гелеутворювача та матриця відгуку «у\*»

Дослід №	р		у*
	$p_0$	$p_1$	
1	1	0,00	-6,908
2	1	0,05	-3,219
3	1	0,1	-2,526
4	1	0,15	-2,120
5	1	0,2	2,079
6	1	0,25	7,197
7	1	0,3	7,621
8	1	0,35	10,045

Величина коефіцієнтів  $\beta_i$  та  $\vartheta_i$  обчислена за формулами (4, 5):

$$\begin{aligned} \beta &= (p^T \cdot p)^{-1} \cdot p^T \cdot y^* = \begin{vmatrix} -7,1677748 \\ 45,915658 \end{vmatrix}; \\ \vartheta &= |\exp(\beta_0) \cdot \beta_1|^T = \begin{vmatrix} 8,61542 \cdot 10^{-4} \\ 48,8499 \end{vmatrix}; \end{aligned} \quad (2.12)$$

Використовуючи отримання значення коефіцієнтів, отримуємо значення в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою та різницю між цими значеннями й фактичними результатами дослідів (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5 – Значення в'язкості згідно з отриманою регресійною моделлю та різницею між цими значеннями й фактичними результатами дослідів

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою	0,001000	0,009900	0,114000	1,310900	15,077200	173,41300	1994,5434	22940,595
Різниця з фактично отриманими даними	- 0,00010	0,03009	- 0,03397	- 1,19087	- 7,07722	- 164,4132	45,4566	89,40542

### Оцінка адекватності регресійної моделі. Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів моделі (t- Стьюдент)

Для оцінки точності та достовірності отриманих результатів використано метод лінеаризації, що здійснюється розкладанням функції  $\mu(p, \theta)$  (в'язкість водного середовища гелю) у ряд Тейлора навколо знайденої точки  $\theta$ , (рівняння 2.11), зберігаючи лише лінійні члени:

$$Z_0 = \frac{\partial}{\partial \vartheta_0} (\vartheta_0 \cdot \exp(\vartheta_1 \cdot p)) = \exp(\vartheta_1 \cdot p);$$

$$Z_1 = \frac{\partial}{\partial \vartheta_1} (\vartheta_0 \cdot \exp(\vartheta_1 \cdot p)) = \vartheta_0 \cdot p \cdot \exp(\vartheta_1 \cdot p);$$
(2.13)

Величини розрахованих значень часткових похідних «Z» наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Значення розрахованих величин «Z»

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення «Z <sub>0</sub> »	1,27700	11,50200	132,2890	1521,541	17500,269	201282,44	2315085,728	2315085,728
Значення «Z <sub>1</sub> »	0,00001	0,0005	0,0114	0,19663	3,01544	43,35332	598,363	8029,208

Величина незміщеної дисперсії різниці між значеннями в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою та фактичними результатами дослідів.

$$\begin{aligned} SS_{Res} &= \sum_{i=0}^{i=n-1} (\Delta y_i)^2 = 37142861; \\ df_{Res} &= n - q = 8 - 2 = 6; \\ \sigma^2 &= \frac{SS_{Res}}{df_{Res}} = 6190,477; \end{aligned} \quad (2.14)$$

де,  $SS_{Res}$  – сума квадратів різниць між значеннями, отриманими за формулою нелінійної регресії з обчисленими коефіцієнтами та фактично отриманими даними в'язкості;

$df_{Res}$  – число ступенів свободи;

$n$  – кількість дослідів;

$q$  – кількість невідомих коефіцієнтів у формулі нелінійної регресії;

$\sigma^2$  - величина незміщеної дисперсії математичного очікування квадратів різниць між обчисленими за регресійною формулою та фактичними значеннями в'язкості.

Величина стандартного відхилення значень коефіцієнтів « $\beta_i$ » [89]:

$$\sigma_{\vartheta} = \text{diag} \left( \sqrt{(Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot \sigma^2} \right) = \begin{vmatrix} 2,35 \cdot 10^{-4} \\ 0,78 \end{vmatrix}; \quad (2.15)$$

Величина фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента проведених експериментів обчислюється за формулою:

$$t_{fact\_student} = \frac{\vartheta - 0}{\sigma_{\vartheta}} = \begin{vmatrix} 3,667 \\ 62,63 \end{vmatrix}; \quad (2.16)$$

Величина табличного значення  $t$ -критерію Стьюдента у разі довірчої вірогідності 95% та кількості ступенів свободи  $df_{Res} = 6$ ,  $t_{tabl\_student} = 2,447$ . Вочевидь

обидва значення фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента перевищують табличне, що означає статистичну значущість результатів проведених експериментів.

Довірчі інтервали (з довірчою вірогідністю 95%) можливих значень обох знайдених коефіцієнтів  $\vartheta_0$  та  $\vartheta_1$  обчислені за формулою:

$$\begin{aligned} \vartheta_{0i} - t_{\text{tabl\_student}} \cdot \sigma \vartheta_{0i} &\leq \vartheta_{0i} \leq \vartheta_{0i} + t_{\text{tabl\_student}} \cdot \sigma \vartheta_{0i}; \\ 2,866 \cdot 10^{-4} &\leq (\vartheta_0 = 8,61542 \cdot 10^{-4}) \leq 0,00144; \\ 46,9412 &\leq (\vartheta_1 = 48,8498) \leq 50,7585; \end{aligned} \quad (2.17)$$

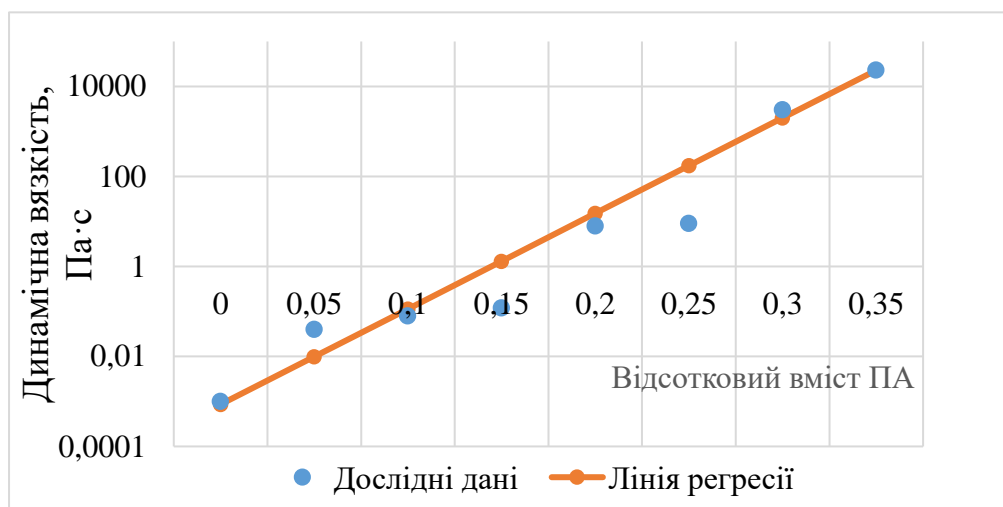


Рисунок 2.6 – Залежність в'язкості (логарифмічний масштаб) від концентрації ПА

### Оцінка загальної статистичної значущості моделі (F- критерій)

Фактичне значення F-критерію обчислюється за формулою:

$$F_{\text{fact}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\mu(p_i) - E(\mu_i))^2}{\sigma^2} = 95268 \quad (2.18)$$

де,  $\mu(p_i)$  – значення в'язкості згідно з отриманою регресійною моделлю для значень  $p_i$  процентного вмісту ПА згідно з таблицею 2.4;

$E(\mu_i)$  – середньоарифметичне значення фактичних значень в'язкості, отриманих під час проведення експериментів;

$\sigma^2$  – величина незміщеної дисперсії математичного очікування квадратів різниць між обчисленими за регресійною формулою та фактичними значеннями в'язкості, що обчислена за формулою 2.13.

Табличне значення F-критерію для довірчої вірогідності 95% та значеннями кількості ступенів свободи  $df_{Regr} = q - 1 = 1$ , де  $q$  – кількість невідомих коефіцієнтів у формулі регресійної моделі,  $df_{Res} = 6$ , див. (2.13),  $F_{tabl} = 5.987$ , очевидно:  $F_{fact} > F_{tabl}$ , що означає високий рівень статистичної загальної значущості отриманої регресійної моделі.

### **Знаходження регресійної моделі залежності динамічної в'язкості водного середовища гелю від процентного вмісту концентрату гелеутворювача**

Проведено дослідження з визначення впливу зміни концентрації ПА у робочому розчині на його в'язкість. Склад розчинів готували відповідно до рекомендацій щодо складу 2. Результати наведені у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Вплив зміни концентрації ПА на динамічну в'язкість робочого розчину

Склад	ПА, %	Олія, %	ПУ, %	Вода, %	Сорбітан моноолеат (Span 80), %	Аеросил, (SiO <sub>2</sub> ), %	Динамічна в'язкість робочого розчину, сП
Вода	0,000	0,000	0,00	100,00	0,00	0,00	1
№ 2	0,140	0,115	6,00	93,725	0,02	0,00	11
№ 7	0,250	0,205	6,00	93,525	0,00	0,02	36
№ 9	0,340	0,280	6,00	93,36	0,02	0,00	61
№ 10	0,420	0,345	6,00	93,215	0,00	0,02	156
№ 11	0,470	0,390	6,00	93,12	0,02	0,00	232
№ 13	0,500	0,410	6,00	93,07	0,00	0,02	317
№ 14	0,560	0,460	6,00	92,96	0,02	0,00	650

### Знаходження формули залежності в'язкості від концентрації ПА

Для уточнення регресійної моделі у діапазоні значень процентного вмісту ПА, що вивчається для визначення оптимального складу концентрату вогнегасної речовини, проведено регресійний аналіз дослідів залежності в'язкості водного середовища гелю від концентрації ПА згідно з методикою, викладеною в [87,88]. На основі проведених дослідів прийнято як первинну формулу нелінійної регресії цієї залежності, що аналогічна та має вигляд (2.10). Для визначення невідомих величин – коефіцієнтів  $\theta_i$  та оцінки достовірності отриманих значень був проведений регресійний аналіз з використанням лінеаризації формули (2.10), яка, очевидно є нелінійною згідно з системою рівнянь (2.11). Вихідні дані, що відповідають експериментальним у таблиці 2.7, для розрахунку коефіцієнтів  $\beta_i$  методом найменших квадратів наведені у таблиці 2.8:

Таблиця 2.8 - Вихідні дані для розрахунку коефіцієнтів  $\beta_i$  : матриця незалежної змінної « $p$ » - процентний вміст гелеутворювача та матриця відгуку « $y^*$ »

Дослід №	$p$		$y^*$
	$p_0$	$p_1$	
1	1	0,00	0
2	1	0,14	2,398
3	1	0,25	3,584
4	1	0,34	4,111
5	1	0,42	5,050
6	1	0,47	5,447
7	1	0,5	5,759
8	1	0,56	6,477

Величини коефіцієнтів  $\beta_i$  та  $\theta_i$ , обчислені за формулами (2.12):

$$\beta = (p^T \cdot p)^{-1} \cdot p^T \cdot y^* = \begin{vmatrix} 0,4801997 \\ 10,814611 \end{vmatrix};$$

$$\vartheta = |exp(\beta_0) \cdot \beta_1|^T = \begin{vmatrix} 1,616 \\ 10,815 \end{vmatrix};$$
(2.19)

Використовуючи значення коефіцієнтів, отримаємо значення в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою та різницю між цими значеннями й фактичними результатами дослідів, які наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення в'язкості згідно з отриманою регресійною моделлю та різниця між цими значеннями і фактичними результатами дослідів

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою	1,617	7,3467	24,1306	63,89030	151,7655	260,6209	360,5048	689,7864
Різниця з фактично отриманими даними	-0,6164	3,65334	11,7603	-2,8903	4,2345	-28,62,09	-435048	-39,7864

Для оцінки точності та достовірності отриманих результатів визначаємо незміщену оцінку математичного очікування суми квадратів різниць між значеннями в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою та фактичними результатами дослідів відповідно до формул (2.14):

$$\sigma^2 = \frac{SS_{Res}}{df_{Res}} = 745,91;$$

Величина стандартного відхилення значень коефіцієнтів «  $\theta_i$  » [89]:

$$\sigma\vartheta = \text{diag}\left(\sqrt{(Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot \sigma^2}\right) = \begin{vmatrix} 0,667 \\ 0,770 \end{vmatrix}; \quad (2.20)$$

Величина фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента проведених обчислень матриці коефіцієнтів  $\theta$  регресійного поліному обчислюється за формулою:

$$t_{\text{fact\_Student}} = \frac{\vartheta - 0}{\sigma\vartheta} = \begin{vmatrix} 2,4255 \\ 14,0512 \end{vmatrix}; \quad (2.21)$$

Величина табличного значення  $t$ -критерію Стьюдента у разі довірчої вірогідності 95% та кількості ступенів свободи  $df_{\text{Res}} = 6$ ,  $t_{\text{tabl\_Student}} = 2,447$ . Як видно, перше значення (для  $\theta_0$ ) фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента менше табличного, що означає статистичну незначущість результатів проведених експериментів. Для уточнення результатів продовжуємо обчислення шляхом першої ітерації, а саме, обчислюємо величину уточнення матриці коефіцієнтів  $\theta$  [88,89]:

$$\Delta\vartheta = (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot Z^T \cdot \Delta y = \begin{vmatrix} -0,012 \\ 0,007 \end{vmatrix}. \quad (2.22)$$

Отримуємо уточнені значення коефіцієнтів:

$$\vartheta = \vartheta + \Delta\vartheta = \begin{vmatrix} 1,750 \\ 10,394 \end{vmatrix}. \quad (2.23)$$

### **Оцінка адекватності регресійної моделі. Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів моделі ( $t$ - Стьюдент)**

Для оцінки точності та достовірності отриманих результатів обчислюємо оновлені ітерацією значення « $Z$ ». Величини розрахованих значень часткових похідних « $Z$ » наведені у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Значення розрахованих величини «Z»

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8
Значення « $Z_0$ »	1	4,549	14,959	39,616	94,155	161,743	223,776	428,343
Значення « $Z_1$ »	0	1,002	6,002	21,617	63,466	122,002	179,568	384,968

Величина незміщеної дисперсії різниці між значеннями в'язкості згідно з отриманою регресійною формулою та фактичними результатами дослідів становить:

$$\sigma^2 = \frac{SS_{Res}}{df_{Res}} = 487,753.$$

Величина стандартного відхилення значень коефіцієнтів « $\theta_i$ » [89]:

$$\sigma_{\vartheta} = \text{diag} \left( \sqrt{(Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot \sigma^2} \right) = \begin{vmatrix} 0,638 \\ 0,742 \end{vmatrix}. \quad (2.24)$$

Величина фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента проведених експериментів обчислюється за формулою:

$$t_{fact\_Student} = \frac{\vartheta - 0}{\sigma_{\vartheta}} = \begin{vmatrix} 2,5156 \\ 14,5826 \end{vmatrix}. \quad (2.25)$$

Величина табличного значення  $t$ -критерію Стьюдента за довірчої вірогідності 95% та кількості ступенів свободи  $df_{Res} = 6$ ,  $t_{tabl\_Student} = 2,447$ . Як видно, обидва значення фактичного значення  $t$ -критерію Стьюдента перевищують табличне, що означає статистичну значущість результатів проведених експериментів.

Довірчі інтервали (з довірчою вірогідністю 95%) можливих значень обох знайдених коефіцієнтів  $\theta_0$  та  $\theta_1$  обчислені за формулою:

$$\begin{aligned} \vartheta_{0i} - t_{\text{tabl\_Student}} \cdot \sigma \vartheta_{0i} &\leq \vartheta_{0i} \leq \vartheta_{0i} + t_{\text{tabl\_Student}} \cdot \sigma \vartheta_{0i}; \\ 0,189 &\leq (\vartheta_0 = 1,75) \leq 3,311; \\ 8,578 &\leq (\vartheta_1 = 10,394) \leq 12,21, \end{aligned} \quad (2.26)$$

### Оцінка загальної статистичної значущості моделі (F- критерій)

Фактичне значення F критерію обчислюється за формулою:

$$F_{\text{fact}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\mu(p_i) - E(\mu_i))^2}{\sigma^2} = 575,326; \quad (2.27)$$

де,  $\mu(p_i)$  – значення в'язкості згідно з отриманою регресійною моделлю для значень  $p_i$  процентного вмісту ПА згідно з таблицею 2.4;

$E(\mu_i)$  – середньоарифметичне значення фактичних значень в'язкості, отриманих під час експериментів;

$\sigma^2$  – величина незміщеної дисперсії математичного очікування квадратів різниць між обчисленими за регресійною формулою та фактичними значеннями в'язкості, обчислена за формулою 2.13.

Табличне значення F-критерію для довірчої вірогідності 95% та значення кількостей ступенів свободи  $df_{\text{Regr}} = q - 1 = 1$ , де  $q$  – кількість невідомих коефіцієнтів у формулі регресійної моделі,  $df_{\text{Res}} = 6$ , див. (2.13),  $F_{\text{tabl}} = 5.987$ , очевидно:  $F_{\text{fact}} > F_{\text{tabl}}$ , що означає високий рівень статистичної загальної значущості отриманої регресійної моделі.

На рисунку 2.7 наведено фактичні значення, отримані експериментальним шляхом, та знайдену лінію регресійної моделі.

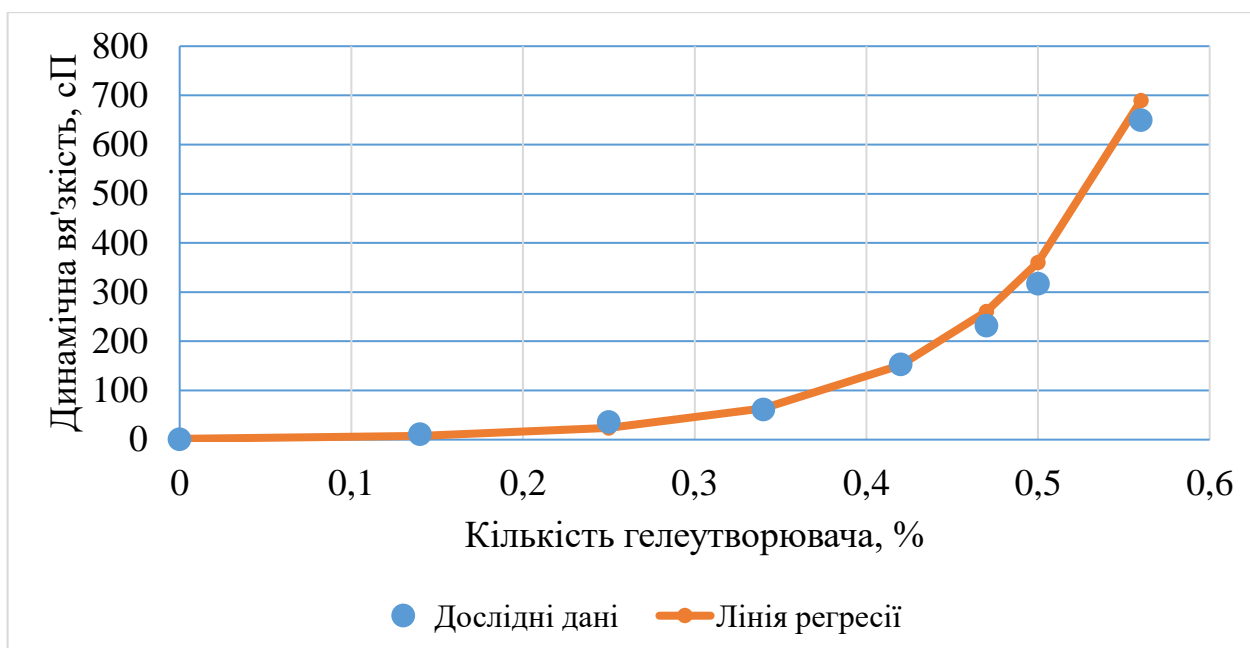


Рисунок 2.7 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту ПА

За результатами досліджень отримано апроксимаційну формулу залежності в'язкості робочого розчину від вмісту ПА з довірчою вірогідністю 95%:

$$\mu = 1,75 \cdot \exp(10,394 \cdot p), \text{ сП}, \quad (2.28)$$

де  $\mu$  – в'язкість робочого розчину, сП;

$p$  – вміст гелеутворювача, мас. %.

З огляду на отримані результати отримуємо підтвердження, що у разі збільшення концентрації концентрату полімеру на понад 1,5% відбувається зростання стійкості піни розчину та відповідно і в'язкості робочого розчину. Піна за концентрації ПА в розчині понад 3,0 % втрачає однорідність, з розчином важко працювати у разі використання стандартного пожежного обладнання.

Під час гасіння пожеж потрібно використовувати розчини з концентрацією від 1% до 1,5%, для ізоляції поверхні – від 1,5% до 2,0%. Перевірку цієї гіпотези проведено під час гасіння таким розчином модельних вогнищ класу А та В.

### **Взаємодія гідрогелю з різними можливими компонентами**

Як гелеутворювальну сполуку запропоновано поглинальний полімер ПА. Досліджувався вплив на ВВР ПА за різної його концентрації [1], ПУ різних типів, кількості та вплив добавок: рапсової олії, колоїдного діоксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), сорбітанмоноолеату (надалі – Span-80) та КМЦ. Для водопінних речовин основними показниками якості є кратність та стійкість піни, тому контрольованими параметрами були кратність та стійкість піни, які і досліджувались під час додавання різних додаткових компонентів. Також визначався їх вплив на в'язкість ВВР.

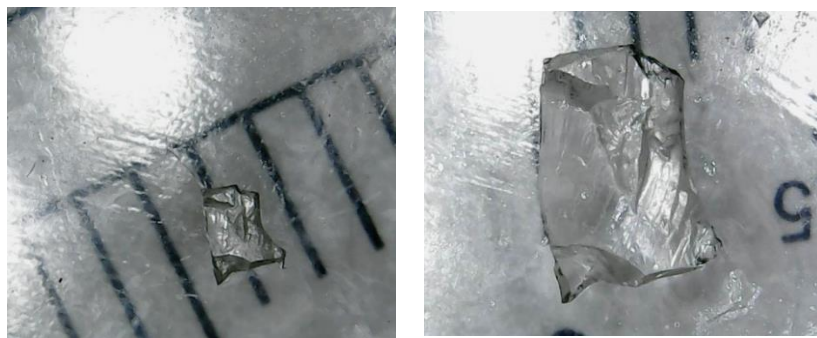
### **Дослідження процесу взаємодії ПА з водними розчинами**

Під час взаємодії часток гелеутворювальних сполук з водою важливо контролювати час наповнення водою часток гелю [1], який залежить від розмірів часток, з метою уникнення процесу їх агрегатизації. У таблиці 2.11 наведено орієнтовний час повного наповнення водою (коли розмір частки не змінюється) часток водопоглинаючого ПА у разі зміни фракційності часток гелеутворювача.

Таблиця 2.11 – Залежність часу наповнення водою часток гелеутворювача від його фракційності

Діапазон розмірів частки, мкм	>500	250-500	125-250	63-125	<63
Час повного наповнення, с	270	165	135	30	10

На рисунку 2.8 (а) зображена частка гелеутворювача, а на рисунку 2.8 (б) – частка гелю, яка наповнилась водою за 50 с. Фракція більш ніж 0,125 мм (поділка на рисунку 2.8 дорівнює 0,1 мм).



а

б

Рисунок 2.8 – Частка гелю, яка наповнилась водою за 50 секунд

На рисунку 2.9 зображено частки гелю, які піддалися процесу агрегатизації під час контакту з водою.



Рисунок 2.9 – Частки гелю, які піддалися процесу агрегатизації під час контакту з водою

Для вирішення питання щодо одночасного наповнення водою часток вирішено надалі використовувати частки однакової фракційності. Під час використання гелеутворювача без домішок для створення гелевого розчину проводилось його додавання до води, що оберталася, малими дозами та однієї фракційності. Отриманий розчин перемішували протягом 600 с, потім відстоювали 1800 с. Подальше використання розчину відбувалося після контролю однорідності розчину.

Під час приготування комбінованих розчинів гелеутворювача, згідно з рекомендацій [52,70], використовували дисперсію полімеру в рапсовій рафінованій олії. Застосування олії (можливо з додаванням Span-80 та діоксиду кремнію) надійно захищало частинки від агрегатизації (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд водного розчину дисперсії полімерів

### **Вплив можливих добавок до водного розчину гелеутворювальної речовини ПА на кратність та стійкість утвореної піни**

Як гелеутворювальну сполуку запропоновано поглинальний полімер ПА. Досліджувався вплив на ВВР ПА за різної його концентрації [1], ПУ різних типів, кількості та вплив добавок: рапсової олії, колоїдного діоксиду кремнію ( $\text{SiO}_2$ ), Span-80 та КМЦ. Для водопінних речовин основними показниками якості є кратність та стійкість піни, отже контрольованими параметрами були кратність та стійкість піни, які досліджували у разі додавання різних додаткових компонентів, а також визначався їх вплив на в'язкість ВВР.

Досліджувалися зміни стійкості та кратності піни, утвореної з водного розчину 3% та 6% піноутворювача загального призначення вітчизняного виробництва, у разі додавання до розчину КМЦ [1]. Проведено порівняння з піною, отриманою з 6% розчину піноутворювача, та робочим розчином модифікованої ВВР (концентрація ПА – 0,5%). Піна утворювалася із 100 грамів відповідного розчину (концентрація КМЦ: 0,1%, 0,25%, 0,50%, 0,75% та 0,5%) шляхом його механічного перемішування насадкою протягом 30 с у склянці ємністю 1000 мл. Фіксували об'єм піни та час випадання 50% розчину. Дослід повторювали двічі.

За результати досліджень брали середні значення двох експериментів. У разі розбіжності результатів дослідження, що перевищує 10 %, проводили третій дослід та брали до відома середнє значення від трьох дослідів.

Результати експериментів з визначення кратності та стійкості піни утвореної з робочого розчину модифікованої ВВР (концентрація ПА – 0,5%) при додаванні КМЦ (концентрація: 0,1%, 0,25%, 0,50%, 0,75% та 0,5%) наведено в таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 - Результати досліджень кратності та стійкості піни отриманої при додаванні КМЦ до гелевих розчинів на основі ПА

Дослід №	Концентрація КМЦ, %	Стійкість, хв	Кратність
1	0,00	9	7,40
2	0,10	18	5,00
3	0,25	42	3,00
4	0,50	70	2,40
5	0,75	104	2,00
6	1,00	152	1,80

На рисунку 2.11 наведено залежності кратності та стійкості піни, отриманої під час додавання КМЦ до гелевих розчинів на основі ПА.

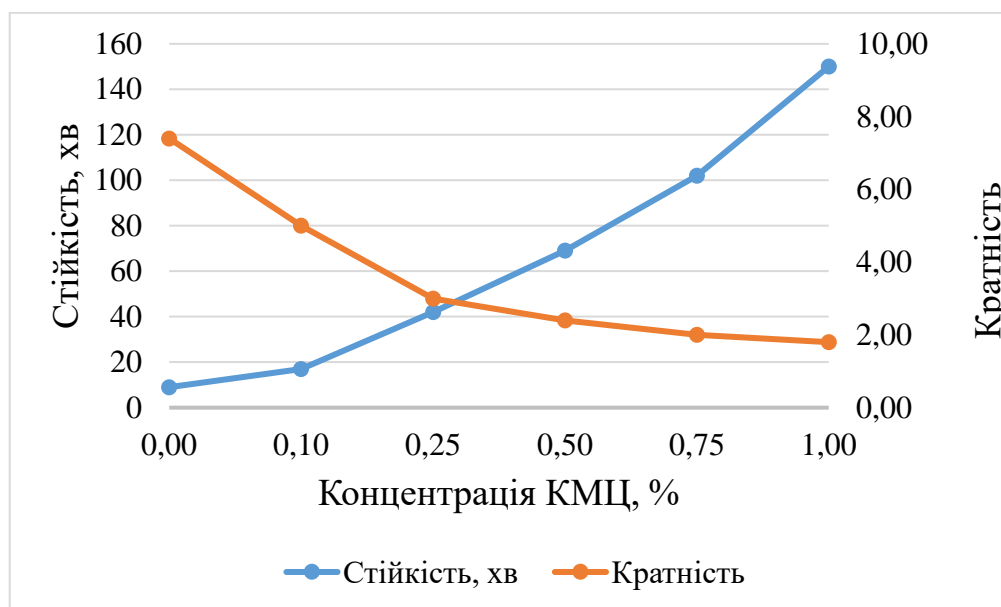


Рисунок 2.11 - Залежність кратності та стійкості піни отриманої з розчину 6% ПУ загального призначення та 0,5% ПА, від зміни концентрації КМЦ у розчині

З огляду на отримані результати зазначимо, що збільшення ПА у розчині призводить до прогнозованого збільшення стійкості піни та зменшення її кратності. Застосування КМЦ навіть у малих дозах підвищує стійкість піни за одночасного зменшення її кратності. У разі збільшення відсотка КМЦ у розчині на понад 0,5% різко зростає в'язкість розчину і стає важко проводити дослідження. Це унеможливорює його застосування в такій концентрації як ВВР з причини утворення дуже густої консистенції, що затрудняє подавання розчину з наявного пожежного обладнання.

Слід зазначити, що отримано сумарний ефект підвищення показників якості піни, щодо спільного використання як гелеутворювальних речовин (похідних акрилатів) так і КМЦ.

Результати досліджень з визначення кратності та стійкості піни утвореної з робочого розчину модифікованої ВВР (концентрація ПА – 0,5%) при додаванні різних добавок та їх комбінацій наведено в таблицях 2.13, 2.14.

Таблиця 2.13 - Результати досліджень кратності піни отриманої при додаванні різних добавок до гелевих розчинів на основі ПА

Добавка	Відсоткове значення	Значення кратності			Середнє значення
		Дослід № 1	Дослід № 2	Дослід № 3	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,00	1,8	1,9	1,9	1,9
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12,00	1,4	1,3	1,4	1,4
КМЦ	0,05	5,2	5,4	5,3	5,3
SiO <sub>2</sub>	0,01	3,9	3,9	4,0	4,0
Span 80	0,02	5,1	4,9	5,1	5,0
ПУ	6,00	4,8	4,8	4,9	4,8
КМЦ / ПУ / SiO <sub>2</sub>	0,2 / 6 / 0,2	2,4	2,4	2,3	2,4

Таблиця 2.14 - Результати досліджень стійкості піни отриманої при додаванні різних добавок до гелевих розчинів на основі ПА

Добавка	Відсоткове значення	Значення стійкості, хв			Середнє значення
		Дослід № 1	Дослід № 2	Дослід № 3	
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	6,00	3,0	2,9	3,0	3,0
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12,00	0,9	1,0	1,0	1,0
КМЦ	0,05	14,0	13,9	13,9	14,0
SiO <sub>2</sub>	0,01	4,9	5,1	4,9	5,0
Span 80	0,02	5,0	4,9	5,0	5,0
ПУ	6,00	8,9	9,0	9,1	9,0
КМЦ / ПУ / SiO <sub>2</sub>	0,2 / 6 / 0,2	48,6	49,1	49,3	49,0

На рисунку 2.12 наведені діаграми впливу добавок на експлуатаційні характеристики піни низької кратності отриманої, з розчинів ПА [1,81].

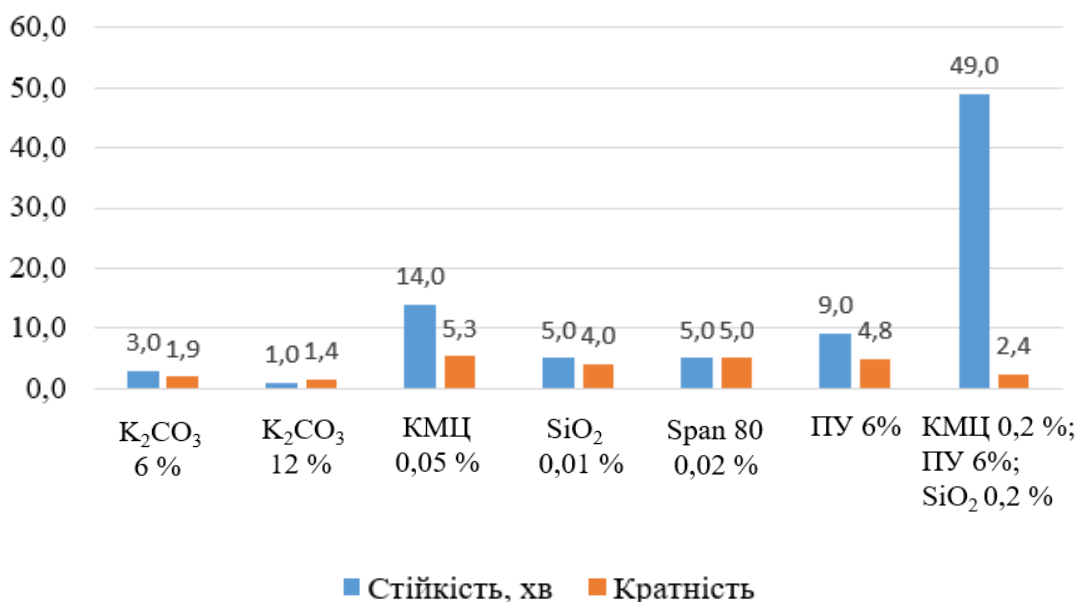


Рисунок 2.12 – Вплив добавок на стійкість і кратність піни утвореної у розчині 0,5% концентрату на основі ПА та 6% ПУ загального призначення

Встановлено, що додавання олії у розчин позитивно впливає на стійкість та кратність піни в межах від 15% до 20%. Додавання до розчину ПА навіть у малих

кількостях значно підвищує стійкість отриманої піни з паралельним зменшенням її кратності.

Результати досліджень з визначення кратності та стійкості піни утвореної за різних концентрацій ПА у 3% та 6% розчинах ПУ загального призначення наведено у таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Залежність стійкості та кратності піни від вмісту концентрату гелеутворюючого ПА в 3% та 6% розчинах ПУ загального призначення

Дослід №	Вміст ПА, %	Кратність		Стійкість, хв	
		3 %	6 %	3 %	6 %
1	0,0	8,8	9	8	7
2	0,2	6,9	7,2	14	12
3	1,0	5,3	5,8	22	15
4	1,2	4,4	4,8	48	36
5	2,0	4,0	4,3	145	130

На рисунку 2.13 наведено залежність стійкості та кратності піни від вмісту концентрату гелеутворювального ПА в 3% та 6% розчинах ПУ загального призначення.

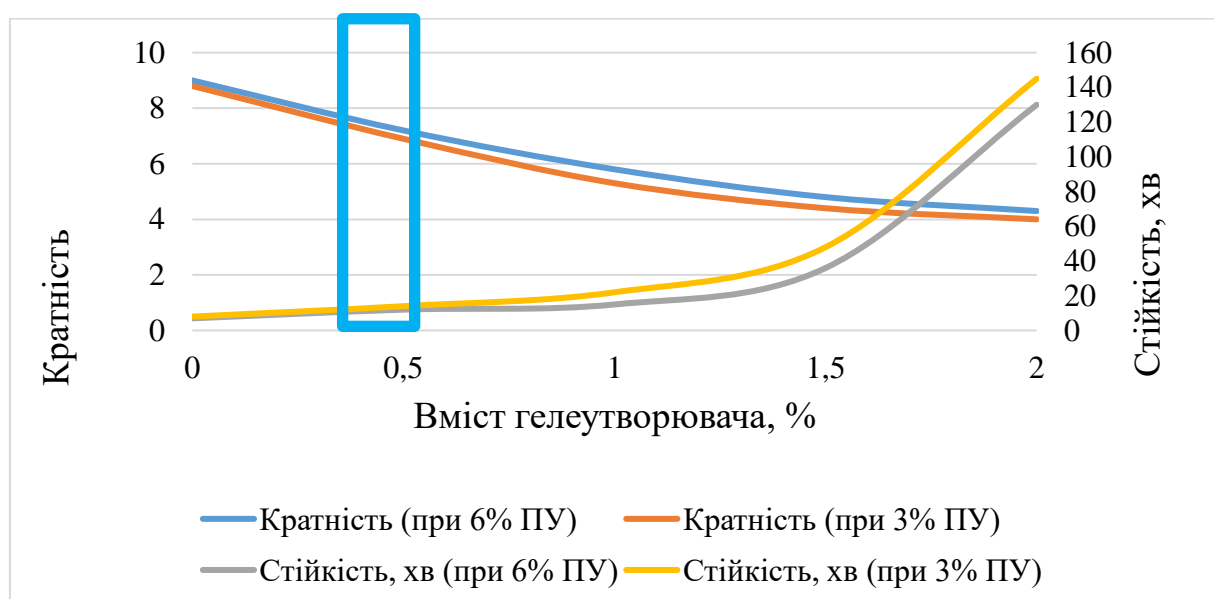


Рисунок 2.13 – Залежність стійкості та кратності піни від вмісту концентрату гелеутворювального ПА в 3% та 6% розчинах ПУ загального призначення

Виділений на графіку діапазон відповідає вмісту концентрату модифікованої речовини в межах від 1,5 до 2 % у робочому розчині, тобто фінальна концентрація поліакрилату становить від 0,4% до 0,6%, що обґрунтовано за результатами попередніх досліджень.

### **2.3. Висновки до розділу**

1. Величина відносної здатності до прилипання гідрогелю на основі полімерного гелеутворювача може досягати значних величин, від 7 до 8 разів порівняно з водою.

2. Висока відносна здатність до прилипання ВВР на основі гідрогелю значно збільшує величину адгезійного та охолоджувального шару поверхні порівняно з водою. Захисний шар гідрогелю містить велику кількість води, що прилипає до стінок, що може надійно захистити поверхні від нагріву. Максимальне зростання здатності до налипання відбувається за концентрації гелеутворювальної речовини в розчині у межах 0,3%, що враховано під час створення концентрату гелеутворювача.

3. Додавання до розчину суспендувального агента діоксиду кремнію та поверхнево-активної речовини з низьким ГЛБ (сорбітанмоноолеату) практично не впливають на характеристики піни.

4. Додавання солей лужних металів негативно впливає на стійкість та кратність піни, що утворюється. Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози навіть у малих кількостях суттєво впливає на підвищення стійкості піни за одночасного зменшення її кратності. Надалі її вплив на розчин підлягає дослідженню у разі використання її як загусника та для коригування в'язкості розчину.

5. Зміна концентрації ПУ в межах (3–6%) практично не впливає на процес піноутворення за наявності в розчині гелеутворювальної сполуки концентрацією понад 0,1%.

### **РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ВИХІДНОГО СКЛАДУ КОНЦЕНТРАТУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РОБОЧИХ РОЗЧИНІВ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН**

Під час застосування зазначених вище засобів для загущення запропоновано три склади вогнегасних розчинів з мінімальною кількістю рідкого середовища як комбінованих добавок для піноутворювачів та водних розчинів, кожна з яких була оцінена у разі її застосування у складі ВВР. Склад та кількість добавок у концентратах визначено з огляду на рекомендації, викладені у [69,78], та результати проведених нами досліджень. Враховуючи, що ми використовували високопоглинальний нерозчинний полімер ПА, однією з головних задач було визначення раціональної концентрації його у розчині та концентраті залежно від напрямку робіт надалі.

За основу гелеутворювальних концентратів взято дисперсії ПА у рапсовій рафінованій олії, з подальшим додаванням різних компонентів. Отримані концентрати являли собою напівсуху суміш, їх уведення до робочих розчинів ускладнюється необхідністю їх дозування (у грамах) та розчинення. Запропоновано приготування розчинів з концентрацією ПА не більш ніж 10%, які легко надалі розчинити у воді або ПУ. Під час розчинення у ПУ концентрація ПА має бути такою, щоб у разі створення робочого розчину кількість гелеутворювальної сполуки становила не менше 0,05%, якщо застосувати розчин для гасіння пожежі. Для створення водного вогнегасного розчину потрібно додавати до 1% ПУ як змочувача.

#### **3.1. Концентрат на основі водопоглинального нерозчинного поліакрилату**

Концентрат розраховувався згідно з рекомендаціями викладеними у [38,41,80, 81], наших попередніх роботах [1], та результатами проведених досліджень.

Концентрат розраховувався як добавка до води або піноутворювача. Головний ефект, від застосування як пінного, так і водного розчину, є підвищення коефіцієнта використання водного розчину. Це досягається внаслідок створення частинками матеріалу мінікапсул, які наповнені вогнегасною речовиною та мають адгезивні

властивості, через що затримуються на поверхні в декілька прошарків, ізолюють її від повітря та активно охолоджують, використовуючи всю подану воду.

Як зазначено у [78], виявленими недоліками застосування розчинів на основі ПА під час гасіння модельних вогнищ були його нерівномірне розміщення на поверхні та складність подавання за концентрації у розчині понад 2%. Це пов'язано з різними розмірами частинок гелеутворювача, утворення ним грудочок у разі контакту з водою та неможливістю отримання однорідної гелевої речовини. У роботі проведено досліді, результати яких дали можливість мінімізувати перелічені вище недоліки, а саме:

- для збільшення адгезії та стійкості частинок у розчині потрібно, щоб частинки гелеутворювального полімеру були наповнені розчином до 60–80% їх поглинальних (згідно із сертифікатом якості) можливостей;

- застосування дисперсії частинок гелеутворювального полімеру в олії з розчиненням надалі у воді, порівняно з використанням сухих частинок полімеру, суттєво скорочує час його повної гідратації;

- попереднє розділення частинок гелеутворювального полімеру за фракціями та використання під час приготування гелевого розчину частинок із близькою фракційністю забезпечує отримання більш однорідної гелевої речовини;

- доцільним є використання отриманого концентрату як рідинної фази, що забезпечує підвищення його рухливості та полегшує введення до складу розчину.

Як рідини використовували або водний розчин або піноутворювач. У разі використання гелю як засобу для запобігання пожежам важливим є те, що після випарування води з частинок вони здатні до нового процесу поглинання води (та її збереження) під час подавання через атмосферні осаді, так і примусове подавання водоподавальними механізмами.

Концентрат змішували з водою, утворюючи 5 % розчин для використання надалі. Зазвичай він складається із дисперсії в олії засобу загущення – водопоглинаючого нерозчинного полімеру ПА та можливого додавання ПАР. Робочий розчин гідрогелю отримували з 5 % мас. рідкого концентрату, шляхом змішування з водою у потрібній пропорції протягом 10–15 секунд.

Наведені нижче обґрунтовані склади концентратів водопоглинального нерозчинного ПА на основі води та піноутворювачів для гасіння пожеж класів А та В.

**Склад 1:** водопоглинаючий нерозчинний ПА – 27–29 мас.%; олія рапсова рафінована 23–25 мас.%; ПУ загального призначення марки вітчизняного виробництва – 6 мас.%; вода – 46–48 мас.%.

**Склад 2:** водопоглинальний нерозчинний ПА – 28 мас.%; олія рапсова рафінована – 24 мас.%; ПУ загального призначення вітчизняного виробництва – 6 мас.%; вода – 48 мас.%;

**Склад 3:** водопоглинальний нерозчинний ПА – 35 мас.%; ПУ AFFF закордонного виробництва – 1 мас.%; вода – 64 мас.%.

### **Залежність стійкості та кратності піни від складу концентрату**

У таблиці 3.1 наведено дані для виготовлення водного вогнегасного розчину із запропонованого концентрату (на прикладі складу 2) щодо наявності складових розчину від сухого концентрату до робочого розчину, їх відсоткове та натуральне співвідношення у напівсухому концентраті, рідкому концентраті та робочому розчині стосовно нерозчинного водопоглинального ПА.

Концентрат можна змішувати з водою двома основними способами: ручним та механічним. У разі застосування першого відбувається додавання речовини у воду, у разі другого – закачування концентрату в ємність з водним розчином.

Таблиця 3.1 – Концентрат на основі ПА

Склад	Концентрат (на базі поліакрилату натрію)																	
	Початкова «суха» суміш з поліакрилатом натрію				Поліакрилат натрію (Есофос-07)		Олія		ПУ у концентраті		Вода у концентраті		ПУ у концентраті		Поташ		Концен траг	
	Поліакрилат натрію (Есофос-07)	Олія	ПУ у «сухій» суміші	Вода	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Концентрація у концентраті	Концентрація у розч.	Доля концентрату у розч.	
Розчин № 1	28	23	6	43	%	14.0	0.42	11.50	0.34	3.0	0.09	21.50	0.645	50.0	1.5	0.0	0.0	3.0
Розчин № 2	28	23	6	43	%	4.67	0.14	3.83	0.11	1.0	0.03	7.17	0.215	83.33	2.5	0.0	0.0	3.0
Розчин № 3	28	23	6	43	%	7.00	0.42	5.75	0.34	1.5	0.09	10.75	0.645	75.00	4.5	0.0	0.0	6.0
Розчин № 4	28	23	6	43	%	2.33	0.14	1.92	0.11	0.5	0.03	3.58	0.215	16.67	1.0	75.0	4.5	6.0

На рисунку 3.1 наведена залежність стійкості та кратності піни, отриманої з розчину 6% ПУ загального призначення за змінної кількості ПА.

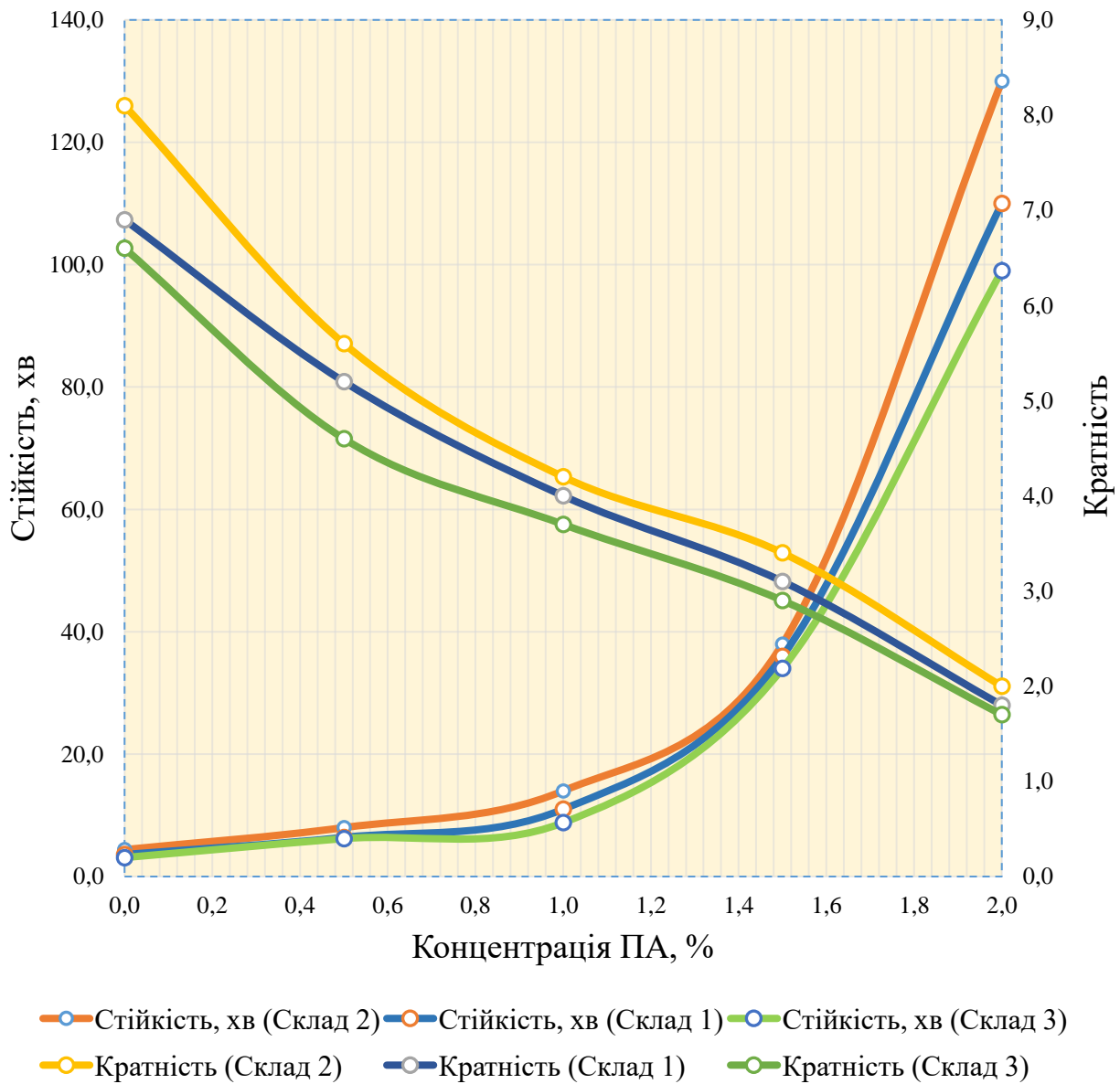


Рисунок 3.1 – Залежність стійкості та кратності піни отриманої, з розчину 6% ПУ загального призначення за змінної кількості ПА

Виконано роботи з дослідження залежностей в'язкості та кратності піни від складу концентрату для вироблення якісних та кількісних оцінок діапазону варіювання – рівнів факторів для проведення факторного експерименту щодо пошуку раціонального складу концентрату.

Результати дослідів залежності стійкості піни від вмісту концентрату складу 2 наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати дослідів залежності стійкості піни від вмісту концентрату складу 2

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вміст концентрату, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Стійкість, хв	3	8	14	38	130	200	255	270	277	280

Для оцінки достовірності проведених дослідів здійснюємо регресійний аналіз на основі регресійного поліному 3-го порядку, формуємо матрицю незалежної змінної «X» та вектор результатів вимірів стійкості піни «Y»:

$$X^T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 \\ 0.0 & 0.01 & 0.04 & 0.09 & 0.16 & 0.25 & 0.36 & 0.49 & 0.64 & 0.81 \\ 0.0 & 0.001 & 0.008 & 0.027 & 0.064 & 0.125 & 0.216 & 0.343 & 0.512 & 0.729 \end{vmatrix} \quad (3.1)$$

$$Y^T = | 3 \quad 8 \quad 14 \quad 38 \quad 130 \quad 200 \quad 255 \quad 270 \quad 277 \quad 280 |$$

Знаходимо значення невідомих 4-х коефіцієнтів регресійного поліному згідно з методикою [88,89]:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y = \begin{vmatrix} 6,1689 \\ -315,627 \\ 2189,2 \\ -1682,0 \end{vmatrix} \quad (3.2)$$

Знаходимо математичне очікування суми квадратів різниць фактичних та обчислених за регресійною формулою значень та дисперсії:

$$\begin{aligned}
SS_{Regr} &= (\beta^T \cdot X^T \cdot Y) - n \cdot MY = 132319,611; \\
df_{Regr} &= n - 1 = 10 - 1 = 9; \\
MS_{Regr} &= \frac{SS_{Regr}}{df_{Regr}} = 14702,179; \\
SS_{Res} &= Y^T \cdot Y - \beta^T \cdot X^T \cdot Y = 1789; \\
df_{Res} &= n - p = 10 - 4 = 6; \\
MS_{Res} &= \frac{SS_{Res}}{df_{Res}} = 297,48155; \\
\sigma^2 &= MS_{Res} = 297,48155;
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Для визначення загальної статистичної значущості на рівні 95% довірчої вірогідності результатів експериментів скористаємося критерієм Фішера:

$$F_{fact} = \frac{MS_{Regr}}{\sigma^2} = 49,422 \tag{3.4}$$

Табличне значення критерію Фішера за ступеня свободи  $df_{Res} = 6$ ,  $df_{Regr} = 9$  та довірчої вірогідності 95% дорівнює 3,374. Фактично розраховане значення критерію значно перевищує табличне. Це вказує на високу достовірність результату експерименту.

Результати дослідів залежності кратності піни від вмісту концентрату складу 2 наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати дослідів залежності кратності піни від вмісту концентрату складу 2

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вміст концентрату, %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Кратність	7,8	7	5	4	3,5	3	2,7	2,3	2,1	2

Для оцінки достовірності проведених дослідів здійснюємо регресійний аналіз на основі регресійного поліному 3-го порядку, формуємо матрицю незалежної змінної «X» та вектор результатів вимірів стійкості піни «Y»:

$$X^T = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.8 & 0.9 \\ 0.0 & 0.01 & 0.04 & 0.09 & 0.16 & 0.25 & 0.36 & 0.49 & 0.64 & 0.81 \\ 0.0 & 0.001 & 0.008 & 0.027 & 0.064 & 0.125 & 0.216 & 0.343 & 0.512 & 0.729 \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

$$Y^T = |7,8 \quad 7 \quad 5 \quad 4 \quad 3,5 \quad 3 \quad 2,7 \quad 2,3 \quad 2,1 \quad 2|$$

Знаходимо значення невідомих 4-х коефіцієнтів регресійного поліному згідно з методикою [88,89]:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y = \begin{vmatrix} 8,02741 \\ -17,435 \\ 17,907 \\ -6,6434 \end{vmatrix} \quad (3.6)$$

Знаходимо математичне очікування суми квадратів різниць фактичних і обчислених за регресійною формулою значень та дисперсії:

$$\begin{aligned} SS_{Regr} &= (\beta^T \cdot X^T \cdot Y) - n \cdot MY = 37,384; \\ df_{Regr} &= n - 1 = 10 - 1 = 9; \\ MS_{Regr} &= \frac{SS_{Regr}}{df_{Regr}} = 4,154; \\ SS_{Res} &= Y^T \cdot Y - \beta^T \cdot X^T \cdot Y = 0,46; \\ df_{Res} &= n - p = 10 - 4 = 6; \\ MS_{Res} &= \frac{SS_{Res}}{df_{Res}} = 0,07665; \\ \sigma^2 &= MS_{Res} = 0,07665; \end{aligned} \quad (3.7)$$

Для визначення загальної статистичної значущості на рівні 95% довірчої вірогідності результатів експериментів скористаємося критерієм Фішера:

$$F_{fact} = \frac{MS_{Regr}}{\sigma^2} = 54,189 . \quad (3.8)$$

Табличне значення критерію Фішера за ступеня свободи  $df_{Res} = 6$ ,  $df_{Regr} = 9$  та довірчої вірогідності 95% дорівнює 3,374. Фактично розраховане значення критерію значно перевищує табличне, це вказує на високу достовірність результату експерименту.

Результати експериментів з вимірами залежностей стійкості та кратності від вмісту концентрату 2 показали, що у разі збільшення концентрації на понад 0,6..0,7% залежність має асимптотичний характер (рис. 3.2). З огляду на це вирішено щодо визначення діапазону варіювання – рівнів факторів для проведення факторного експерименту надалі щодо знаходження оптимального складу концентрату, а саме: вміст у концентраті ПА – від 14% до 38%, олії – від 16% до 36%, ПУ – від 2,5% до 5,5%.

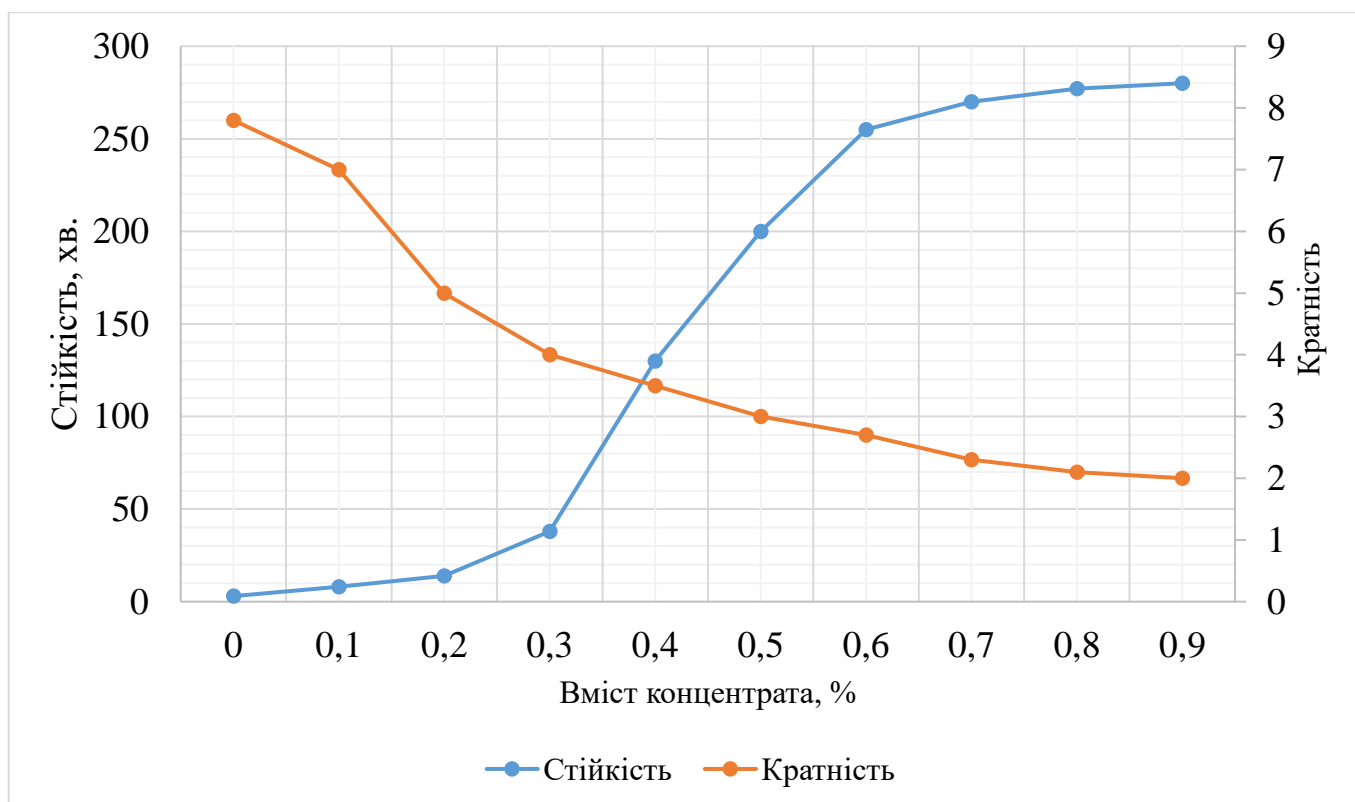


Рисунок 3.2 - Залежність стійкості та кратності піни отриманої з розчину 6% ПУ загального призначення, від вмісту концентрату 2

### **3.2 Планування факторного експерименту з метою визначення оптимального складу концентрату**

Виконані роботи з дослідження залежностей в'язкості та кратності піни від складу концентрату дали змогу зробити певні якісні та кількісні оцінки діапазону варіювання – рівнів факторів в умовах факторного експерименту зі знаходження оптимального складу концентрату, що у робочій суміші його частка становить від 0,1% до 1,0% зі звичайними ПУ – 6% та водою 82%.

Для з'ясування оптимального складу концентрату необхідно використати план не нижче, ніж другого порядку, адже лінійні функції не можуть мати екстремума, тому під час пошуку складу концентрату на основі поліакрилату проведено вогневі дослідження на основі плану факторного експерименту другого порядку. За порівняно великої кількості факторів (вміст ПА, вміст олії, вміст ПУ у складі концентрату) виникає проблема зменшення кількості дослідів для зменшення витрат, яку вирішено через використання плану другого порядку із застосуванням ідеї композиційного планування, запропоновану Г. Е. Боксом і К. Б. Вільсоном [84] з використанням фіктивних факторів. Отже, планування факторного експерименту (надалі – ПФЕ) використано лише як його складову частину (ядро). Це ядро доповнюється точками, координати яких вибирають із умов симетрії та ортогональності. Найбільшого поширення набули так звані ортогональні центральні композиційні плани (надалі – ОЦКП) другого порядку. Ядро такого плану доповнюється чотирма парами симетричних точок, розташованих на координатних осях на деякій відстані від центру плану (зоряні точки), а також точкою у центрі плану (нульова точка).

#### **Створення матриці експерименту та знаходження формули поліному регресії відгуку**

Цільовою функцією було визначення відсоткового складу компонентів концентрату модифікованої речовини  $f(x,y,z)$  залежно від часу гасіння модельного вогнища. Оптимізація складу здійснювалася за критерієм мінімізації значення цієї функції. Мінімальне значення визначалося на основі квадратичної регресійної моделі

методом поверхні відгуку шляхом знаходження стаціонарної точки та аналізу отриманої поверхні відгуку. Формулу многочлена регресії значення відгуку експерименту шукаємо у такому загальному вигляді:

$$f(x, y, z) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \beta_3 \cdot y + \beta_4 \cdot y^2 + \beta_5 \cdot z + \beta_6 \cdot z^2 + \beta_7 \cdot x \cdot y + \beta_8 \cdot x \cdot z + \beta_9 \cdot y \cdot z \quad (3.9)$$

де,  $x$  – процентний вміст поліакриламід у концентраті;

$y$  – процентний вміст олії у концентраті;

$z$  – процентний вміст піноутворювача у концентраті.

Кодування факторів (таблиця 3.4) провадиться для переводу натуральних величин факторів у безрозмірні величини, щоб побудувати стандартну матрицю експерименту [90]. Зв'язок між кодовим та натуральним виразом фактора задається формулою:

$$x_i = \frac{X_i - x_{i,0}}{\delta_i}, \quad (3.10)$$

де,  $x_i$  – кодове значення  $i$ -го фактора;

$X_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактора;

$x_{i0}$  – значення  $i$ -го фактора на нульовому рівні;

$\delta_i$  – інтервал варіювання  $i$ -го фактора.

Таблиця 3.4 – Кодування факторів

Інтервал варіювання та рівень факторів	Процентний вміст поліакрилату	Процентний вміст олії	Процентний вміст піноутворювача
	$x_1 (x)$	$x_2 (y)$	$x_3 (z)$
Нульовий рівень, $x_i=0$	26	26	4
Інтервал варіювання, $\delta_i$	12	10	1,5
Нижній рівень, $x_i=-1$	14	16	2,5
Верхній рівень, $x_i=+1$	38	36	5,5

Для обліку квадратичних ефектів вводять фіктивні фактори виду « $\varphi$ », де  $\varphi$  – позитивне постійне число, а також « $\alpha$ » зіркового плеча. Значення цих обох величин однозначно визначають з огляду на умови симетричності та ортогональності плану. Значення цих величин є розв’язком системи рівнянь [91]:

$$\begin{cases} 2^{k-q} \cdot (1 - \varphi) + 2 \cdot (\alpha^2 - \varphi) - (2 \cdot k - 1) \cdot \varphi = 0, \\ 2^{k-q} \cdot (1 - \varphi) - 4 \cdot \varphi \cdot (\alpha^2 - \varphi) + (2 \cdot k - 3) \cdot \varphi^2 = 0, \end{cases} \quad (3.11)$$

де,  $q$  – індекс дробування плану.

На основі розв’язання цієї системи рівнянь (3.10) отримано значення поправки  $\alpha$  та фіктивного фактора  $\varphi$ :

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\sqrt{4^{k-q} \cdot (1 - \varphi) + (2 \cdot k + 1) \cdot 2^{k-q}}}{2^{k-q} + 2 \cdot k + 1}, \\ \alpha = \sqrt{\frac{(2 \cdot k - 1) \cdot \varphi - 2^{k-q} \cdot (1 - \varphi)}{2}} + \varphi, \end{cases} \quad (3.12)$$

де,  $k = 3$  – число факторів

$q = 0$  – число дробовості плану експерименту.

У таблиці 3.5 наведено матрицю ортогонального центрального композиційного плану трифакторного експерименту з використанням зоряних точок та нульової точки з урахуванням фіктивних факторів « $\alpha$ » та « $\varphi$ ».

Таблиця 3.5 – Матриця рівнів кодівих факторів експерименту

Дослід	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_2$	$(x_1)^2$	$(x_2)^2$	$(x_3)^2$	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$
Планування типу $2^3$	1	-1	-1	-1	1	1	1	+1	+1	+1
	1	+1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	+1
	1	-1	+1	-1	1	1	1	-1	+1	-1
	1	+1	+1	-1	1	1	1	+1	-1	-1
	1	-1	-1	+1	1	1	1	+1	-1	+1
	1	+1	-1	+1	1	1	1	-1	+1	-1
	1	-1	+1	+1	1	1	1	-1	-1	+1
	1	+1	+1	+1	1	1	1	+1	+1	+1
Зоряні точки	1	-1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0	0	0
	1	+1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0	0	0
	1	0	-1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0	0
	1	0	+1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0	0
	1	0	0	-1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0
	1	0	0	+1,2154	0	0	+1,4772	0	0	0
Нульова точка	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

На основі кодової матриці (таблиця 3.5) та рівнянь (3.10) зв'язку кодівих та натуральних факторів побудована матриця «X» натуральних значень факторів (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Матриця рівнів натуральних значень факторів експерименту

Дослід	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_2$	$(X_1)^2$	$(X_2)^2$	$(X_3)^2$	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$
1	1	14	16	2,5	196	256	6,25	224	35	40
2	1	38	16	2,5	1444	256	6,25	608	95	40
3	1	14	36	2,5	196	1296	6,25	504	35	90
4	1	38	36	2,5	1444	1296	6,25	1368	95	90
5	1	14	16	5,5	196	256	30,25	224	77	88
6	1	38	16	5,5	1444	256	30,25	608	209	88
7	1	14	36	5,5	196	1296	30,25	504	77	198
8	1	38	36	5,5	1444	1296	30,25	1368	209	198
9	1	11,415	26	4	130,304	676	16	296,792	45,66	104
10	1	40,585	26	4	1647,137	676	16	1055,208	162,34	104
11	1	26	13,846	4	676	191,708	16	359,993	104	56,384
12	1	26	38,154	4	676	1455,737	16	992,007	104	152,616
13	1	26	26	2,177	676	676	4,739	676	56,599	56,599
14	1	26	26	5,823	676	676	39,909	676	151,401	153,401
15	1	26	26	4	676	676	16	676	104	104

Вектор «Y» значення відгуків, тобто вимірних унаслідок експериментів значень часу гасіння (таблиця 3.7):

Таблиця 3.7 – Значення часу гасіння, згідно з результатами експериментів

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Час гасіння, с	112	123	135	105	131	111	209	129	124	99	91	121	93	115	68

Обчислюємо величини регресійних коефіцієнтів поліному регресії (3.10), реалізуючи метод найменших квадратів (МНК) у матричному вигляді згідно з [88]:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y, \quad (3.13)$$

де,  $X$  – матриця таблиці 3;

$X^T$  – транспонована матриця;

$(X^T \cdot X)^{-1}$  – обернена матриця;

$Y$  – вектор таблиці 4.

Вектори знайдених величин регресійних коефіцієнтів наведено у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Значення величин регресійних коефіцієнтів поліному регресії

Коефіцієнт	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
Значення коефіцієнта	332,352	-3,988	-8,392	+56,186	0,151	0,18	7,389	-0,105	-0,562	0,758

Підставивши ці значення у формулу поліному (3.9), отримаємо значення часу гасіння згідно з нашою математичною моделлю, а також різницю між ними та експериментальними даними, які наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Значення часу гасіння згідно з математичною моделлю та різниць між ними та результатами експериментів

Дослід №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Час гасіння, с	110,604	128,883	138,204	105,93	132,159	109,885	205,256	132,482	125,247	92,097	87,92	118,424	86,555	115,789	76,613
Різниця між дослідними даними та регресійної формули	1,393	-5,833	-3,204	-0,93	-1,159	1,115	3,744	-3,482	-1,247	6,903	3,08	2,576	6,445	-0,786	-8,613

### Тестування отриманих результатів експерименту

Знаходження суми квадратів регресії згідно з методикою [89]:

$$SS_{Reg} = Y^T \cdot \left[ X \cdot (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \right] - J/n \cdot Y = 13149,456 , \quad (3.14)$$

де,  $X$  – матриця таблиці 3;

$X^T$  – транспонована матриця;

$(X^T \cdot X)^{-1}$  – обернена матриця;

$Y$  – вектор таблиці 4;

$J$  – квадратна одинична матриця порядку « $n$ »;

$n = 15$  – загальна кількість дослідів.

Кількість ступенів свободи регресії [89]:

$$df_{Reg} = p - 1 = 9 , \quad (3.15)$$

де,  $p = 10$  – кількість регресійних коефіцієнтів поліному регресії (3.9).

Знаходимо незміщену оцінку математичного очікування суми квадратів регресії:

$$MS_{\text{Regr}} = \frac{SS_{\text{Regr}}}{df_{\text{Regr}}} = 1461.051 \quad (3.16)$$

Визначаємо суми квадратів помилок регресії:

$$SS_{\text{Res}} = Y^T \cdot Y - \beta^T \cdot X^T \cdot Y = 257.478 \quad (3.17)$$

де,  $\beta^T$  – транспонований вектор коефіцієнтів поліному регресії (3.9).

Кількість ступенів свободи оцінки помилок регресії:

$$df_{\text{Res}} = n - p = 5 \quad (3.18)$$

де,  $p = 10$  – кількість регресійних коефіцієнтів поліному регресії (3.9);

$n = 15$  – кількість дослідів.

Знаходимо незміщену оцінку математичного очікування суми квадратів помилок регресії:

$$MS_{\text{Res}} = \frac{SS_{\text{Res}}}{df_{\text{Res}}} = 51.496 \quad (3.19)$$

Знаходимо незміщену оцінку дисперсії коефіцієнтів поліному регресії згідно з [89]:

$$\sigma^2 \beta = \text{diag}\left(\left(X^T \cdot X\right)^{-1} \cdot MS_{\text{Res}}\right). \quad (3.20)$$

Визначаємо стандартне відхилення коефіцієнтів поліному регресії:

$$\sigma\beta = \sqrt{\sigma^2 \beta}. \quad (3.21)$$

Вектори знайдених величин незміщеної дисперсії та стандартного відхилення коефіцієнтів поліному регресії наведено у таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Значення величин незміщеної дисперсії та стандартного відхилення коефіцієнтів регресійних коефіцієнтів поліному регресії

Коефіцієнт	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
Незміщена дисперсія	1914,083	2,1913	3,9974	184,021	0,00057	0,00118	2,331	0,00045	0,01987	0,02861
Стандартне відхилення	43,75	1,48	1,999	13,565	0,024	0,034	1,527	0,021	0,141	0,169

Відповідний вектор значень розрахункових критеріїв t-Student для обчислених значень коефіцієнтів поліному регресії згідно з формулою:

$$t_{\text{Student}_{\text{Obs}_i}} = \left| \frac{\beta_i - 0}{\sigma\beta_i} \right| \quad (3.22)$$

Вектори знайдених величин критерію t-Student наведені у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Значення величин критерію t-Student для коефіцієнтів поліному регресії

Коефіцієнт	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
Критерій t-Student	7,597	2,694	4,197	4,142	6,318	5,234	4,84	4,976	3,991	4,483

Табличне значення критерію *t-Student* за довірчої вірогідності 95% та  $n - p = 5$  ступенях свободи  $t\text{-Student}_{\text{Tabl}} = 2,571$ . Як видно, скрізь  $t\text{-Student}_{\text{Obs}} > t\text{-Student}_{\text{Tabl}}$ , що означає достовірність визначених значень коефіцієнтів поліному регресії з довірчою вірогідністю 95%.

Вектори мінімальних « $\min\beta$ » та відповідно максимальних « $\max\beta$ » можливих значень коефіцієнтів поліному регресії з довірчою вірогідністю 95% обчислені за формулою:

$$\begin{aligned} \min \beta_i &= \beta_i - \sigma\beta_i \cdot t_{\text{Student}_{\text{Tabl}}} ; \\ \max \beta_i &= \beta_i + \sigma\beta_i \cdot t_{\text{Student}_{\text{Tabl}}} . \end{aligned} \quad (3.23)$$

Вектори мінімальних « $\min\beta$ » та відповідно максимальних « $\max\beta$ » можливих значень коефіцієнтів поліному регресії за довірчої вірогідності 95% наведені у таблиці 3.12.

Таблиці 3.12 – Вектори мінімальних « $\min\beta$ » та відповідно максимальних « $\max\beta$ » можливих з довірчою вірогідністю 95% значень коефіцієнтів поліному регресії

Коефіцієнт	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
$\min\beta$	219,889	-7,793	-13,532	-91,057	0,089	0,091	3,465	-0,16	-0,925	0,324
$\max\beta$	444,82	-0,183	-3,253	-21,315	0,212	0,268	11,313	-0,051	-0,2	1,193

Коефіцієнт детермінації  $R^2$  має величину близьку до «1», що означає високу відповідність знайденої математичної моделі до експериментів:

$$R^2 = \frac{\beta^T \cdot X^T \cdot Y - n \cdot MY^2}{Y^T \cdot Y - n \cdot MY^2} = 0.987 \quad (3.24)$$

де,  $MY$  – середньоарифметичне значення експериментальних результатів часу гасіння.

Величина критерію Фішера, обчислена за формулою:

$$F = \frac{MS_{Regr}}{MS_{Res}} = 40,602 \quad (3.25)$$

Ця величина значно перевищує табличну величину критерію Фішера, що за обчислених ступенях свободи згідно з формул (18) та (21) та довірчою вірогідністю 95% дорівнює 3,482. Це означає високу адекватність отриманих формули до результатів експериментів.

При підстановці значень величин регресійних коефіцієнтів поліному регресії, (таблиця 3.8) отримана кінцева формула:

$$f(x, y, z) = 332,35 - 3,99 \cdot x - 8,39 \cdot x^2 + 56,19 \cdot y + 0,151 \cdot y^2 + 0,18 \cdot z + 7,39 \cdot z^2 - 0,11 \cdot x \cdot y - 0,56 \cdot x \cdot z + 0,76 \cdot y \cdot z \quad (3.26)$$

де,  $x$  – процентний вміст поліакрилату у концентраті;

$y$  – процентний вміст олії у концентраті;

$z$  - процентний вміст піноутворювача у концентраті.

Для визначення оптимальних значень факторів, за яких має місце мінімальне значення функції відгуку, що відповідає мінімальному часу гасіння, вирішується система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) = 0, \Rightarrow 0,56 \cdot z - 0,105 \cdot y - 2 \cdot 8,39 \cdot x - 3,99 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, z) = 0, \Rightarrow 332,35 \cdot z - 0,105 \cdot x + 2 \cdot 0,151 \cdot y + 56,19 = 0; \\ \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z) = 0; \Rightarrow 332,35 \cdot y - 0,105 \cdot x + 2 \cdot 7,39 \cdot z + 0,18 = 0; \end{cases} \quad (3.27)$$

Рішеннями цієї системи рівнянь є:

$$x_c = 28,246 \%, \quad y_c = 23,974 \%, \quad z_c = 3,542 \%.$$

Знайдено оптимальний склад концентрату, що відповідає мінімуму часу гасіння модельного вогнища 5А:

- відсотковий вміст поліакрилату у концентраті 28,25 %;
- відсотковий вміст олії у концентраті 23,97 %;
- відсотковий вміст піноутворювача у концентраті 3,54 %.

На рисунку 3.3 зображено тривимірний переріз площиною (де вміст піноутворювача 4%) чотирьохвимірного простору поверхні відгуку та експериментальні точки, що потрапили в цей переріз.

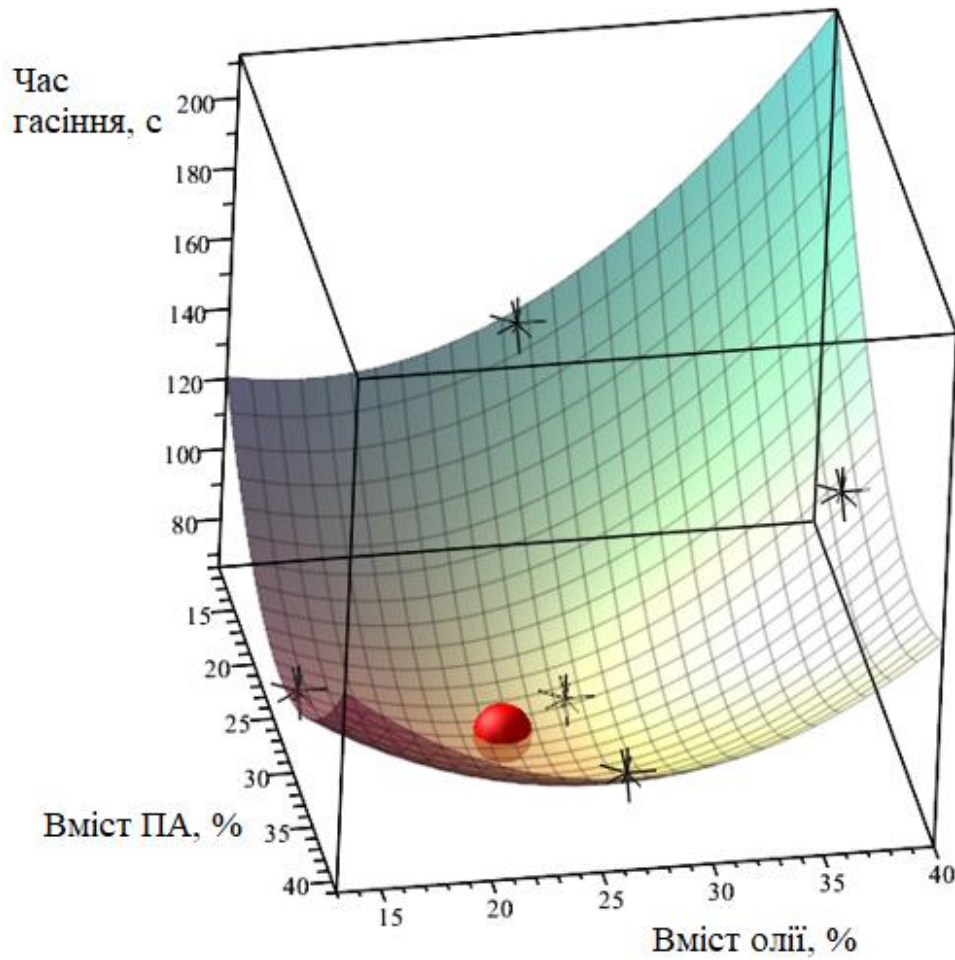


Рисунок 3.3 – тривимірний переріз площиною (де вміст піноутворювача 4%) чотирьохвимірному простору поверхні відгуку та експериментальні точки, що потрапили в цей переріз

На рисунку 3.4 зображено трьохвимірний переріз площиною (де вміст олії 24%) чотирьохвимірному простору поверхні відгуку та експериментальні точки, що попали в цей переріз, а також точка знайденого оптимального складу концентрату.

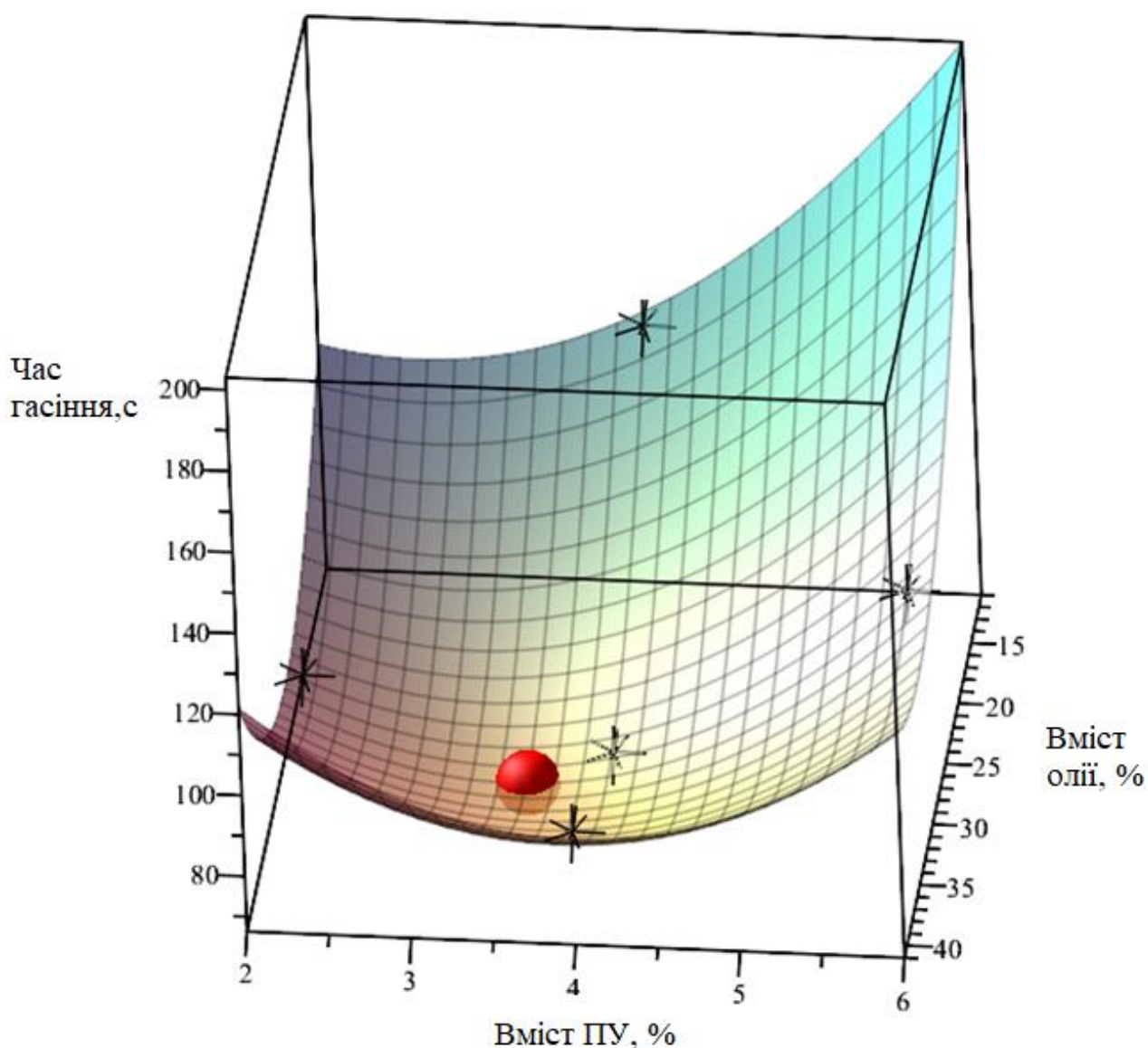


Рисунок 3.4 – трьохвимірний переріз площиною (де вміст олії 24%) чотирьохвимірного простору поверхні відгуку та експериментальні точки, що потрапили в цей переріз, а також точка знайденого оптимального складу концентрату

На рисунку 3.5 зображено трьохвимірний переріз площиною (де вміст поліакрилату 28%) чотирьох вимірного простору поверхні відгуку та експериментальні точки, що потрапили в цей переріз, а також точка знайденого оптимального складу концентрату.

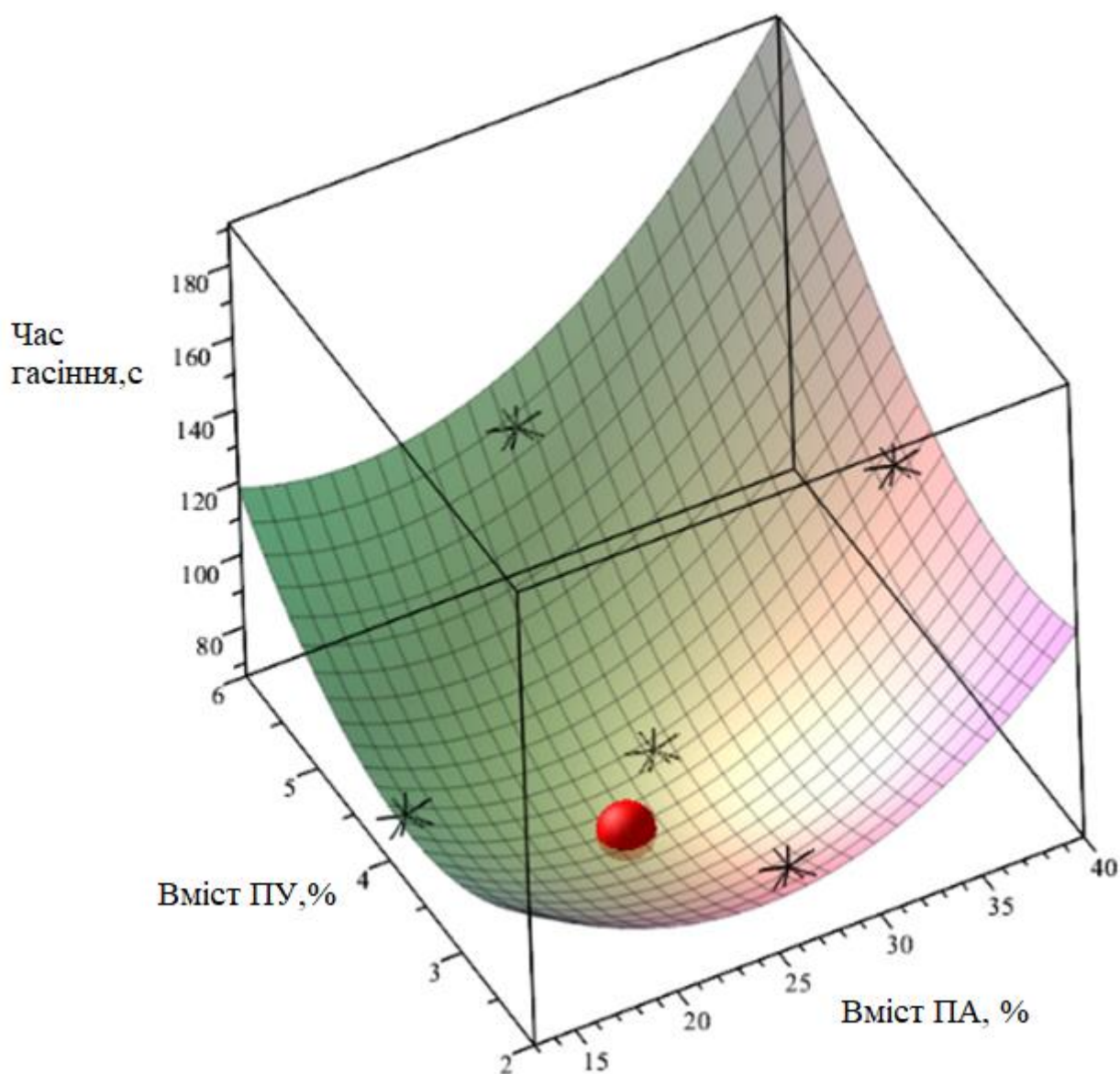


Рисунок 3.5 – трьох вимірний переріз площиною (з відповідним вмістом інгредієнтів) чотирьохвимірному простору поверхні відгуку, що відповідає часу гасіння певного складу

### 3.3. Висновки по розділу

1. Дисперсію концентрату отримують диспергуванням подрібненого сухого полімеру, який наповнений водою, у рослинній олії, необов'язково з відповідними поверхнево-активними речовинами та стабілізуючими речовинами, якщо це необхідно або бажано. У кращому варіанті здійснення дисперсія містить сухий зшитий полімер у рослинній олії та відповідний суспендувальний агент. Для приготування дисперсії можна використовувати практично будь-яку нерозчинну у

воді рослинну олію. Доцільно, щоб рослинна олія була рапсовою. Для забезпечення стабільності та текучості дисперсії рекомендовано використовувати суспендувальний агент, наприклад – пінистий діоксид кремнію. Це дає змогу вводити дисперсію у водопостачання в рідкій формі, щоб її можна було легко подавати за допомогою стандартного протипожежного обладнання.

2. Полімерні частинки, отримані внаслідок полімеризації, зазвичай подрібнюються до розміру менше ніж приблизно 70 мкм. Однак можуть використовуватися полімерні частинки розміром від близько 10 мкм до 200 мкм.

3. Визначено оптимальний склад концентрату модифікованої водної вогнегасної речовини: гелеутворювальний поліакрилат – 28 мас. %; олія рапсова рафінована – 24 мас. %; піноутворювач загального призначення – 4 мас. %; вода – 44 мас.% та технологію його створення, яка полягає в тому, що на першому етапі проводиться змішування поліакрилату з рапсовою рафінованою олією до стану однорідної речовини, а на другому – змішування суміші поліакрилату та олії із піноутворювачем та водою. Концентрат має в'язкість щонайменше 100 сП. Концентрат у кількості від 1,5 об'ємного відсотка (об.%) до 2 об.% треба додавати у воду.

4. Під час додавання концентрату до ПУ можливе створення гелевого піноутворювача, який має такі покращенні експлуатаційні характеристики, як стійкість, адгезію, що призводять до скорочення витрат ВВР, оскільки отримана воднодобавкова суміш має відносно високу в'язкість.

5. Модифікована вогнегасна речовина – це рідка колоїдна система, в якій тверді частинки рівномірно розподілені в рідині, що характеризується текучістю, а гелеутворення поліакрилатів відбувається внаслідок гідратації та іонізації карбоксильних груп полімеру з формуванням надалі просторової сітки за рахунок фізичних або іонних зв'язків між макромолекулами. Це забезпечує перехід системи із золю в гель під час випаровування води в процесі подавання модифікованої вогнегасної речовини до осередку пожежі.

## **4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВОГНЕВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН**

### **4.1. Програма та методика експериментальних вогневих досліджень**

#### **Мета та загальна характеристика експериментальних досліджень**

Експериментальні вогневі дослідження спрямовані на встановлення закономірностей впливу складу та концентрації гелеутворювальних полімерних сполук у водних вогнегасних речовинах на показники їх вогнегасної ефективності під час гасіння пожеж класів А та В.

Необхідність проведення таких досліджень зумовлена обмеженою ефективністю традиційних водних та пінних вогнегасних речовин, якщо процес гасіння супроводжується інтенсивним випаровуванням, стіканням води з поверхні горючого матеріалу та повторним займанням. Використання гелеутворювальних полімерних сполук дає змогу реалізувати повний комплекс вогнегасних факторів, що потенційно підвищує загальну ефективність гасіння.

#### **Програма експериментальних вогневих досліджень**

У програмі експериментальних вогневих досліджень передбачено поетапне виконання комплексу робіт, що забезпечують одержання репрезентативних та відтворюваних результатів.

На першому етапі здійснювалась підготовка зразків водних вогнегасних речовин із різним вмістом гелеутворювальних полімерних компонентів та допоміжних добавок. Формування складів здійснювалось із урахуванням можливості їх практичного застосування в наявних засобах пожежогасіння.

На другому етапі проводилися експериментальні вогневі випробування під час гасіння модельних вогнищ пожеж класу 5А та класу 55В1, що дало змогу оцінити ефективність дії досліджуваних складів за різних механізмів горіння.

На третьому етапі здійснювали оброблення та аналіз отриманих експериментальних даних з порівнянням надалі результатів із показниками традиційних вогнегасних речовин.

### Методика експериментальних досліджень у разі гасіння пожеж класу А

Дослідження вогнегасної ефективності під час гасіння модельних вогнищ пожеж класу А проводили відповідно до вимог стандарту ДСТУ EN 3-7:2014 [92].

Для гасіння використовували пересувний вогнегасник, заправлений 10 л досліджуваної вогнегасної речовини. Перед початком та після завершення кожного експерименту здійснювали зважування вогнегасника з метою визначення фактичної витрати вогнегасної речовини.

Під час проведення експериментів реєстрували:

- час ліквідації відкритого полум'я;
- витрату вогнегасної речовини;
- характер взаємодії вогнегасного розчину з поверхнею горіння;
- утворення захисних гелевих плівок.

Отримані показники використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів за формулою (4.1).

$$Q_A = \frac{q \times \tau_{\text{гас}}}{S}, \quad (4.1)$$

де:  $Q_A$  – показник вогнегасної здатності, кг/м<sup>2</sup>;

$q$  – витрата, кг/с;

$\tau_{\text{гас}}$  – тривалість гасіння, с;

$S$  – площа модельного вогнища, м<sup>2</sup>.

### Методика експериментальних досліджень під час гасіння пожеж класу В

Дослідження під час гасіння пожеж класу В проводили відповідно до вимог ДСТУ 3789:2015 [93].

На першому етапі визначали кратність та стійкість піни середньої кратності згідно з п. 10.5 [93]. Вимірювання здійснювали з використанням вагового методу та фіксацією часу руйнування піни.

На другому етапі проводили гасіння модельного вогнища пожежі 55В1 піною середньої кратності. Подавання піни здійснювали за нормованої інтенсивності, водночас фіксували тривалість гасіння та витрату вогнегасної речовини.

Отримані показники використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів за формулою (4.1).

Також увагу приділяли аналізу процесу утворення гелевої або плівко-гелевої захисної структури на поверхні горючої рідини після припинення горіння.

### **Критерії оцінювання вогнегасної здатності**

Оцінювання вогнегасної здатності водних гелеутворювальних розчинів здійснювали за сукупністю кількісних і якісних показників, до яких належали:

- тривалість гасіння;
- питома витрата вогнегасної речовини;
- кратність та стійкість піни;
- здатність до утворення стабільного ізолювального шару;
- відсутність повторного займання.

Такий комплексний підхід дав змогу всебічно оцінити ефективність дії гелеутворювальних полімерних сполук у складі водних вогнегасних речовин.

### **Оброблення та аналіз експериментальних результатів**

Оброблення результатів експериментальних досліджень здійснювали з використанням методів статистичного аналізу. Проводили порівняння середніх значень основних показників ефективності для різних складів вогнегасних речовин, а також аналізували вплив гелеутворення на механізм гасіння.

Отримані результати стали основою для формулювання науково обґрунтованих висновків щодо доцільності використання гелеутворювальних полімерних сполук у складі водних вогнегасних речовин.

## **Програма та методика експериментальних вогневих досліджень з оцінювання ефективності водних гелевих вогнегасних речовин під час створення вогнеперешкоджувальних смуг**

### **Наукове обґрунтування досліджень**

Експериментальні дослідження спрямовані на оцінювання можливості використання вологоутримувального ПА як основи для створення гелеутворювальної вогнезахисної речовини з метою використання її під час створення вогнеперешкоджувальних смуг.

Актуальність досліджень зумовлена необхідністю підвищення ефективності локалізації низових пожеж у природних екосистемах шляхом створення вогнеперешкоджувальних смуг, які забезпечують тривале утримання вологи, зниження інтенсивності теплового впливу та перешкоджають поширенню фронту горіння.

Експериментальні дослідження проводилися за нормальних умов, максимально наближених до реальних умов розвитку низових пожеж, з урахуванням природних факторів та типових горючих матеріалів природних екосистем.

### **Нормативно-методична основа досліджень**

За основу для проведення експериментальних досліджень у частині методики випробувань використана Програма та методика випробувань з визначення ефективності застосування загороджувальних смуг, яку розробили в рамках виконання НДР «Загороджувальні смуги» [94], 2017 р.

Окремі положення зазначеної методики були адаптовані з урахуванням фізико-хімічних властивостей досліджуваних гелеутворювальних полімерних розчинів.

### **Програма експериментальних досліджень**

У програмі експериментальних досліджень передбачено поетапне виконання комплексу робіт:

- приготування водних вогнезахисних розчинів на основі сухого ПА;

- формування вогнеперешкоджувальних смуг заданої ширини та товщини шару;
- фіксація параметрів взаємодії полум'я з вогнеперешкоджувальною смугою;
- оцінювання ефективності створених вогнеперешкоджувальних смуг шляхом порівняння результатів досліджень із результатами досліджень наявної вогнезахисної речовини СГ-1, яку розробили в рамках виконання роботи [94].

### **Методика формування вогнезахисної смуги**

Вогнеперешкоджувальну смугу формували шляхом нанесення гелеутворювального водного розчину на поверхню ґрунту та рослинних залишків за допомогою розпилювального пристрою, який широко використовується у сільському господарстві.

Під час формування смуги забезпечували рівномірність нанесення розчину, задану ширину та суцільність смуги.

### **Методика проведення експериментальних вогневих досліджень**

Суть методу експериментальних досліджень полягає у визначенні можливості або неможливості поширення полум'я на вогнеперешкоджувальну смугу, створену за допомогою водних вогнезахисних речовин.

Перед початком досліджень формували вогнище низової пожежі, яке складалось із суміші наземних горючих матеріалів (дрібних гілочок, кори, шишок та інших) хвойних порід дерев, які належать до найбільш пожежонебезпечних насаджень.

Під час досліджень фіксували досягнення або недосягнення полум'ям межі вогнеперешкоджувальної смуги, наявність перекидання полум'я через смугу, збереження або руйнування гелевої плівки.

### **Критерії оцінювання вогнезахисної ефективності**

Оцінювання ефективності вогнезахисної речовини здійснювали за такими критеріями:

- здатність вогнеперешкоджувальної смуги перешкоджати поширенню полум'я;
- тривалість збереження вогнезахисних властивостей;
- цілісність та стабільність гелевого шару після теплового впливу;
- відсутність повторного займання за смугою.

### **Оброблення та аналіз результатів**

Отримані експериментальні дані підлягали узагальненню та аналізу з використанням порівняльного підходу. Проводилося зіставлення ефективності сформованих вогнезахисних смуг із показниками смуг, створених із застосуванням традиційних водних та модифікованих розчинів.

Результати аналізу використовувалися для формулювання висновків щодо доцільності застосування водних розчинів на основі ПА для локалізації низових пожеж у природних екосистемах.

### **4.2. Гасіння модельних вогнищ класу А**

Унаслідок проведених експериментальних досліджень для оцінки вогнегасної здатності щодо гасіння модельного вогнища 5А були виміряні та розраховані:

- час ліквідації відкритого полум'я;
- витрата вогнегасної речовини для ліквідації відкритого полум'я (величина, що не залежить від розміру модельного вогнища);
- ефективність водної вогнегасної речовини.

Гасіння проводили згідно з рекомендаціями [92] пересувним вогнегасником (рисунок 4.1), до якого заливали 10 літрів вогнегасної речовини. Загальна вага вогнегасника не перевищувала 20 кг. Під час проведення дослідів вогнегасник зважували до та після гасіння.



Рисунок 4.1– Загальний вигляд установки для гасіння модельних вогнищ

### Зразки для досліджень

Під час проведення вогневих експериментальних досліджень використовувались ВВР, які складались із 98,5 % води та 1,5 % концентрату створеної модифікованої вогнегасної речовини. Як концентрати модифікованої вогнегасної речовини використовувались:

**Склад 1:** водопоглинальний нерозчинний ПА – 27–29 мас.%; олія рапсова рафінована – 23–25 мас.%, ПУ загального призначення вітчизняного виробництва – 6 мас.%; вода – 46–48 мас. %.

**Склад 2:** водопоглинальний нерозчинний ПА – 28 мас.%; олія рапсова рафінована – 24 мас.%, ПУ загального призначення вітчизняного виробництва – 4 мас.%; вода – 44 мас. %.

**Склад 3:** водопоглинальний нерозчинний ПА – 35 мас.%; ПУ AFFF закордонного виробництва – 1 мас. %; вода – 64 мас. %.

Для приготування зразків робили наважки матеріалів, що використовуються для приготування концентрату, а саме – сухі частки нерозчинного вологопоглинального ПА фракції менше ніж 125 мкм, олії, ПУ та води. Робили дисперсію полімеру в олії, ретельно змішували та додавали відповідну кількість ПУ та води.

У таблиці 4.1 наведено усереднені результати експериментальних досліджень з визначення вогнегасної здатності під час гасіння модельних вогнищ класу 5А.

Таблиця 4.1 – Усереднені результати експериментальних досліджень з визначення вогнегасної здатності під час гасіння модельних вогнищ класу 5А

№ досліджу	Склад водного вогнегасного розчину	Час гасіння, с	Показник вогнегасної здатності, кг/м <sup>2</sup>
1	Водний розчин ПУ АFFF (Україна) – 6%	182	0,97
2	Водний розчин ПУ АFFF (ФРН) – 6%	134	0,62
3	Водний розчин концентрату (склад 1) – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%	136	0,64
4	Водний розчин концентрату (склад 1) – 1,5 %, ПУ АFFF (ФРН) – 6%	89	0,56
5	Водний розчин концентрату (склад 2) – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%	102	0,59
6	Водний розчин концентрату (склад 2) – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%, КМЦ – 0,02%	72	0,54
7	Водний розчин концентрату (склад 3) – 1,5 %, ПУ АFFF (Україна) – 1 %, карбонат калію – 6%	58	0,50

Використано шість пінних та один водний гелеутворювальний розчин. Розчини 1 та 2 застосовувалися, як еталонні для порівняльного аналізу вогнегасної ефективності. Як і передбачалося, використання гелевих вогнегасних розчинів забезпечує скорочення часу гасіння та зменшення питомої витрати вогнегасної речовини навіть за умови застосування піноутворювачів загального призначення (склади 3 та 5) порівняно з водним розчином плівкоутворювального піноутворювача АFFF вітчизняного виробництва (склад 1).

Порівняння з імпортом піноутворювачем AFFF підвищеної в'язкості (склад 2) показало, що розроблені гелеутворювальні склади мають зіставні показники часу гасіння та питомої вогнегасної здатності, а у разі введення до їх складу загусника КМЦ (склад 6) забезпечують подальше зниження питомої витрати вогнегасної речовини до 0,54 кг/м<sup>2</sup>, що відповідає покращенню вогнегасної ефективності приблизно у 1,15 раза відносно імпортного еталонного розчину.

На особливу увагу заслуговує розчин 7, призначений спеціально для гасіння пожеж класу А в екосистемах. Ми зазначали, що додавання поташу до пінного розчину не має сенсу, оскільки кратність такого розчину близька 1. Але наявність карбонату калію у водному гелевому розчині, який перебуває у наповнених водою частках гелю, значно підвищує ефективність гасіння. Водночас на модельному вогнищі утворюються захисна плівка (рисунок 4.2).



а

б

Рисунок 4.2 – Погашені модельні вогнища з утвореними на поверхнях захисними плівками:

- а) у разі використанні пінних гелевих розчинів на основі ПА;
- б) у разі використанні водних гелевих розчинів на основі ПА.

Отримані результати оформлено як протокол та наведено у додатку Г.

### 4.3. Гасіння модельних вогнищ класу В

Випробування здійснювали згідно з вимогами [93]. Під час досліджень

визначали тривалість гасіння піною середньої кратності (п. 17 табл. 1 [93]), яка повинна становити не більш ніж 120 с.

Гасіння проводили згідно з рекомендаціями [92] пересувним вогнегасником (рис. 4.1), до якого заливали 10 літрів вогнегасної речовини. Загальна вага вогнегасника не перевищувала 20 кг. Під час проведення дослідів вогнегасник зважували до та після гасіння.

Під час проведення вогневих експериментальних досліджень використовувались ВВР, які складались із 92,5 % води, 6 % ПУ загального призначення вітчизняного виробництва та 1,5 % концентрату створеної модифікованої вогнегасної речовини. Як концентратумодифікованої вогнегасної речовини використовували: водопоглинальний нерозчинний ПА – 40 мас.%; олію рапсова рафінована – 57 мас.%; сорбітан монолеат – 2,2 мас.%; діоксид кремнію – 1,7 мас.%; КМЦ – 0,1 мас.%.

Сухі речовини, полімер, КМЦ та  $\text{SiO}_2$ , змішували між собою та робили дисперсію в олії з додаванням рідкого сорбітан моноолеату. Отримана суміш – концентрат гелеутворювачів, після ретельного перемішування була готова до застосування.

Отриману суміш у кількості 10 г розчиняли у 600 г піноутворювача та отримували 6% гелевий піноутворювач, який надалі використовували для проведення експериментів.

Комбінація сухого, подрібненого полімеру в рослинній олії, що містить ПАР з низьким рівнем ГЛБ – сорбітан моноолеат (Span-80), та пінистого діоксиду кремнію з водою утворює гладкий однорідний гель, як ефективний протипожежний продукт. Без ПАР з низьким ГЛБ, 2 об.% розчин концентрату у воді може дати вертикально стабільний гель, але покриття не буде настільки однорідним, а за концентрації вище 2,5 об.% покриття стають розсипчастими. Під час проведення експериментів визначено, що більш ніж 1,7 % розчин концентрату у воді не зміг забезпечити стабільне подавання розчину на гасіння стволем середньої кратності через відносно велику в'язкість розчину. Отже, надалі під час проведення дослідів використовували концентрацію не більше ніж 1,5%.

Для визначення витрати вогнегасної речовини установку для отримання піни розташовували на вагах та контролювали витрати вогнегасної речовини до та після процесу гасіння. Перед підпалом пального в деці, на час вільного горіння, ствол-генератор піни виносили із зони полум'я. Після  $(60 \pm 5)$  с вільного горіння подавали піну з навітряного боку на поверхню палаючої рідини із закріпленого на борті дека ствола-генератора. Фіксували тривалість гасіння, що дорівнює проміжку часу від початку подавання піни до припинення горіння. Результат вважали позитивним, якщо тривалість гасіння не перевищувала 120 с. Усереднені результати тривалості гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В за нормованої інтенсивності згідно з [1] наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати досліджень з визначення тривалості гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1 з використанням розчину піноутворювачів

№ досліду	Склад водного вогнегасного розчину	Час гасіння, с	Показник вогнегасної здатності, кг/м <sup>2</sup>
1	Водний розчин ПУ АFFF (Україна) – 6%	58	2,20
2	Водний розчин ПУ АFFF (ФРН) – 6%	44	1,67
3	Водний розчин концентрату – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%	39	1,48
4	Водний розчин концентрату – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%, КМЦ – 0,02%	33	1,25

На рисунку 4.3 наведено погашене запропонованим гелевим розчином модельне вогнище. На поверхні бачимо гелеву плівку, що утворюється та виконує роль ізоляції поверхні, як і у разі використання плівкоутворювального ПУ [1,87].



Рисунок 4.3 – Захисна гелева плівка, що утворилася підчас гасіння модельного вогнища 55В розчином на основі гелевого концентрату та піноутворювача загального призначення

Запропоновані склади концентратів добавок до наявних ПУ загального призначення мають експлуатаційні показники на рівні імпортних високов'язких плінкоутворювальних ПУ та в 1,9 раза кращі за вітчизняні плівкоутворювальні ПУ, що підтверджує ефективність у разі їх використання як добавки до ПУ. Додавання до гелевого концентрату КМЦ покращує ефективність гасіння внаслідок скорочення часу гасіння та витрат вогнегасної речовини.

Додатково проведено експериментальні дослідження із визначення вогнегасної здатності модифікованої ВВР на основі ПА під час гасіння трансформаторної оливи [82].

У межах експериментальних досліджень згідно з [82] вивчалася можливість застосування порошкових композицій з гелеутворювальними властивостями [3,4], які у разі змішування з водою диспергуються та формують стійкі водні суспензії з вираженими вогнезахисними характеристиками.

Як функціональні полімерні добавки використовувалися нерозчинні та водорозчинні полімери з гелеутворювальною здатністю. Зокрема, застосовувався нерозчинний ПА, що являє собою зшиті сополімери калієвої та амонійної солей акрилової кислоти. Унаслідок інтенсивного наповнення водою цей полімер формує гелеподібні частинки, стабільні за наявності ПАР і мінеральних наповнювачів.

Гранулометричний склад полімеру становив 20 – 60 меш, а концентрація у водному середовищі варіювалася в межах 0,01– 0,5 %.

Також застосовували водорозчинний високомолекулярний поліакриламід ПАА згідно з рекомендаціями [95], що є сополімером акрилової кислоти, акриламіду та їх похідних, зшитими поліефірними агентами. Зазначені ПАА характеризуються високою сумісністю з ПАР і мінеральними дисперсними добавками та забезпечують підвищену в'язкість і тиксотропні властивості водних розчинів. Гранулометрія поліакриламідних полімерів становила 20 – 60 меш, а концентрація у воді – 0,01– 0,5 %.

Додатково до складу водних гелевих систем вводили рафіновану ріпакову олію, яка виконувала функції рідинної фази та допоміжного емульгувального компонента. Як ПАР застосовували ПУ загального призначення вітчизняного виробництва у концентрації 6 %, що забезпечувало стабілізацію дисперсної системи та покращення змочувальних властивостей розчину.

Експериментальні дослідження склалися з трьох серій дослідів, під час яких визначалися масова витрата вогнегасної речовини, інтенсивність її подавання, а також температури палива та полум'я. Для імітації розливу трансформаторної оливи використовували металеве деко площею 4 м<sup>2</sup>. Кількість пального підбиралася таким чином, щоб сформувати рівномірний шар трансформаторної оливи товщиною 20 мм. Час вільного горіння перед початком гасіння становив 120 с.

Вимірювання температури трансформаторної оливи та полум'я здійснювалося з використанням термопарного дроту типу К. Для контролю температури палива термопара встановлювалася посередині висоти шару оливи на перетині діагоналей металевого дека. Температуру полум'я вимірювали на висоті 2 мм над поверхнею пального в тій самій характерній точці. З метою запобігання похибкам і збоїв реєстрації температурних даних застосовувався термопарний дріт із керамічним захисним покриттям. Додатково контроль температури полум'я здійснювався за допомогою тепловізора.

Робочі моменти проведення експериментальних досліджень з визначення вогнегасної здатності модифікованої ВВР на основі ПА та ПАА наведено на

рисунку 4.4, а усереднені результати зміни температури трансформаторної оливи та полум'я – на рисунку 4.5.



Рисунок 4.4 – Робочі моменти проведення досліджень з визначення вогнегасної здатності модифікованої ВВР на основі ПА та ПАА

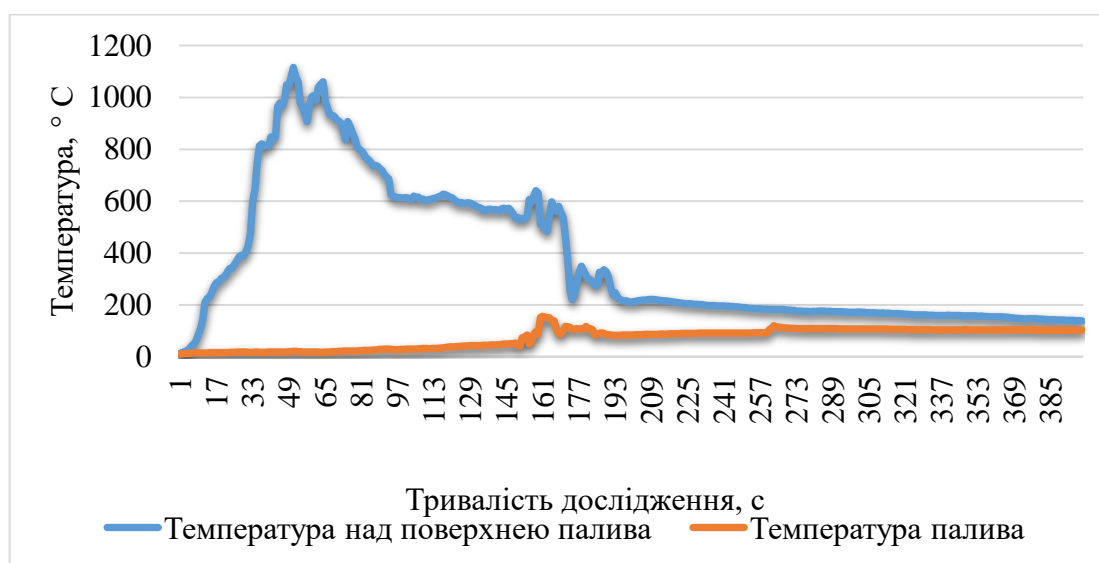


Рисунок 4.5 – Результати дослідження змін температури трансформаторного мастила та полум'я

За результатами досліджень встановлено, що максимальна температура прогрівання палива по середині висоти його покриття становила 155 °С, що свідчить про формування високотемпературної зони по всій товщині шару трансформаторної оливи. За таких умов застосування води як основного вогнегасного засобу є потенційно небезпечним, оскільки контакт води з перегрітою оливою може спричинити інтенсивне пароутворення, розбризування гарячої оливи, збільшення площі пожежі та опікових ризиків для особового складу, ускладнення процесу локалізації та збільшення часу гасіння.

Таким чином, гасіння подібних осередків водою є недоцільним і може призвести до ускладнення пожежі, що підтверджує необхідність використання модифікованих ВВР.

Слід зазначити, що масова витрата модифікованої ВВР становила 0,125 кг/с, а інтенсивність подавання – 0,0312 кг/(с×м<sup>2</sup>), що забезпечило формування стабільного масообмінного потоку на поверхні горючої рідини. Зазначені параметри подавання є достатніми для створення спрямованого охолоджувально-ізолювального впливу на зону горіння, що своєю чергою сприяло швидкому руйнуванню полуменевої фази та зниженню температури верхнього шару трансформаторної оливи. Отримані експериментальні дані свідчать про відповідність вибраного режиму подавання вогнегасної речовини вимогам до ефективного гасіння пожеж класу В (зокрема трансформаторних олив) і підтверджують доцільність застосування полімермодифікованих гелевих складів у реальних умовах ліквідації загорянь рідких нафтопродуктів [82].

Отримані результати оформлено як протокол та наведено у додатку Г.

#### **4.4. Дослідження можливості створення вогнеперешкоджувальних смуг**

Досліджувалась можливість використання вологоутримувального ПА як водного розчину прозорих гранул, які після диспергування у воді підвищують адгезію до горючих матеріалів та здатні до плівко / гелеутворення. Зазначені властивості сприяють формуванню стійкого гелевого шару, придатного для створення вогнеперешкоджувальних смуг [83].

Суть експериментальних досліджень згідно з [83] полягала у визначенні можливості поширення полум'я через вогнеперешкоджувальну смугу, сформовану із застосуванням модифікованих ВВР порівняно із вогнеперешкоджувальною смугою, яка створена із застосуванням наявних вогнезахисних засобів. Для оцінювання тривалості ефективної дії вогнеперешкоджувальної смуги дослідження повторювали з інтервалом 6 годин з моменту нанесення полімерних гелевих розчинів.

Для створення вогнеперешкоджувальної смуги використовували суміш наземних горючих матеріалів хвойних порід дерев (дрібні гілки, кора, шишки тощо), які належать до найбільш пожежонебезпечних. Перед проведенням експериментів суміш кондиціювали протягом 24 год за температури  $(45 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Підготовлену суміш масою  $(1000 \pm 10)$  г рівномірно розміщували в металевому деці з розмірами  $(900 \pm 5) \times (55 \pm 5)$  мм.

Оброблення вогнезахисною речовиною здійснювали методом розпилення, формуючи загороджувальну смугу шириною  $(500 \pm 1)$  мм, симетрично відносно центральної осі дека. Для ініціювання горіння застосовували бензин марки А-92 у кількості  $(25 \pm 2)$  мл, який наносили на горючі матеріали смугою шириною  $(50 \pm 10)$  мм.

Експериментальні дослідження проводили у вогневому випробувальному боксі. Перед підпалюванням створювали повітряний потік зі швидкістю  $(1,0 \pm 0,1)$  м/с. Підпалювання здійснювали з навітряного боку вздовж сторони дека, паралельної загороджувальній смузі. Після займання проводили візуальне спостереження за поширенням полум'я та фіксували глибину його проникнення у вогнеперешкоджувальну смугу.

Вогнеперешкоджувальну смугу вважали ефективною, якщо у двох повторних дослідах максимальна глибина проникнення полум'я не перевищувала половини її ширини. Результати експериментальних досліджень наведено у таблиці 4.3, а робочі моменти – на рис. 4.6.

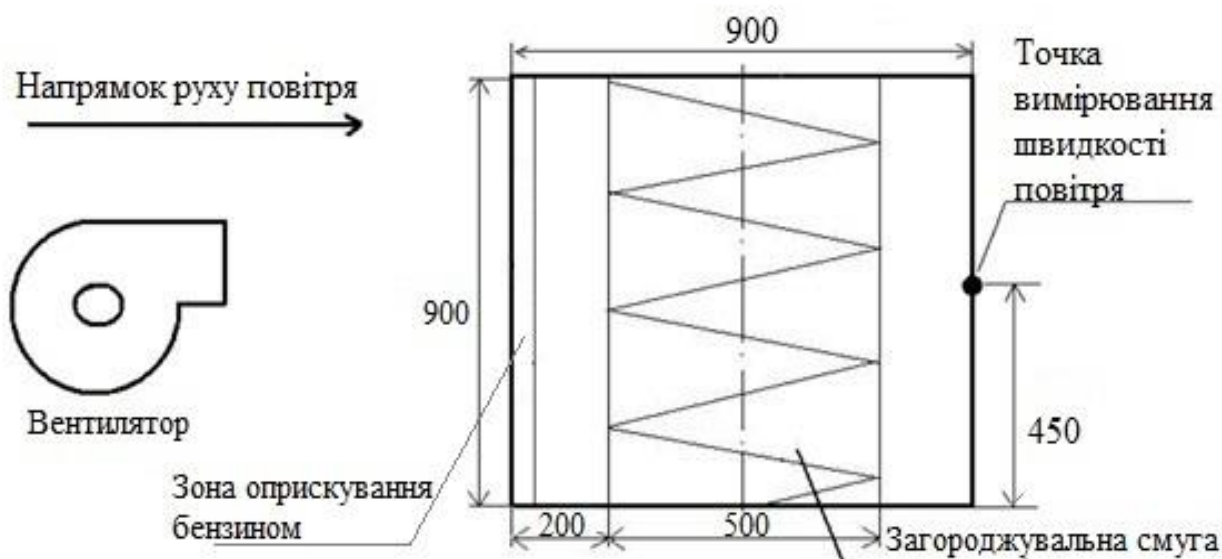


Рисунок 4.6 – Схематичне розташування у деці вогнеперешкоджувальної смуги, смуги розбризкування бензину та точки вимірювання швидкості повітря

Результати проведення досліджень наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати досліджень з визначення можливості застосування модифікованої ВВР для створення вогнеперешкоджувальної смуги

Час проведення досліджень, год	Результати	
	Дослід 1 (речовина на основі гелеутворювального поліакрилату)	Дослід 2 (речовина СГ-1 (15% водний розчин суміші діамоній фосфату та карбаміду))
6	Прогорання немає	Прогорання немає
12	Прогорання немає	Прогорання глибиною 62 мм
18	Прогорання немає	-
24	Прогорання немає	-
30	Прогорання глибиною 45 мм	-
36	Прогорання глибиною 350 мм	-

Робочі моменти проведення експериментальних досліджень наведено на рисунку 4.7.



Рисунок 4.7 – Робочі моменти проведення експериментальних досліджень

Створена вогнеперешкоджувальна смуга на основі гелеутворювального поліакрилату зберігає вогнезахисні властивості до 30 годин і є екологічно безпечною, тоді як традиційний засіб діє лише до 12 годин і містить мінеральні добрива у концентраціях, які суттєво перевищують допустимі значення для внесення до ґрунту.

#### **4.5. Рекомендації щодо приготування та застосування розробленої водної вогнегасної речовини**

У наслідок проведеної роботи для досягнення ефективності застосування пропонованих добавок залежно від класу пожежі як основу рекомендовано використовувати високо поглинальний нерозчинний полімер ПА [1,80–83,85,86].

Гелеутворювальні концентрати на основі ПА надалі можуть бути розчинені у воді – для створення водних вогнегасних розчинів або піноутворювачах – у разі застосування пінних розчинів.

Полімерний гелеутворювач ПА є полімерним суперабсорбентом останнього покоління, який у разі контакту з водою наповнюється нею і здатний зв'язати кількість води, яка в сотні разів перевищує його власну масу. Гелеутворювач ПА

застосовується як сухий порошок, що може бути різної фракційності, і під час змішування з водою набуває вигляду гелю. Запропоновано рідкий концентрат у виді дисперсії сухих часток полімеру в олії з додаванням ряду добавок для посилення технологічних та експлуатаційних характеристик розчину, що буде отримано.

Під час гасіння пожеж класу А з використанням гідрогелів на поверхні твердих тіл утворюється захисний ізолюювальний шар, який на 90...98% складається із води. В'язкість гідрогелю вища за воду, що дає змогу зберігати захисний шар на похилих поверхнях. Для гасіння пожеж та вогне-теплозахисту рекомендовано застосовувати різні концентрації гідрогелю у ВВР – від 0,1 % до 0,4 % до об'єму вогнегасного розчину.

Загалом ПА рекомендовано застосовувати у разі гасіння пожеж класу А та В, зокрема пожеж в екосистемах. Особливо ефективним буде застосування гідрогелю під час гасіння з повітря. Гідрогель дає змогу значно скоротити витрати рідини випарування у разі подавання з літака (гвинтокрила). У разі додавання в розчин гідрогелю контрастної фарби є можливість профарбувати крони дерев з метою позначення межі прокладеної смуги. Висока в'язкість розчину (1...1,2 Па×с) забезпечує економне витрачання вогнегасної речовини, знижуючи його витрати під час скидання з літаків-танкерів за високих швидкостей. Скинутий з літака або гвинтокрила водний вогнегасний розчин з гідрогелем більш точно і кучніше потрапляє в осередок пожежі, не розпорошується вітром, не випаровується під час наближення до відкритого полум'я та може подаватися з більших висот. Отже, не потрібно критичне зниження до цілі, що може призвести до катастрофи літака чи гвинтокрила.

Одним із перспективних напрямів є застосування модифікованої ВВР як компресійної піни з використанням безпілотних літальних апаратів. Підвищені адгезійні властивості гелеутворювальних систем забезпечують надійне закріплення вогнегасної речовини на рослинності, ґрунті та конструктивних елементах.

У разі подавання з повітря звичайна вода значною мірою втрачається через розпорошення, знос вітром та інтенсивне випаровування в зоні високих температур. Натомість модифікована ВВР має підвищену когезію, що сприяє формуванню більш

компактного та керованого струменя розпилення. Це дає змогу мінімізувати втрати рідини під час скидання, підвищити точність ураження осередку пожежі, здійснювати подавання з більших висот без суттєвого зниження ефективності, зменшити ризики для пілотованої авіації.

Використання БПЛА малого та середнього класу дає змогу оперативно доправляти модифіковану ВВР до важкодоступних ділянок, здійснювати локальне гасіння або створювати бар'єрні смуги перед фронтом пожежі. Компресійна піна на основі модифікованої ВВР може формувати структуровану піну підвищеної стійкості, що поєднує ізолювальні властивості піни та вологоутримувальні властивості гідрогелю.

Гідрогель є нешкідливим для людини та навколишнього середовища. На відміну від відомих водних розчинів, піни, токсичних порошоків, які застосовуються для пожежогасіння, гідрогель екологічно чистий і не токсичний.

#### **4.6. Оцінка економічного ефекту від застосування модифікованої водної вогнегасної речовини**

Номінальна різниця вартості між піноутворювачем загального призначення та розробленим продуктом становить 12 грн на одиницю продукції, що відповідає приблизно 15–18 % різниці у відпускній ціні. На перший погляд, це може свідчити про економічну перевагу традиційного піноутворювача. Однак аналіз фактичних показників вогнегасної ефективності демонструє протилежну тенденцію.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що питома витрата робочого розчину піноутворювача загального призначення становить у середньому 2,20 кг/м<sup>2</sup>, тоді як для розробленого продукту цей показник не перевищує 1,25 кг/м<sup>2</sup>, що на приблизно 40 – 45 % менше. Крім того, середній час гасіння скорочується на 25 – 35 %, що безпосередньо впливає на зменшення експлуатаційних витрат.

Таким чином, для досягнення еквівалентного результату гасіння у разі використання піноутворювача загального призначення необхідно витратити майже в 1,8 раза більше робочого розчину. Це призводить до збільшення витрат води,

пального, часу роботи насосного обладнання та особового складу. У масштабах гасіння пожежі площею 100 м<sup>2</sup> додаткова витрата речовини може становити близько 100 кг, що нівелює номінальну різницю у вартості закупівлі.

Отже, формально нижча ціна піноутворювача загального призначення не забезпечує реальної економії. Навпаки, з урахуванням підвищеної питомої витрати та більшої тривалості гасіння, сумарні експлуатаційні витрати можуть бути на 30 % вищими, ніж у разі застосування розробленого продукту.

Порівняно з піноутворювачем спеціального призначення розроблений продукт забезпечує безпосередній економічний ефект у розмірі близько 52 % за показником вартості одиниці продукції. Водночас його вогнегасна здатність відповідає або перевищує показники спеціалізованих високов'язких плівкоутворювальних піноутворювачів, що підтверджено експериментально.

Крім того, перевагою є зниження прихованих експлуатаційних витрат. Скорочення часу гасіння на третину сприяє зменшенню витрати пального пожежної техніки, орієнтовно на 10 – 15% на один виїзд, а також зниженню зношування насосного обладнання. Зменшення обсягів використаної вогнегасної речовини на 40 % скорочує витрати на транспортування та зберігання концентрату.

Таким чином, розроблений продукт забезпечує оптимальне співвідношення «ціна – ефективність». Його застосування дає змогу:

- зменшити витрати вогнегасної речовини до 45 %;
- скоротити тривалість гасіння на 25–35 %;
- отримати економічний ефект понад 50 % порівняно зі спеціалізованими піноутворювачами;
- уникнути додаткових експлуатаційних витрат, характерних для піноутворювачів загального призначення.

Упровадження розробленого піноутворювача є економічно доцільним та забезпечує зниження сумарних витрат на пожежогасіння без зменшення ефективності, а в окремих випадках – із суттєвим підвищенням результативності ліквідації пожеж.

#### 4.7. Висновки до розділу

1. Додавання до водних розчинів гелеутворювальних сполук на основі ПА сприяє підсиленню ефективності гасіння внаслідок поєднання ефектів охолодження та інгібування. Відзначимо також утворення на модельних вогнищах в процесі гасіння захисних плівок, що позитивно впливає на ефективність гасіння.

2. Запропонований концентрат гелеутворювальних добавок до піноутворювачів загального призначення забезпечує експлуатаційні показники, зрівняні із закордонними високов'язкими плівкоутворювальними піноутворювачами, та перевищує ефективність вітчизняного плівкоутворювального піноутворювача у 1,9 раза. Це підтверджує доцільність їх використання як модифікувальних добавок до наявних піноутворювачів.

3. Додаткове введення карбоксиметилцелюлози (КМЦ) до складу гелевого концентрату сприяє підвищенню вогнегасної ефективності через скорочення тривалості гасіння та зменшення витрат вогнегасної речовини.

4. ВВР на основі гелеутворювального водопоглинального ПА можливо використовувати під час гасіння пожеж в екосистемах як вогнезахисні речовини для створення вогнеперешкоджувальних смуг.

5. Розроблено методичні рекомендації щодо застосування модифікованої водної вогнегасної речовини на основі гелеутворювального полімеру ПА, який забезпечує формування стабільного гелевого шару із вмістом зв'язаної води до 90–98 %. Встановлено діапазон концентрацій гелеутворювача (0,1 – 0,4) %, за якого досягаються необхідні реологічні характеристики (в'язкість (1 – 1,2) Па·с) та забезпечується ефективна охолоджувально-ізолювальна дія без ускладнення подавання.

6. Економічна оцінка показала, що попри номінальну різницю вартості (15 – 18 %) порівняно з піноутворювачами загального призначення зниження питомої витрати та тривалості гасіння забезпечує скорочення сумарних експлуатаційних витрат до 30 %. Порівняно зі спеціалізованими піноутворювачами розроблений продукт забезпечує економічний ефект близько 52 %, що підтверджує доцільність його впровадження у практику пожежогасіння.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням наведено результати розв'язання актуального наукового завдання, яке полягало у розкритті закономірностей впливу фізико-хімічних властивостей композицій полімерних гелеутворювальних сполук на основі водопоглинального гелеутворювального поліакрилату на процеси займання, розвитку та припинення горіння різних речовин і матеріалів.

На основі отриманих залежностей та виявлених закономірностей сформовано такі висновки:

1. Обґрунтовано доцільність підвищення ефективності водних вогнегасних речовин шляхом застосування полімерних гелеутворювальних сполук на основі поліакрилату за рахунок формування структурованих водонаповнених гелевих систем із підвищеною адгезією та вологоутримувальною здатністю, що забезпечує комплексну реалізацію механізмів охолодження, ізолювання, флегматизації та внаслідок цього підвищення ефективності ліквідації пожеж речовин і матеріалів класів А і В.

2. Встановлено закономірність впливу концентрації полімерного водопоглинального гелеутворювача на основі поліакрилату у складі водної вогнегасної речовини на показник адгезії гідрогелю до поверхні деревини, що описується квадратичною залежністю:  $\gamma = -0,06p^2 + 1,8p + 2,5$ , мкм (де:  $\gamma$  – показник адгезії, мкм,  $p$  – концентрація гелеутворювача в розчині, мас. %), що дозволяє визначити необхідну концентрацію гелеутворювача для забезпечення підвищеної утримувальної здатності вогнегасної речовини на поверхнях твердих горючих матеріалів та підвищити охолодження осередку пожежі, та на в'язкість вогнегасного розчину, що описується експоненційною залежністю:  $\mu = 1,75 \cdot \exp(10,394 \cdot p)$ , сП (де:  $\mu$  – в'язкість вогнегасної речовини, сП,  $p$  – концентрація гелеутворювача в розчині, мас. %), що забезпечує можливість регулювання реологічних властивостей вогнегасної речовини залежно від умов пожежогасіння.

3. Обґрунтовано вимоги щодо властивостей водних вогнегасних речовин на основі поліакрилату для гасіння пожеж речовин і матеріалів класу А та В і для

протидії розвитку та забезпечення ліквідації низових пожеж в екосистемах:

- необхідно передбачити можливість оперативного приготування робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини із задалегідь створеного концентрату;
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини має бути однорідним без розшарувань;
- в'язкість робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини має бути в межах від 250 сП до 3000 сП;
- полімерна добавка має поглинати та утримувати більше 50 мас.% води від її загальної кількості;
- для забезпечення подачі робочого розчину модифікованої вогнегасної речовини до осередку пожежі необхідно, щоб речовина мала тиксотропні властивості;
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини повинен мати показник адгезії не менше ніж у 5 разів вищим порівняно із водою для забезпечення підвищеної адгезії до твердих поверхонь, що проявляється зокрема у здатності утримуватися на вертикальних і похилих поверхнях;
- розмір частинок полімеру має становити до 200 мкм, що забезпечить тривалість наповнення частинок полімеру до 150 с;
- для забезпечення стабільності системи робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини у своєму складі повинен мати стабілізатор (наприклад, діоксиду кремнію) та поверхнево-активну речовину з низьким гідрофільно-ліпофільним балансом (до 2 об. %);
- робочий розчин модифікованої вогнегасної речовини повинен забезпечувати нормовану кратність та стійкість утвореної піни;
- використання модифікованої вогнегасної речовини має забезпечувати підвищену ефективність гасіння порівняно з наявними аналогами вогнегасних речовин та запобігати повторному займанню речовин і матеріалів пожеж класів А та В;
- рецептура модифікованої вогнегасної речовини має складатись із екологічно безпечних та біологічно м'яких компонентів.

4. Запропоновано оптимальний склад концентрату модифікованої водної вогнегасної речовини: гелеутворювальний поліакрилат – 28 мас.%; олія рапсова

рафінована – 24 мас.%; піноутворювач загального призначення – 4 мас.%; вода – 44 мас.% та технологію його отримання шляхом виконання розробленого алгоритму поетапного змішування визначених компонентів для формуванням однорідної гелевої структури, що надалі забезпечує утворення стійкого вогнезахисного шару на поверхні горючих речовин і матеріалів у разі їх використання. Розроблено функціональні модифікації робочих розчинів вогнегасної речовини, що готується із запропонованого концентрату та експериментально підтверджено їх підвищену вогнегасну ефективність шляхом проведення вогневих досліджень, що проявляється у підвищенні ефективності гасіння пожеж матеріалів класу А до 44 % порівняно з речовинами на основі піноутворювачів типу AFFF та забезпеченні зіставної ефективності під час гасіння пожеж речовин і матеріалів класу В при реалізації альтернативного механізму гасіння (за рахунок створення геленаповненого ізолюючого шару). Розроблено методичні рекомендації щодо використання модифікації запропонованої речовини для стримування розвитку низових пожеж в екосистемах та показано, що внаслідок здатності утримувати значну кількість води та знижувати інтенсивність її випаровування (до 90 %) загороджувальні смуги, створені шляхом нанесення на лісову підстилку, забезпечують збільшення тривалості захисної дії у 2,5 раза порівняно із смугами, що створюються із використанням традиційних сольових вогнезахисних речовин типу СГ-1.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розроблення нових рецептур концентратів водної вогнегасної речовини з підвищеною вогнегасною здатністю шляхом їх модифікації новітніми гелеутворюючими речовинами та технології їх отримання і подавання в залежності від напрямку подальшого використання під час гасіння пожежі : звіт про НДР (заключний) / А. І. Кодрик, О. М. Тітенко, І. Г. Стилик [та ін.]. Київ : ІДУ НД ЦЗ ДСНС України, 2025. 227 с.
2. Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання : звіт про НДР (заключний) / С. Ю. Огурцов, В. О. Дунюшкин, В. С. Бенедюк [та ін.]. Київ : УкрНДЦЗ ДСНС України, 2014. 333 с.
3. Rasbash V. Analytical approach to fire safety. *Fire Surveyor*. 1980. Vol. 9, № 4. P. 20–34.
4. Жартовський С. В. Системний підхід до забезпечення активного і пасивного протипожежного захисту об'єктів. Технології захисту – 2012: XI Міжнар. виставковий форум: матеріали 14-ї Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. Київ : ІДУЦЗ, 2012. С. 180–183.
5. Шаршанов А. Я., Тарахно О. В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі : навч. посіб. Харків, 2004. 252 с.
6. Жартовський С. В., Ніжник В. В., Сізіков О. О. [та ін.]. Дослідження ефективності тонкорозпиленої водної вогнегасної речовини з цільовими добавками. Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. Львів, 2016. С. 158–162.
7. Христич В. В., Маляров М. В., Бондаренко С. М. Сучасні способи підвищення ефективності гасіння пожежі розпорошеною водою. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 40. С. 201–205.
8. Антонов А. В., Ковалишин В. В., Турчин А. І., Козяр Н. М. Водна вогнегасна речовина для гасіння тонко розпиленими струменями пожеж класів «А» та «В» за ГОСТом 27331-87 з використанням від -30°C до +50°C : пат. 52969 U Україна : МПК А62D 1/02 (2006.01) ; заявл. 06.11.2009 ; опубл. 07.09.2010, Бюл. № 18.

9. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П. [та ін.]. Вогнегасні речовини. Київ : Пожінформтехніка, 2004. 176 с.
10. Козяр Н. М. Шляхи підвищення ефективності застосування водних та водопінних вогнегасних речовин. Пожежна безпека – 2009 : зб. тез доп. ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. Львів : ЛДУ БЖД, 2009. С. 93–95.
11. Козяр Н. М. Підвищення ефективності застосування водних та водопінних вогнегасних речовин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 – пожежна безпека. Київ, 2009. 23 с.
12. Кодрик А. І., Тітенко О. М., Шахов С. М., Куртов О. В. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. Вип. 1 (7). С. 54–63.
13. Шахов С. М., Кодрик А. І., Нікулін О. Ф. [та ін.]. Визначення залежності характеристик компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 5. С. 103–106.
14. Kodrik A. I., Shakhov S. M., Vinogradov S. A. [et al.]. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54). P. 29–35.
15. Kodrik A. I., Shakhov S. M., Vinogradov S. A. [et al.]. Consideration of thermodynamic processes formation of compressed-air foam in design compressed air foam systems. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 1006. P. 11–18.
16. Кодрик А. І., Виноградов С. А., Тітенко О. М., Шахов С. М. Вплив кратності компресійної піни на дисперсність і стійкість. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 45. С. 27–43.
17. Розроблення технічного засобу пожежогасіння компресійною піною та дослідження його характеристик : звіт про ДКР (заключний) / О. Ф. Нікулін, А. І. Кодрик, О. М. Тітенко [та ін.]. Київ : УкрНДІЦЗ ДСНС України, 2020. 429 с.
18. Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання : звіт про НДР / А. В. Антонов [та ін.]. Київ : УкрНДІЦЗ ДСНС України, 2015. 147 с.

19. Isaksson S., Persson H. Fire extinguishing foam. Test method for heat exposure characterization : SP report / SP Swedish National Testing and Research Institute, 1997. 34 p.
20. Жартовський С. В. Виявлення впливу хімічного складу водних вогнегасних речовин на основі  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  та  $\text{K}_2\text{CO}_3$  на їх вогнегасну ефективність під час гасіння вогнищ класу А. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (8–11 вересня 2016 року, м. Черкаси). Черкаси, 2016. С. 46–49.
21. Сізіков О. О. Вплив цільових добавок до води на ефективність гасіння пожеж твердих речовин. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Т. 26, № 8. С. 293–303.
22. Годованець Н. М., Михалічко Б. М., Щербина О. М. Вогнегасні властивості аерозолів водних розчинів купрум (II) хлориду. *Пожежна безпека*. 2012. Т. 1, № 21. С. 91–94.
23. Water. NIST Chemistry WebBook / eds. P. J. Linstrom, W. G. Mallard; NIST Standard Reference Database Number 69. Gaithersburg MD : National Institute of Standards and Technology, 2009. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185>.
24. Carroll G. High flow rate foam generating apparatus : Patent US 8 919 745 B1, IPC A62C 5/022 ; Filed: 27.09.2011 ; Pub. Data: 26.09.2012.
25. Chou Wu-Chiao. Bubble generating device : Patent US 20120306108 A1, IPC B01F 3/04 : Filed: 06.12.2012 ; Pub. Data: 06.12.2012.
26. Кустов М. В. Розробка вогнегасного складу підвищеної ефективності на основі водних стабілізованих емульсій для гасіння пожеж класу А : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 – пожежна безпека. Харків, 2009. 24 с.
27. Билкун Д. Г., Дубков П. Ф., Моисеенко В. М., Пешков В. В. Огнетушащие свойства воды с добавками высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений. *Пожаротушение* : сб. науч. тр. Москва : ВНИИПО МВД СССР, 1983. С. 89–92.
28. Абрамов Ю. А., Киреев А. А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А. Харьков : НУГЗУ, 2015. 254 с.

29. Бабенко О. В. Використання явища гелеутворення для підвищення ефективності рідинних засобів пожежогасіння : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 – пожежна безпека / АЦЗ України. Харків, 2004. С. 134–148.

30. Ivanov A. V. [et al.]. Research of the extinguishing properties of water and hydrogel with carbon nanoparticles for liquidation burning of the petroleum products. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety*. 2017. Vol. 26, No. 8. P. 31–44.

31. Jia Yuwei, Jiang Ning, Lu Yi [et al.]. Device for creating fluid hardening foam for preventing and extinguishing fire in coal mine : Patent CN 103 835 698 A, IPC A62C 5/02 ; Publ. 04.06.2014.

32. Brooks N. Compressed Air Foam Systems. URL: <http://compressedairfoamsystem.com>.

33. Colletti D. J. Compressed-air foam mechanics. *Fire Engineering*. 1994. URL: <https://www.fireengineering.com/leadership/compressed-air-foam-mechanics/#gref>.

34. CAFS – Straight answers for the beginner or the experienced user. 2008. URL: <http://www.cafsinfo.com/index.html>.

35. Michael A. Laskaris, Michael Sulmone. Compressed air foam systems : Patent US 6 357 532 B1 ; Date of Patent: 19.03.2002.

36. Справочник химика : в 6 т. Т. 1. Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника / под. ред. Б. П. Никольского [и др.]. Москва ; Ленинград : Химия, 1966. 1107 с.

37. Химическая энциклопедия : в 5 т. Т. 3. Меди – Полимерные / гл. ред. И. Л. Кнунянц. Москва : Большая Российская энциклопедия, 1992. 639 с.

38. Лотов В. А., Смирнов А. П., Лотова Л. Г. Водный раствор для тушения пожаров : пат. RU 2275951, МПК А62D 1/00 (2006.01) ; заявл. 09.11.2004 ; опубл. 10.05.2006, Бюл. № 13.

39. Андрюшкин А. Ю., Афанасьев Е. О., Кадочникова Е. Н. Эффективность применения вязких гидрогелей при тушении горящих твердых веществ. *Пожаровзрывобезопасность*. 2020. Т. 29, № 2. С. 53–62.

40. Гидрогель «Гидропласт» для пожаротушения. URL: <https://www.bio.tampomechanika.ru/catalog-bio/tech/hydrogel-for-fire-fighting/>.

41. Лобанов Ф. И. Использование полимерных материалов в пожаротушении. *Пожаровзрывобезопасность*. 2004. № 1. С. 64–68.

42. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О. [та ін.]. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1 (13). С. 24–34.

43. Mader Heinz, Meichssner Claus. Fire extinction and protection agent contains water glass forming more than specified minimum percentage by weight : Patent DE 10054686 C2, IPC A62D 1/00 ; Filed: 03.11.2000 ; Pub.: 06.06.2002.

44. Кейбал Н. А., Каблов В. Ф., Мещеряков Л. В. Водный раствор для тушения пожаров : пат. 2 730 074 С1 RU, МПК А62D 1/100 (2006.01) ; заявл. 25.12.2019 ; опубл. 17.08.2020, Бюл. № 23.

45. Системи пожежогасіння Firexpress. URL: <https://www.firexpress.com>.

46. Sut A., Greiser S., Jager C., Schartel B. Aluminium diethylphosphinate versus ammonium polyphosphate: A comprehensive comparison of the chemical interactions during pyrolysis in flame-retarded polyolefine/poly(phenylene oxide). *Thermochimica Acta*. 2016. Vol. 640. P. 74–84.

47. Ивченко О. А., Панкин К. Е. Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия. *Лесотехнический журнал*. 2019. Т. 33, № 1. С. 76–84.

48. Ивченко О. А., Панкин К. Е. Испытания огнетушащей способности гидрогеля алюминия при тушении модельных природных низовых пожаров. *Лесотехнический журнал*. 2020. Т. 35, № 1. С. 38–50.

49. Панкин К. Е., Ивченко О. А., Савченко Т. А. Способ тушения пожаров : пат. RU 2614963: МПК А62D 1/00 ; № 2015152537 ; заявл. 16.12.2015 ; опубл. 31.03.2017, Бюл. № 10.

50. Ivchenko O. A., Pankin K. E. Fire extinguishing of forest flammable materials by hydrogels based on aluminum hydroxide. *Forestry Engineering Journal*. 2019. Vol. 9, No. 1 (33). P. 76–84.

51. Kotelnikova N., Mikhailidi A. Hydrate cellulose films and preparation of film composites with nickel nano- and microparticles. I. The properties of hydrate cellulose films. *Cellulose Chemistry and Technology*. 2011. Vol. 45, № 9–10. P. 585–592.

52. Bakirtzis D., Tsapara V., Liidakis S., Delichatsios M. A. ATR investigation of the mass residue from the pyrolysis of fire retarded lignocellulosic materials. *Thermochimica Acta*. 2013. Vol. 550. P. 48–52.

53. Провести дослідження та розробити спосіб використання заливальних карбамідних поропластів для гасіння пожеж твердих речовин методом ізоляції : звіт про НДР (заключний) / О. Ф. Нікулін, А. І. Кодрик, О. М. Тітенко, О. І. Мороз. Київ : УкрНДІЦЗ ДСНС України, 2017. 171 с.

54. Kodryk A., Titenko O., Borysov A. [et al.]. Methods of creating gel fire extinguishing substances based on aluminum hydroxide. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 185–194.

55. Demidov V. G., Baev S. N., Chashchina E. P., Kolchin V. V. Composition for obtaining fire-extinguishing fire-retardant gel : Patent RU 2784106 C1 ; Publ. 23.11.2022.

56. Schaefer Ted H. Aqueous foamable composition : Patent US 7569155 B2, IPC A62D 1/00 ; Filed: 06.12.2002 ; Publ.: 19.06.2003.

57. Ebert H.-P., Neusser T., Reichenauer G., Weigang L. Porous SiO<sub>2</sub> xerogels with characteristic pore size : Patent EP 2 523 922 A1 (also WO 2011/085918 A1), IPC C01B 33/158 ; Publ. 21.11.2012.

58. James Alroy E. Hagquist, Robert M. Hume, Terrance L. Lund, Roderick I. Lund. Composition inhibiting the expansion of fire, suppressing existing fire, and methods of manufacture and use thereof : Patent US 7 476 346 (US 2007/0034823 A1), IPC A62D 1/00; Filed: 23.10.2006 ; Publ.: 15.02.2007.

59. Schaar John L., Ellard James A., Butler John Mann. Intumescent compositions and substrates coated therewith : Patent US 3 955 987, IPC C09D 5/18 ; Filed: 19.04.1974; Publ.: 11.05.1976.

60. Von Blücher H., Von Blücher H., de Ruiter E. Use of an aqueous swollen macromolecule-containing system for extinguishing fires : Patent US 5 190 110 A ; Filed: 19.09.1990 ; Publ.: 02.03.1993.

61. Yu A. C., Lopez Hernandez H., Kim A. H. [et al.]. Wildfire prevention through prophylactic treatment of high-risk landscapes using viscoelastic retardant fluids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, № 42. P. 20820–20827.
62. Blumenthal R. [et al.]. Additives for water for use in fire-fighting compositions containing strongly swelling water-insoluble high molecular weight polymers : Patent US 4 978 460 ; Date of patent: 18.12.1990.
63. Zweigle W. Adhesion of polymer gels to cellulose : Patent US 3 758 641 ; Date of patent: 11.09.1973.
64. Pennartz E. R. J. Fire mitigation and moderating agent : Patent US 8 080 186 B1; Date of patent: 20.12.2011.
65. Langselius B. A.-C., Klaffmo F. K. Fire prevention and fire extinguishing agent for fires in solid materials : Patent US 9 586 070 B2, IPC A62D 1/00 ; Filed: 22.06.2015 ; Publ.: 07.03.2017.
66. Klaffmo F. K. [et al.]. Fire prevention and fire extinguishing agent for fires in solid materials : Patent WO 2014115038 A2, IPC C09D 5/18 ; Filed: 22.01.2013 ; Publ.: 30.10.2014.
67. Sortwell Edwin T. Methods for preventing and/or extinguishing fires : Patent US 7 189 337 B2 ; Publ.: 13.03.2007.
68. Thach S., Miller K. K., Schultz K. S. High stability foams for long-term suppression of hydrocarbon vapors : Patent US 5 296 164, IPC A62D 1/02 ; Filed: 02.07.1992 ; Publ.: 22.03.1994.
69. Ohba Y., Iwamoto S., Mitsumune S. [et al.]. Fire extinguishing agent composition containing surfactant : Patent WO 2006/028233 A1, IPC A62D 1/02 ; Publ.: 16.03.2006.
70. Староверов Н. Е. Состав для тушения пожара : пат. RU 2449825, МПК А62D 1/00 ; заявл. 14.12.2010 ; опубл. 10.05.2012.
71. Ivakhnyuk G. K. [et al.]. Method of fire extinguishing : Patent WO 2011078727 A1, IPC A62D 1/005 ; Filed: 25.12.2009 ; Publ.: 30.06.2011.
72. Куприн Г. Н., Куприн С. Г. Способ формирования струи пены средней кратности повышенной дальнобойности и устройство для его осуществления

(варианты) : пат. RU 2180607 C1, МПК А62С 5/02 ; заявл. 21.09.2000 ; опубл. 20.03.2002.

73. Zhang G., Jiao J., Wu J. [et al.]. Environmentally friendly fluorine-free fire-extinguishing foam based on the synergistic effect of silicone and hydrocarbon surfactants and foam stabilizers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 691. Art. 134216. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134216>.

74. Zhao J., Yang J., Hu Z. [et al.]. Development of an environmentally friendly gel foam and assessment of its thermal stability and fire suppression properties in liquid pool fires. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 693. Art. 133990. URL: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133990>.

75. Mariampillai B., Yang Y. Water-enhancing, fire-suppressing hydrogels : Patent WO 2016082041 A1, IPC C09K 8/60 ; Publ.: 02.06.2016.

76. Халяпов Р. Гидрогель для пожаротушения ГП-1 на основе сополимера акриловой кислоты и стирола. URL: [https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011\\_12\\_31\\_halyapov](https://issuu.com/antonberezovskiy/docs/2011_12_31_halyapov).

77. Любимов В. Н., Скушникова А. И. Влияние полимеров акриламида на свойства противопожарных пен. *Технологии техносферной безопасности*. 2014. № 1. С. 154–159.

78. Любимов В. Н., Скушникова А. И., Ермакова Т. Г., Волкова Л. И. Повышение устойчивости противопожарных пен при помощи полимерных добавок различной природы. *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. № 4. С. 303–307.

79. Наукове обґрунтування підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок модифікації складів водних вогнегасних речовин та способів їх подавання : звіт про НДР (заключний) / А. І. Кодрик, О. М. Тітенко, А. В. Борисов, О. І. Мороз. Київ : ІДУ НД ЦЗ ДСНС України, 2021. 239 с.

80. Кодрик А., Тітенко О., Борисов А. [та ін.]. Можливості використання полімерних гелевих розчинів при гасінні сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 122–133.

81. Стилик І., Пономаренко Р., Кодрик А. [та ін.]. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 1 (19). С. 65–78.
82. Стилик І., Кодрик А., Куценко М., Бедратюк О. Дослідження вогнегасної здатності водної вогнезахисної речовини на основі полімерів поліакрилату та поліакриламідру. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 2 (20). С. 109–115.
83. Стилик І., Кодрик А., Борисов А. [та ін.]. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламідру для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 75–81.
84. Box G.E.P., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1951. № 1. P. 1–45.
85. Stylyk I., Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2025. Vol. 438. P. 123–130.
86. Stylyk I., Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. Possibilities of using a fire extinguishing substance based on a water-soluble polymer for extinguishing flammable liquids. *Materials Science Forum*. 2025. Vol. 1165. P. 73–81.
87. Stylyk I., Kodrik A., Zhartovskyi S. [et al.]. Possibilities of using potassium carbonate and bicarbonate as inhibitors in the composition of aqueous fire-extinguishing substances. *Materials Science Forum*. 2025. Vol. 1165. P. 91–97.
88. John O. Rawlings, Sastry G. Pantula, David A. Dickey. *Applied Regression Analysis. A Research Tool* / North California State University. Department of Statistics. Raleigh, 1998. 674 p.
89. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*. Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2012. 679 p.
90. Винарский М. С., Лурье М. В. *Планирование эксперимента в технологических исследованиях*. Киев: Техника, 1975. 168 с.
91. Грищук Ю. С. *Основы научных исследований*. Харьков, 1980. 196 с.

92. Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробувань (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT) : ДСТУ EN 3-7:2014. [Чинний від 2015-01-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 34 с. (Національні стандарти України).

93. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування : ДСТУ 3789:2015. [Чинний від 2015-08-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 18 с. (Національні стандарти України).

94. Провести дослідження ефективності загороджувальних смуг для локалізації пожеж природних екосистем із застосуванням речовин з вогнезахисними властивостями («Загороджувальні смуги») : звіт про НДР (заключний) / О. Корнієнко, М. Копильний, С. Жартовський [та ін.]. Київ : УкрНДЦЗ, 2017. 211 с.

95. Скушникова А. И., Любимов В. Н. Использование водорастворимых полимеров для повышения устойчивости противопожарных пен. *Безопасность в техносфере*. 2014. № 4. С. 55–59.

## ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію  
результатів дисертації

### Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Кодрик А., Коваленко В., Тітенко О., Борисов А., **Стилик І.**, Борисова А. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1 (13). С. 24–34. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).24-34](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).24-34).

*Особистий внесок автора.* Взяв участь у формулюванні наукової проблеми, мети та завдань дослідження; виконав аналітичний огляд сучасних методів підвищення ефективності водних вогнегасних речовин; розробив програму та методичку експериментальних досліджень; провів лабораторні та натурні дослідження; здійснив аналіз та узагальнення експериментальних даних; оформив таблиці та графічні матеріали; брав участь у редагуванні та погодженні остаточного варіанту статті перед поданням до друку.

2. Кодрик А., Тітенко О., Борисов А., Мороз О., Тимошенко О., **Стилик І.** Можливості використання полімерних гелевих розчинів при гасіння сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 122–133. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2\(14\).122-133](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2(14).122-133).

*Особистий внесок автора.* Виконав детальний аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел щодо методів гасіння пожеж на сміттєзвалищах; приймав участь у розробленні програми та методички експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності полімерних гелевих розчинів; провів серію експериментів з визначення в'язкості гідрогелів та їх впливу на процес просочування в пористих середовищах; здійснив обробку та узагальнення результатів експериментальних досліджень; підготував текстові розділи статті, зокрема опис методів дослідження, експериментальної частини та висновків; брав участь у редагуванні остаточного варіанту рукопису.

3. **Стилик І.**, Кодрик А., Борисов А., Тітенко О., Куценко М. Щодо можливості використання розчинів на основі сополімерів акриламідю для створення загороджувальних смуг під час пожеж в екосистемах. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2024. № 2 (18). С. 75–81. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2\(18\).75-81](https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2(18).75-81).

*Особистий внесок автора.* Провів аналітичний огляд наукових публікацій і технічних рішень, що стосуються створення загороджувальних смуг з використанням полімерних гелеутворювачів. Провів заплановані експериментальні дослідження, зокрема дослідження адгезійних властивостей полімерних гелів. Приймав участь в аналізі, узагальненні та інтерпретації отриманих даних. Підготував окремі розділи рукопису, у тому числі опис методології та результатів досліджень.

4. **Стилик І.,** Пономаренко Р., Кодрик А., Тітенко О., Борисов А., Добростан О. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2025. № 1 (19). С. 65–78. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1\(19\).65-78](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1(19).65-78).

*Особистий внесок автора.* Здійснив постановку наукової проблеми, визначив мету, завдання та методологію дослідження, організував та виконав експериментальні дослідження з визначення впливу концентрації полімерів на фізико-хімічні властивості розчинів (в'язкість, адгезію, стабільність). Прийняв участь у математичному моделюванні процесів і узагальненні отриманих результатів, сформулював висновки та наукові рекомендації щодо створення нових складів водних вогнегасних речовин на основі поліакрилатів.

5. **Стилик І.,** Кодрик А., Куценко М., Бедратюк О. Дослідження вогнегасної здатності водної вогнезахисної речовини на основі полімерів поліакрилату та поліакриламиду. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2025. № 2 (20). С. 109–115. DOI: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2\(20\).109-115](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2(20).109-115).

*Особистий внесок автора.* Визначив цілі та задачі досліджень та провів аналіз публікацій за напрямом досліджень. Підготував та якісно провів експериментальні дослідження з встановлення можливості застосування полімермодифікованих вогнезахисних речовин для гасіння вогнищ класу В (трансформаторна олива). Проаналізував отримані дані та зробив відповідні висновки.

**Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази  
«Scopus» та «Web of Science»**

6. Kodryk A., Titenko O., Borysov A., Moroz O., Stylyk I. Methods of creating gel

fire extinguishing substances based on aluminum hydroxide. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-2gfl22>.

*Особистий внесок автора.* Розробив новий метод одержання гелевої вогнегасної речовини на основі гідроксиду алюмінію з використанням карбонату калію. Шляхом порівняльного аналізу довів суттєві технічні переваги запропонованого методу порівняно з відомим способом створення гелевої речовини на основі карбонату натрію.

7. **Stylyk I.**, Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*. 2025. Vol. 438. P. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-5lnF3T>.

*Особистий внесок автора.* Обґрунтував теоретично та експериментально можливість використання вогнегасної речовини на основі водорозчинного полімеру «ЕСОFЛОС А-07» для ліквідації пожеж на сміттєзвалищах твердих побутових відходів. Встановив закономірності впливу концентрації гелеутворювальних добавок на в'язкість речовини, що безпосередньо регулює швидкість її випаровування та глибину проникнення в осередок горіння.

### Публікації, які засвідчують апробацію дисертації

1. Кодрик А., **Стилик І.**, Борисов А., Тітенко О., Мороз О. Вогнегасні речовини на основі гідроксиду алюмінію. Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (19 травня 2023 року, м. Харків). Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 240–243.

2. **Стилик І.** Жартовський С., Кодрик А. Обґрунтування можливості застосування вогнегасних речовин на основі полімерів поліакрилату для гасіння пожеж у екосистемах. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері цивільного захисту та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: колективна монографія за результатами міжнар. наук.-практ. конф. (27 травня 2025 року, м. Київ). Київ: ГО «Асоціація фахівців цивільного захисту. 2026. С. 125-130.

## ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник начальника з наукової роботи Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України



Сергій ОГУРЦОВ

2026 року

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи  
Ігоря СТИЛИКА за темою:

«Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук»

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Ігоря СТИЛИКА за темою: «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук» впроваджено шляхом використання у науково-дослідному центрі досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України Методики експериментальних досліджень з визначення динамічної в'язкості колоїдних розчинів в діапазоні від 0,05 сП до 20000 сП.

Методика передбачає застосування:

- методу вимірювання динамічної в'язкості на основі закону Пуазейля у піддіапазоні від 0,05 сП до 1,5 сП;
- методу визначення уявної динамічної в'язкості за Стоксом у піддіапазоні від 1,5 сП до 40 сП;
- методу визначення уявної динамічної в'язкості за Стоксом з урахуванням поправки Ладенбурга у піддіапазоні від 40 сП до 20000 сП.

Використання зазначеної методики забезпечує підвищення точності оцінювання реологічних характеристик гелевих водних вогнегасних речовин, що, у свою чергу, дозволяє обґрунтовано визначати їх раціональні параметри та підвищувати ефективність застосування в умовах пожежогасіння.

Начальник науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Олександр ДОБРОСТАН

« 05 » 01 \_\_\_\_\_ 2026 року

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник Мобільного центру  
швидкого реагування безпілотних  
систем Державної служби України  
у надзвичайних ситуацій  
підполковник служби цивільного  
захисту

Олександр ТИКВА  
2026 року

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи

Ігоря СТИЛИКА за темою:

«Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі  
гелеутворюючих полімерних сполук»

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Ігоря СТИЛИКА за темою: «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук» впроваджено шляхом апробації технології застосування водної вогнегасної композиції, модифікованої гелеутворюючими полімерними сполуками, із використанням безпілотних літальних апаратів (дронів) на висоті до 70 метрів.

Під час впровадження проведено серію експериментальних досліджень, які підтвердили:

- можливість стабільного розпилення та подавання вогнегасної речовини з бортових систем дронів;
- ефективне формування охолоджувально-ізолювального покриття на поверхні імітованих осередків горіння;
- підвищення оперативності локалізації умовних осередків пожежі у порівнянні з традиційними засобами наземного застосування.

Впровадження забезпечило підтвердження працездатності технологічних рішень, запропонованих у дисертаційній роботі, а також створило науково-практичне підґрунтя для можливості їх подальшого застосування із використанням безпілотних літальних апаратів.

Заступник начальника центру  
з оперативного реагування

« 02 » 04 2026 року



Сергій ЧОРНОБРИВЕЦЬ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Директор «ТОВ НАУКОВО-  
 ВИРОБНИЧА ФІРМА «ФАКТОР»



Олександр ЖИЛІН

«10» грудня 2025 року


**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Ігоря СТИЛИКА за темою:  
 «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі  
 гелеутворюючих полімерних сполук»

Комісія у складі: голови комісії Олександра ПЛАКСОВА та членів комісії к.т.н., ст.н.с Володимира ДУНЮШКІНА і Петра ПИВОВАРА склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ігоря СТИЛИКА за темою: «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук» впроваджено у діяльність компанії ТОВ НВФ «ФАКТОР», зокрема у процес розроблення та удосконалення технологій виготовлення і застосування сучасних водних та водопінних вогнегасних речовин.

Комісія підтверджує, що застосування отриманих Ігорем СТИЛИКОМ наукових результатів дало змогу підвищити ефективність створюваних складів, покращити їх реологічні та вогнегасні характеристики, а також розширити номенклатуру продукції підприємства шляхом інтеграції гелеутворюючих компонентів у склади вогнегасних речовин, що має практичну цінність для подальшого розвитку технологій виготовлення та застосування водних вогнегасних речовин.

Голова комісії:


  
 (підпис)

Олександр ПЛАКСОВ

Члени комісії:

  
 (підпис)

Володимир ДУНЮШКІН

  
 (підпис)

Петро ПИВОВАР

## ДОДАТОК В

Результати експериментальних досліджень, проведених з рецептурами концентратів та робочих розчинів на основі поліакрилату натрію

Таблиця В.1 – Результати дослідів залежності кратності та стійкості в залежності від складу гелеутворювача на основі поліакрилату натрію

Склад	Процентний вміст компонентів відповідно до експериментального робочого розчину на базі поліакрилату											Кратність	Стійкість
	Поліакрилат натрію	Олія	ПУ у концентраті	Вода у концентраті	КМЦ	ПУ у робочому розчині		Fumed Silica, Аэросил, SiO <sub>2</sub>	Сорбітан моноолеат Span 80	Концентрат	Динамічна в'язкість		
Одиниця виміру	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	сП		хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2024.09.04 № 1	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	3,50	27	5	14
2024.09.04 № 2	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	6,50	11	6,1	6
2024.09.04 № 2 а	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	6,50	15	5	14
2024.09.04 № 3	0,14	0,115	0,03	0,215	0,05	6,00	0,00	0,00	0,00	6,55	57	7,4	7
2024.09.04 № 4	0,4	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	6,00	0,00	0,0	12,50	93	1,6	1
2024.09.04 № 5	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	12,00	0,00	0,00	18,50	83	1,3	1
2024.09.04 № 6	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	0,00	0,00	0,02	6,52	107	5	5

## Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2024.09.04 № 7	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	0,00	0,02	0,00	6,52	62	4	5
2024.09.04 № 8	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	40	1	
2024.09.04 № 9	0,28	0,230	0,06	0,430	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	7,05	22	4,4	8
2024.09.04 № 10	0,42	0,345	0,09	0,645	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	7,58	61	3,4	12
2024.09.04 № 12	0,28	0,230	0,06	0,430	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	4,05	50	3,6	24
2024.09.04 № 13	0,42	0,345	0,09	0,645	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	4,58	134	2,8	27
2024.09.04 № 15	0,56	0,460	0,12	0,860	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,08		1	
2024.09.04 № 16	0,53	0,432	0,11	0,808	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	7,99		2	150
2024.09.04 № 17	0,53	0,432	0,11	0,808	0,05	6,00	0,00	0,00	0,00	8,04		1,8	129
2024.09.04 № 21	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	3,00	0,00	0,00	0,00	3,93		6,4	7
2024.09.04 № 22	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	0,00	0,00	0,00	6,93		7,4	9

## Продовження таблиці В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2024.09.04 № 24	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	6,00	0,00	0,00	12,93		1,9	3
2024.09.04 № 25	0,14	0,115	0,03	0,215	0,00	6,00	12,00	0,00	0,00	18,93		1,4	0,7
2024.09.04 № 26	0,14	0,115	0,03	0,215	0,10	6,00	0,00	0,00	0,00	7,03		5	17
2024.09.04 № 27	0,14	0,115	0,03	0,215	0,25	6,00	0,00	0,00	0,00	7,18		2,8	53
2024.09.04 № 28	0,14	0,115	0,03	0,215	0,50	6,00	0,00	0,00	0,00	7,43		2,4	69
2024.09.04 № 29	0,14	0,115	0,03	0,215	1,00	6,00	0,00	0,00	0,00	7,93		1,7	159

ДОДАТОК Г Протоколи вогневих досліджень



**ІНСТИТУТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
(ІНДЦЗ НУЦЗ України)**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник науково-дослідного  
центру досліджень та випробувань



**Олександр ДОБРОСТАН**

14 червня 2025 р.

**ПРОТОКОЛ КЛАС А**

вогневих досліджень модифікованих водних вогнегасних речовин для гасіння  
пожеж класу А у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення  
ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих  
полімерних сполук»

**Дмитрівка-2025**

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІНДЦЗ НУЦЗ України (вул. Центральна, комплекс 60, с. Дмитрівка Бучанського району Київської області).

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Зразки модифікованих водних вогнегасних речовин, а саме:

- зразок 1 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 14,00%, рапсової олії – 16,00%, ПУ – 2,50% та води – 67,5%);
- зразок 2 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 38,00%, рапсової олії – 16,00%, ПУ – 2,50% та води – 43,5%);
- зразок 3 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 14,00%, рапсової олії – 36,00%, ПУ – 2,50% та води – 47,5%);
- зразок 4 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 38,00%, рапсової олії – 36,00%, ПУ – 2,50% та води – 23,5%);
- зразок 5 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 14,00%, рапсової олії – 16,00%, ПУ – 5,50% та води – 64,5%);
- зразок 6 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 38,00%, рапсової олії – 16,00%, ПУ – 5,50% та води – 40,5%);
- зразок 7 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 14,00%, рапсової олії – 36,00%, ПУ – 5,50% та води – 44,5%);
- зразок 8 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 38,00%, рапсової олії – 36,00%, ПУ – 5,50% та води – 20,5%);
- зразок 9 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 11,42%, рапсової олії – 26,00%, ПУ – 4,00% та води – 58,58%);
- зразок 10 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 40,58%, рапсової олії – 26,00%, ПУ – 4,00% та води – 29,42%);
- зразок 11 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної

речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 26,00%, рапсової олії – 13,85%, ПУ – 4,00% та води – 56,15%);

- зразок 12 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 26,00%, рапсової олії – 38,15%, ПУ – 4,00% та води – 31,85%);
- зразок 13 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 26,00%, рапсової олії – 26,00%, ПУ – 2,18% та води – 45,82%);
- зразок 14 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 26,00%, рапсової олії – 26,00%, ПУ – 5,8% та води – 42,20%);
- зразок 15 – дослідний зразок 1,5% розчину модифікованої водної вогнегасної речовини, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи із вмістом у концентраті поліакрилату натрію – 26,00%, рапсової олії – 26,00%, ПУ – 4,00% та води – 44,00%).

**МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ:** Визначення та порівняння значень показників якості зразків піноутворювачів та модифікованих водних вогнегасних речовин згідно з ДСТУ EN 3-7:2014, ДСТУ EN 1568-3:2018 та ДСТУ 3789:2015, а саме:

- кратність піни середньої кратності;
- стійкість піни середньої кратності;
- тривалість гасіння піною низької кратності

**ВИМОГИ:** згідно ДСТУ EN 3-7:2014 полум'я повинно бути погашено протягом 300 с, а протягом 180 с не повинно бути повторного займання.

**УМОВИ ЗБЕРІГАННЯ ПРОБИ:** до початку досліджень зразки робочих розчинів піноутворювача та модифікованих водних вогнегасних речовин зберігались у лабораторному приміщенні за температури  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Умови проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови проведення досліджень

Дата проведення досліджень	Умови проведення досліджень		
	температура повітря, $^\circ\text{C}$	відносна вологість повітря, %	атмосферний тиск, мм рт. ст.
1	2	3	4
09.06.2025	24,2	50,1	747
10.06.2025	23,9	49,8	748

1	2	3	4
11.06.2025	23,7	52,6	747
12.06.2025	24,3	51,0	746
13.06.2025	24,5	49,9	747
16.06.2025	23,6	50,6	749

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Для досліджень використовували установку для визначення кратності та стійкості піни низької кратності (свідоцтво про верифікацію № 173, дійсне до 10.2025), а також засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), перелік яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування	Заводський номер	Діапазон вимірювань	Клас точності, невизначеність, похибка ЗВТ	Дата наступного калібрування
1	Термогігрометр "Testo" 608-N1	45038120	від 0 до 50 °C від 2 % до 98 %	$U = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $\Delta = \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $U = 1,2 \%$ , $\Delta = \pm 3 \%$	08.2025
2	Барометр-анероїд М67	716	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 0,6 \text{ мм рт. ст.}$ , $\Delta = \pm 1 \text{ мм рт. ст.}$	05.2026
3	Ваги ВН-30-1-А	1615813	від 0,2 кг до 30 кг	$U = 0,008 \text{ кг}$ , $\Delta = \pm 0,01 \text{ кг}$	05.2026
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	4693	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності, $U = 0,24 \text{ с}$ , $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с}$ , $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$	08.2025
5	Циліндр мірний 1-2000	б/н	від 160 см <sup>3</sup> до 2000 см <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 20 \text{ см}^3$	Не калібрується

## 1. Методи досліджень:

**1.1** Визначення кратності і стійкості піни, що утворюється із робочих розчинів зразків піноутворювачів, проводили згідно з п. 10.1 та додатком G ДСТУ EN 1568-3.

Для визначення кратності піни низької кратності робочий розчин піноутворювача подають під тиском на генератор піни низької кратності, а піну, що утворюється на стволі, спрямовують у піно збирач місткістю 1,6 дм<sup>3</sup>. Пінозбирач разом з підставкою для його установки, мірним циліндром і лійкою зважують

спочатку у порожньому стані, а потім після заповнення піною. За різницею мас визначають масу розчину, який витрачено на утворення піни і, знаючи місткість пінозбирача та густину робочих розчинів, яку приймають 1 кг/дм<sup>3</sup>, розраховують кратність піни за формулою (1):

$$K = \frac{V_n \times \rho_p}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

де  $K$  – кратність піни;

$V$  – об'єм піни, що дорівнює об'єму пінозбирача, дм<sup>3</sup>, (1,6 дм<sup>3</sup>);

$M_1$  – маса порожнього пінозбирача, кг;

$M_2$  – маса пінозбирача заповненого піною, кг.

Показник стійкості піни визначається проміжком часу, за який з неї витікає 50 % від об'єму витраченого розчину на її утворення. З метою визначення цього показника в момент заповнення пінозбирача піною вмикають секундомір і фіксують проміжок часу, за який з неї витікає відповідний об'єм розчину, який вимірюють за допомогою мірного циліндра. За результат випробування приймають середнє арифметичне результатів двох паралельних визначень, розбіжність між якими не повинна перевищувати 10% від середнього арифметичного одержаних результатів.

Проводяться порівняння отриманих результатів відповідно до вимог ДСТУ 3789:2015 за показником кратності та стійкості піни середньої кратності з урахуванням похибки вимірювань.

## 1.2 Гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А

Гасіння модельного вогнища проводиться згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 3-7:2014 за допомогою пересувного вогнегасника. Вогнегасник споряджують 10 л вогнегасної речовини. Під час проведення дослідів вогнегасник зважують до та після гасіння. Для підпалювання модельного вогнища використовують металеве деко розмірами (600×600×100) мм. Деко встановлюється симетрично під модульним вогнищем пожежі. Деко заповнюється водою висотою не менше чим 30 мм та бензином А-95 об'ємом 2 л. Така кількість бензину повинна забезпечувати час його горіння не менше 150 с. Модельне вогнище підпалюють та фіксують час вільного горіння 360 с та гасіння за допомогою секундоміру. Після закінчення гасіння спостерігають 180 с на предмет можливості повторного займання.

Отримані показники використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів за формулою (2):

$$Q_A = \frac{q \times \tau_{\text{гас}}}{S}, \quad (2)$$

де  $Q_A$  – показник вогнегасної здатності, кг/м<sup>2</sup>;

$q$  – витрата, кг/с;

$\tau_{\text{гас}}$  – тривалість гасіння, с;

$S$  – площа вогнища, м<sup>2</sup>.

## 2. Хід та результати досліджень:

### 2.1 Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни

Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни низької кратності наведено у таблиці 3. Склад водного розчину модифікованої водної вогнегасної речовини:

- концентрат - 1,5%;
- ПУ ЗП (Україна) - 6% .

**Таблиця 3 – Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни низької кратності**

№ зразка	Склад водного концентрату			Загальна маса пінозбирача, підставки та циліндра, кг		Кратність піни		Стійкість піни, с	
	Поліакрилат натрію, %	Олія рапсова, %	ПУ, %	без піни	з піною	Фактичне значення	Середнє значення	Фактичне значення	Середнє значення
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14,00	16,00	2,50	5,80 ± 0,01	6,02 ± 0,01	7,4	7,60	540	555
				5,80 ± 0,01	6,04 ± 0,01	6,7		489	
				5,80 ± 0,01	5,99 ± 0,01	8,7		635	
2	38,00	16,00	2,50	5,80 ± 0,01	6,02 ± 0,01	7,4	8,40	562	638
				5,80 ± 0,01	6,02 ± 0,01	7,4		562	
				5,80 ± 0,01	5,96 ± 0,01	10,4		790	
3	14,00	36,00	2,50	5,80 ± 0,01	5,97 ± 0,01	9,5	9,20	753	729
				5,80 ± 0,01	5,96 ± 0,01	9,9		784	
				5,80 ± 0,01	6,00 ± 0,01	8,2		650	
4	38,00	36,00	2,50	5,80 ± 0,01	6,05 ± 0,01	6,5	7,14	457	502
				5,80 ± 0,01	6,01 ± 0,01	7,6		535	
				5,80 ± 0,01	6,02 ± 0,01	7,3		514	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	14,00	16,00	5,50	$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,7	8,90	683	699
				$5,80 \pm 0,01$	$6,00 \pm 0,01$	8,1		636	
				$5,80 \pm 0,01$	$5,96 \pm 0,01$	9,9		778	
6	38,00	16,00	5,50	$5,80 \pm 0,01$	$6,03 \pm 0,01$	7,1	7,60	512	548
				$5,80 \pm 0,01$	$6,01 \pm 0,01$	7,6		548	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,00 \pm 0,01$	8,1		584	
7	14,00	36,00	5,50	$5,80 \pm 0,01$	$5,92 \pm 0,01$	13,2	14,3 0	1189	1288
				$5,80 \pm 0,01$	$5,93 \pm 0,01$	12,8		1153	
				$5,80 \pm 0,01$	$5,90 \pm 0,01$	16,9		1522	
8	38,00	36,00	5,50	$5,80 \pm 0,01$	$5,98 \pm 0,01$	9,2	8,80	715	684
				$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,6		668	
				$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,6		668	
9	11,42	26,00	4,00	$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,7	8,40	670	647
				$5,80 \pm 0,01$	$6,02 \pm 0,01$	7,4		570	
				$5,80 \pm 0,01$	$5,98 \pm 0,01$	9,1		701	
10	40,58	26,00	4,00	$5,80 \pm 0,01$	$6,02 \pm 0,01$	7,5	6,70	512	457
				$5,80 \pm 0,01$	$6,05 \pm 0,01$	6,5		443	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,07 \pm 0,01$	6,1		416	
11	26,00	13,85	4,00	$5,80 \pm 0,01$	$6,05 \pm 0,01$	6,6	6,20	423	397
				$5,80 \pm 0,01$	$6,08 \pm 0,01$	5,7		365	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,06 \pm 0,01$	6,3		403	
12	26,00	38,15	4,00	$5,80 \pm 0,01$	$5,98 \pm 0,01$	8,9	8,20	676	623
				$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,4		638	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,02 \pm 0,01$	7,3		555	
13	26,00	26,00	2,18	$5,80 \pm 0,01$	$6,04 \pm 0,01$	6,7	6,30	438	412
				$5,80 \pm 0,01$	$6,03 \pm 0,01$	6,9		451	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,11 \pm 0,01$	5,3		347	
14	26,00	26,00	5,80	$5,80 \pm 0,01$	$6,03 \pm 0,01$	7,0	7,00	519	578
				$5,80 \pm 0,01$	$6,00 \pm 0,01$	8,0		593	
				$5,80 \pm 0,01$	$5,99 \pm 0,01$	8,4		622	
15	26,00	26,00	4,00	$5,80 \pm 0,01$	$6,19 \pm 0,01$	4,1	4,60	200	223
				$5,80 \pm 0,01$	$6,16 \pm 0,01$	4,5		220	
				$5,80 \pm 0,01$	$6,12 \pm 0,01$	5,1		249	

*Розширена невизначеність результату визначення кратності становить 4;*  
*Розширена невизначеність результату визначення стійкості становить 2 с*

## 2.2 Результати гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А

Під час проведення досліджень з гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А визначались витрати вогнегасної речовини та час гасіння

модельних вогнищ. Робочі моменти гасіння модельного вогнища 5А зображено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Робочі моменти гасіння модельного вогнища 5А

Результати досліджень з визначення часу гасіння та витрат вогнегасних речовин при гасінні модельного вогнища 5А наведено у таблиці 4.

**Таблиця 4 – Результати досліджень з визначення часу гасіння та витрат вогнегасних речовин при гасінні модельного вогнища 5А**

№ зразка	Склад водного концентрату			Витрата водного розчину зразка, г	Час гасіння, с	Показник вогнегасної здатності, кг/м <sup>2</sup>
	Поліакрилат натрію, %	Олія рапсова, %	ПУ, %			
1	2	3	4	5	6	7
1	14,00	16,00	2,50	3335	112	0,672
2	38,00	16,00	2,50	3501	123	0,660
3	14,00	36,00	2,50	3682	135	0,761
4	38,00	36,00	2,50	3229	105	0,631
5	14,00	16,00	5,50	3622	131	0,732
6	38,00	16,00	5,50	3320	111	0,518
7	14,00	36,00	5,50	4800	209	1,121
8	38,00	36,00	5,50	3591	129	0,707
9	11,42	26,00	4,00	3516	124	0,739
10	40,58	26,00	4,00	3138	99	0,457
11	26,00	13,85	4,00	3017	91	0,494
12	26,00	38,15	4,00	3471	121	0,710

1	2	3	4	5	6	7
13	26,00	26,00	2,18	3048	93	0,419
14	26,00	26,00	5,80	3425	118	0,554
15	26,00	26,00	4,00	2670	68	0,419

*Розширена невизначеність результату визначення часу гасіння становить 3 с*

**ВИСНОВОК:** В результаті проведених дослідів з варіюванням 3-х факторів на 3-х рівнів згідно попередньо сформованого ортогонального центрально-композиційного плану другого порядку з ядром, доповненим двома парами симетричних точок, розташованих на координатних осях на відносній відстані ( $\alpha = 1,2154$ ) від центру плану (зоряні точки), а також точкою у центрі плану (нульова точка). Експеримент виконаний в умовах 3-х факторів та 3-х рівнів.

Дані, отримані в результаті проведеного експерименту, провівши розрахунки визначити оптимальний склад концентрату, що забезпечують мінімальний час горіння та максимальну вогнегасну здатність.

Усі зразки, які були досліджені відповідають вимогам ДСТУ EN 3-7:2014 за показником тривалість гасіння модельного вогнища 5А.

Керівник досліджень:

Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу досліджень речовин та матеріалів науково-дослідного центру досліджень та випробувань

 Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

Дослідження провів:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ігор СТИЛИК

Керівник з якості:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ольга БЕДРАТЮК



**ІНСТИТУТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
(ІНДЦЗ НУЦЗ України)**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник науково-дослідного  
центру досліджень та випробувань



**Олександр ДОБРОСТАН**

18 лютого 2025 р.

**ПРОТОКОЛ**

вогневих досліджень модифікованих водних вогнегасних речовин для гасіння  
пожеж класу А у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення  
ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих  
полімерних сполук»

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІДУ НД ЦЗ (вул. Центральна, комплекс 60, с. Дмитрівка Бучанського району Київської області).

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Зразки піноутворювачів та модифікованих водних вогнегасних речовин, а саме:

- зразок 1 – піноутворювач AFFF (Україна);
- зразок 2 – піноутворювач AFFF (Німеччина);
- зразок 3 – дослідний зразок (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи);
- зразок 4 – дослідний зразок (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи).

**МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ:** Визначення та порівняння значень показників якості зразків піноутворювачів та модифікованих водних вогнегасних речовин згідно з ДСТУ EN 3-7:2014, ДСТУ EN 1568-3:2018 та ДСТУ 3789:2015, а саме:

- кратність піни середньої кратності;
- стійкість піни середньої кратності;
- тривалість гасіння піною низької кратності

**ВИМОГИ:** згідно ДСТУ EN 3-7:2014 полум'я повинно бути погашено протягом 300 с, а протягом 180 с не повинно бути повторного займання.

**УМОВИ ЗБЕРІГАННЯ ПРОБИ:** до початку досліджень зразки робочих розчинів піноутворювача та модифікованих водних вогнегасних речовин зберігались у лабораторному приміщенні за температури  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Умови проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови проведення досліджень

Дата проведення досліджень	Умови проведення досліджень		
	температура повітря, $^\circ\text{C}$	відносна вологість повітря, %	атмосферний тиск, мм рт. ст.
14.07.2025	24,7	50,1	747

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Для досліджень використовували установку для визначення кратності та стійкості піни низької кратності (свідоцтво про верифікацію № 173, дійсне до 10.2025), а також засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), перелік яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування	Заводський номер	Діапазон вимірювань	Клас точності, невизначеність, похибка ЗВТ	Дата наступного калібрування
1	Термогірометр “Testo” 608-N1	45038120	від 0 до 50 °С від 2 % до 98 %	U = 0,4 °С, Δ = ± 0,5 °С U = 1,2 %, Δ = ± 3 %	08.2025
2	Барометр-анероїд М67	716	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	U = 0,6 мм рт. ст., Δ = ± 1 мм рт. ст.	05.2026
3	Ваги ВН-30-1-А	1615813	від 0,2 кг до 30 кг	U = 0,008 кг, Δ = ± 0,01 кг	05.2026
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	4693	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності, U = 0,24 с, Δ = ± (0,4 · τ <sub>вим</sub> / 60) с, Δ = ± (0,4 + 1,5 · (τ <sub>вим</sub> - 60) / 3540) с	08.2025
5	Циліндр мірний 1-2000	б/н	від 160 см <sup>3</sup> до 2000 см <sup>3</sup>	Δ = ± 20 см <sup>3</sup>	Не калібрується

## 2. Методи досліджень:

**1.2 Визначення кратності і стійкості піни,** що утворюється із робочих розчинів зразків піноутворювачів, проводили згідно з п. 10.1 та додатком G ДСТУ EN 1568-3.

Для визначення кратності піни низької кратності робочий розчин піноутворювача подають під тиском на генератор піни низької кратності, а піну, що утворюється на стволі, спрямовують у піно збирач місткістю 1,6 дм<sup>3</sup>. Пінозбирач разом з підставкою для його установки, мірним циліндром і лійкою зважують спочатку у порожньому стані, а потім після заповнення піною. За різницею мас визначають масу розчину, який витрачено на утворення піни і, знаючи місткість піно збирача та густину робочих розчинів, яку приймають 1 кг/дм<sup>3</sup>, розраховують кратність піни за формулою (1):

$$K = \frac{V_n \times \rho_p}{m_1 - m_2} \quad (1)$$

де  $K$  – кратність піни;

$V$  – об’єм піни, що дорівнює об’єму піно збирача,  $\text{дм}^3$ , ( $1,6 \text{ дм}^3$ );

$M_1$  – маса порожнього пінозбирача,  $\text{кг}$ ;

$M_2$  – маса пінозбирача заповненого піною,  $\text{кг}$ .

Показник стійкості піни визначається проміжком часу, за який з неї витікає 50 % від об’єму витраченого розчину на її утворення. З метою визначення цього показника в момент заповнення піно збирача піною вмикають секундомір і фіксують проміжок часу, за який з неї витікає відповідний об’єм розчину, який вимірюють за допомогою мірного циліндра. За результат випробування приймають середнє арифметичне результатів двох паралельних визначень, розбіжність між якими не повинна перевищувати 10% від середнього арифметичного одержаних результатів.

Проводяться порівняння отриманих результатів відповідно до вимог ДСТУ 3789:2015 за показником кратності та стійкості піни середньої кратності з урахуванням похибки вимірювань.

## 1.2 Гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А

Гасіння модельного вогнища проводиться згідно з рекомендаціями ДСТУ EN 3-7:2014 за допомогою пересувного вогнегасника. Вогнегасник споряджують 10 л вогнегасної речовини. Під час проведення дослідів вогнегасник зважують до та після гасіння. Для підпалювання модельного вогнища використовують металеве деко розмірами ( $600 \times 600 \times 100$ )  $\text{мм}$ . Деко встановлюється симетрично під модульним вогнищем пожежі. Деко заповнюється водою висотою не менше чим 30  $\text{мм}$  та бензином А-95 об’ємом 2 л. Така кількість бензину повинна забезпечувати час його горіння не менше 150 с. Модельне вогнище підпалюють та фіксують час вільного горіння 360 с та гасіння за допомогою секундоміру. Після закінчення гасіння спостерігають 180 с на предмет можливості повторного займання.

Отримані показники використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів за формулою (2):

$$Q_A = \frac{q \times \tau_{\text{гас}}}{S}, \quad (2)$$

де  $Q_A$  – показник вогнегасної здатності,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$q$  – витрата,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\tau_{\text{гас}}$  – тривалість гасіння, с;

$S$  – площа вогнища,  $\text{м}^2$ .

## 2. Хід та результати досліджень:

**2.1 Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни низької кратності наведено у таблиці 3.**

Таблиця 3 – Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни низької кратності

№ зразка	Склад водного розчину зразка	Загальна маса піно збирача, підставки та циліндра, кг		Кратність піни		Стійкість піни, с	
		без піни	з піною	Фактичне значення	Середнє значення	Фактичне значення	Середнє значення
1.	Водний розчин ПУ АFFF (Україна) – 6%	5,80 ± 0,01	5,98 ± 0,01	9,0	9,6	282,0	288,0
		5,80 ± 0,01	5,96 ± 0,01	10,2		282,0	
		5,80 ± 0,01	5,97 ± 0,01	9,6		300,0	
2.	Водний розчин ПУ АFFF (ФРН) – 6%	5,80 ± 0,01	5,92 ± 0,01	14,2	14,0	1080,0	1080,0
		5,80 ± 0,01	5,91 ± 0,01	14,8		1032,0	
		5,80 ± 0,01	5,92 ± 0,01	13,8		1128,0	
3.	Водний розчин концентрату на основі ПА* – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%	5,80 ± 0,01	6,01 ± 0,01	7,8	7,5	912,0	900,0
		5,80 ± 0,01	6,03 ± 0,01	7,2		888,0	
		5,80 ± 0,01	6,02 ± 0,01	7,5		900,0	
4.	Водний розчин концентрату на основі ПА* – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%, КМЦ** – 0,02%	5,80 ± 0,01	6,13 ± 0,01	5,0	5,2	1920,0	1920,0
		5,80 ± 0,01	6,11 ± 0,01	5,3		1922,0	
		5,80 ± 0,01	6,11 ± 0,01	5,3		1918,0	

*Розширена невизначеність результату визначення кратності піни становить 2,5*

*Розширена невизначеність результату визначення стійкості піни становить 5,0 с*

Примітка: \* - Поліакрилат натрію;

\*\* - Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози.

## 2.2 Результати гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А

Під час проведення досліджень з гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А визначались витрати вогнегасної речовини та час гасіння модельних вогнищ. Робочі моменти гасіння модельного вогнища 5А зображено на рисунку 1.

Результати досліджень з визначення часу гасіння та витрат вогнегасних речовин при гасінні модельного вогнища 5А наведено у таблиці 4.



Рисунок 1 – Робочі моменти гасіння модельного вогнища 5А

Таблиця 4 – Результати досліджень з визначення часу гасіння та витрат вогнегасних речовин при гасінні модельного вогнища 5А

№ зразка	Склад водного розчину зразка	Витрата водного розчину зразка, г		Час гасіння, с		Показник вогнегасної здатності, кг/м <sup>2</sup>
		Фактичне значення	Середнє значення	Фактичне значення	Середнє значення	
1.	Водний розчин ПУ АFFF (Україна) – 6%	4805	4800	182	182	0,97
		4790		181		
		4805		183		
2.	Водний розчин ПУ АFFF (ФРН) – 6%	3055	3070	131	134	0,62
		3080		136		
		3075		135		
3.	Водний розчин концентрату на основі ПА* – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%	2910	2920	99	102	0,59
		2930		105		
		2920		102		
4.	Водний розчин концентрату на основі ПА* – 1,5 %, ПУ ЗП (Україна) – 6%, КМЦ ** – 0,02%	2665	2670	71	72	0,54
		2680		75		
		2665		70		

*Розширена невизначеність результату визначення часу гасіння становить 3 с*

Примітка: \* - Поліакрилат натрію;

\*\* - Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози.


**ВИСНОВОК:** За результатами досліджень зразки № 1-4 відповідають вимогам ДСТУ 3789:2015 та ДСТУ EN 1568-3:2018 за показником кратності піни низької

кратності. Зразок № 2 має найвищий показник кратності піни низької кратності, який у 2-3 рази більший ніж у інших зразках. За результатами досліджень зразки № 1-4 відповідають вимогам ДСТУ 3789:2015 та ДСТУ EN 1568-3:2018 за показником стійкості піни низької кратності. Зразок № 4 має найвищий показник стійкості піни низької кратності, який у 2-3 рази більший ніж у інших зразках.

За результатами досліджень з визначення тривалості гасіння піною низької кратності модельного вогнища пожежі 5А встановлено, що зразок № 4, за рахунок збалансованих значень кратності та стійкості, має менший час гасіння модельного вогнища (середнє значення 72 с, що на 108 с, 58 с, та 30 с менше ніж у зразків № 1-3 відповідно), а показник його вогнегасної здатності становить 0,54 кг/м<sup>2</sup>. Усі зразки, які були досліджено відповідають вимогам ДСТУ EN 3-7:2014 за показником тривалість гасіння модельного вогнища 5А.

Керівник досліджень:

Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу досліджень речовин та матеріалів науково-дослідного центру досліджень та випробувань

 Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

Дослідження провів:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ігор СТИЛИК

Керівник з якості:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ольга БЕДРАТЮК



**ІНСТИТУТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
(ІНДЦЗ НУЦЗ України)**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник науково-дослідного  
центру досліджень та випробувань



**Олександр ДОБРОСТАН**

« 28 » липня 2025 р.

**ПРОТОКОЛ**

вогневих досліджень модифікованих водних вогнегасних речовин для гасіння  
пожеж класу В у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення  
ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих  
полімерних сполук»

**Дмитрівка-2025**

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІНДЦЗ НУЦЗ України (вул. Центральна, 60, с. Дмитрівка Бучанського району Київської області).

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Зразки піноутворювачів та модифікованих водних вогнегасних речовин, а саме:

- зразок 1 – піноутворювач АFFF (Україна);
- зразок 2 – піноутворювач АFFF (Німеччина);
- зразок 3 – дослідний зразок 1 (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи);
- зразок 4 – дослідний зразок 2 (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи).

**МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ:** Визначення та порівняння значень показника якості зразків піноутворювачів та модифікованих водних вогнегасних речовин згідно з ДСТУ 3789:2015 *Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань*, а саме:

- кратність піни середньої кратності (п. 10.5 ДСТУ 3789:2015);
- стійкість піни середньої кратності (п. 10.5 ДСТУ 3789:2015);
- тривалість гасіння піною середньої кратності (п. 17 табл. 1 ДСТУ 3789:2015).

**ВИМОГИ ЗА ДСТУ 3789:2015:**

- кратність піни середньої кратності – не менше 60 (табл. 1, п. 13 ДСТУ 3789:2015);
- стійкість піни середньої кратності – встановлюється НД на конкретний піноутворювач (табл. 1, п. 14 ДСТУ 3789:2015);
- тривалість гасіння піною середньої кратності – не більш ніж 120 с (п.17 табл. 1 ДСТУ 3789:2015).

**УМОВИ ЗБЕРІГАННЯ ЗРАЗКІВ:** До початку досліджень зразки зберігались в лабораторному приміщенні за температури  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Умови проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови проведення досліджень

Дата проведення досліджень	Умови проведення досліджень		
	температура повітря, $^\circ\text{C}$	відносна вологість повітря, %	атмосферний тиск, мм рт. ст.
23.07.2025	24,2	46,4	747

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Для досліджень використовували пересувний вогнегасник, а також засоби виміральної техніки (ЗВТ), перелік яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Засоби виміральної техніки

№ з/п	Найменування	Заводський номер	Діапазон вимірювань	Клас точності, невизначеність, похибка ЗВТ	Дата наступного калібрування
1	Термогірометр “Testo” 608-N1	45038120	від 0 до 50 °C від 2 % до 98 %	$U = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ , $\Delta = \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $U = 1,2 \%$ , $\Delta = \pm 3 \%$	08.2025
2	Барометр-анероїд М67	716	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 0,6 \text{ мм рт. ст.}$ , $\Delta = \pm 1 \text{ мм рт. ст.}$	08.2025
3	Ваги ВН-30-1-А	1615813	від 0,2 кг до 30 кг	$U = 0,008 \text{ кг}$ , $\Delta = \pm 0,01 \text{ кг}$	05.2026
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	4693	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності, $U = 0,24 \text{ с}$ , $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с}$ , $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$	05.2026
5	Циліндр мірний 1-2000	б/н	від 160 см <sup>3</sup> до 2000 см <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 20 \text{ см}^3$	Не калібрується

## 1. Методи досліджень:

**1.1 Визначення кратності і стійкості піни середньої кратності,** проводили згідно з п. 10.5 ДСТУ 3789:2015.

Для визначення кратності піни середньої кратності робочий розчин піноутворювача подають під тиском на генератор піни середньої кратності, а піну, що утворюється на стволі, спрямовують у піно збирач місткістю 200 дм<sup>3</sup>. Пінозбирач разом з підставкою для його установки, мірним циліндром і лійкою зважують спочатку у порожньому стані, а потім після заповнення піною. За різницею мас визначають масу розчину, який витрачено на утворення піни і, знаючи місткість піно збирача та густину робочих розчинів, яку приймають 1 кг/дм<sup>3</sup>, розраховують кратність піни за формулою (1):

$$K = \frac{V_n \times \rho_p}{m_1 - m_2}, \quad (1)$$

де  $K$  – кратність піни;  
 $V_n$  – об'єм піни, що дорівнює об'єму пінозбирача,  $\text{дм}^3$ ;  
 $\rho_p$  – густина робочого розчину піноутворювача,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  
 $m_1$  – сумарна маса рами, циліндра і піно збирача з піною,  $\text{кг}$ ;  
 $m_2$  – сумарна маса рами, циліндра і піно збирача без піни,  $\text{кг}$ .

Показник стійкості піни визначається проміжком часу, за який з неї витікає 50 % від об'єму витраченого розчину на її утворення. З метою визначення цього показника в момент заповнення піно збирача піною вмикають секундомір і фіксують проміжок часу, за який з неї витікає відповідний об'єм розчину, який вимірюють за допомогою мірного циліндра. За результат випробування приймають середнє арифметичне результатів двох паралельних визначень, розбіжність між якими не повинна перевищувати 10% від середнього арифметичного одержаних результатів.

Проводяться порівняння отриманих результатів відповідно до вимог ДСТУ 3789:2015 за показником кратності та стійкості піни середньої кратності з урахуванням похибки вимірювань.

**1.2 Гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1** проводили згідно з п. 10.6. ДСТУ 3789.

Перед початком досліджень фіксують масу вогнегасника із вогнегасною речовиною. Пальне в декі підпалюють. Під час вільного горіння ствол-генератор піни виносять із зони полум'я. Після  $(60 \pm 5)$  с вільного горіння починають подавати піну з навітряного боку на поверхню палаючої рідини із закріпленого на борті дека ствола-генератора. Фіксують тривалість гасіння, що дорівнює проміжку часу від початку подавання піни до припинення горіння. Закривають вентиль балона чи від'єднують компресор і скидають тиск у корпусі випробувального приладу типу вогнегасника та зважують його. Отримані показники використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів за формулою (2):

$$Q_B = \frac{q \times \tau_{\text{гас}}}{S}, \quad (2)$$

де  $Q_B$  – показник вогнегасної здатності,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$q$  – витрата,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\tau_{\text{гас}}$  – тривалість гасіння, с;

$S$  – площа вогнища,  $\text{м}^2$ .

Результат вважають позитивним, якщо тривалість гасіння не перевищує 120 с.

## 2. Хід та результати досліджень:

**2.1 Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни середньої кратності** наведено у таблиці 3.

На рис. 1 наведено фото визначення стійкості та кратності піни згідно з ДСТУ 3789:2015.



Рисунок 1 - Фото процесу визначення кратності та стійкості піни середньої кратності

Таблиця 3 – Результати досліджень з визначення кратності і стійкості піни середньої кратності утвореної з робочого розчину піноутворювача

№ зразка	Склад водного розчину зразка	Загальна маса піно збирача, підставки та циліндра, кг		Кратність піни		Стійкість піни, с	
		без піни	з піною	Фактичне значення	Середнє значення	Фактичне значення	Середнє значення
1.	-Вода – 94 %; -ПУ AFFF (Укр.)– 6%	10,13 ± 0,01	13,03 ± 0,01	68,9	68,4	188,0	186,0
		10,37 ± 0,01	13,15 ± 0,01	70,8		182,0	
		10,20 ± 0,01	13,30 ± 0,01	65,4		188,0	
2.	-Вода – 94%; -ПУ AFFF (ФРН)– 6%	10,27 ± 0,01	12,93 ± 0,01	75,1	72,1	234,0	250,0
		10,15 ± 0,01	13,03 ± 0,01	69,4		260,0	
		10,14 ± 0,01	13,13 ± 0,01	71,5		256,0	
3.	-Вода – 92,5%; -ПУ ЗП (Укр.)– 6%; -Конц. ПА* – 1,5%	10,00 ± 0,01	13,40 ± 0,01	58,0	71,6	232,0	230,0
		10,40 ± 0,01	13,62 ± 0,01	62,0		228,8	
		10,22 ± 0,01	13,30 ± 0,01	65,0		229,2	
4.	-Вода – 92,48%; -ПУ ЗП (Укр.)– 6%; -Конц. ПА* – 1,5%; -КМЦ** – 0,02%	11,44 ± 0,01	15,62 ± 0,01	47,8	48,2	326,0	320,0
		10,87 ± 0,01	14,96 ± 0,01	48,8		318,0	
		10,94 ± 0,01	15,10 ± 0,01	48,1		316,0	

*Розширена невизначеність результату визначення кратності піни становить 2,5*

*Розширена невизначеність результату визначення стійкості піни становить 5,0 с*

Примітка: \* - Поліакрилат натрію;

\*\* - Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози.

Зразок піноутворювача № 4, не відповідає вимогам ДСТУ 3789:2015 за показником кратності піни середньої кратності. Однак метою створення цього зразка було підвищення показників стійкості піни за рахунок часткового зменшення показника кратності, що мало місце при проведенні досліджень.

**2.2 Результати гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1** за інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача  $(0,038 \pm 0,004) \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \times \text{с})$  наведено у таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати досліджень з визначення тривалості гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1 з використанням розчину піноутворювачів

№ зразка	Склад зразка	Час гасіння, с				Показник вогнегасної златності, $\text{кг}/\text{м}^2$
		Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Середнє значення	
1.	-Вода – 94 %; -ПУ АFFF (Укр.)– 6%	56	59	59	58	2,20
2.	-Вода – 94%; -ПУ АFFF (ФРН)– 6%	45	46	41	44	1,67
3.	-Вода – 92,5%; -ПУ ЗП (Укр.)– 6%; -Конц. ПА* – 1,5%	38	42	37	39	1,48
4.	-Вода – 92,48%; -ПУ ЗП (Укр.)– 6%; -Конц. ПА* – 1,5%; -КМЦ** – 0,02%	34	32	33	33	1,25

*Розширена невизначеність результату визначення тривалостігасіння становить 3 с*

Примітка: \* - Поліакриламід;

\*\* - Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози.


**ВИСНОВОК:** За результатами досліджень зразки № 1-3 мають подібні значення кратності піни середньої кратності (середнє значення  $70,25 \pm 1,85$ ) та **відповідають** вимогам ДСТУ 3789:2015. Зразок № 4 **не відповідає** вимогам ДСТУ 3789:2015 за показником кратності піни середньої кратності. Однак метою створення зразка №4 було підвищення показників стійкості піни за рахунок часткового зменшення показника кратності, що підтверджено результатами досліджень (середнє значення 320 с, що на 134 с, 70 с, 90 с більше ніж у зразків № 1-3, відповідно).

За результатами досліджень з визначення тривалості гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1 встановлено, що зразок № 4, за рахунок збалансованих значень кратності та стійкості, має менший час гасіння модельного вогнища (середнє значення 33 с, що на 6 с, 11 с, 25 с менше ніж у зразків № 1-3

відповідно), а показник його вогнегасної здатності становить 1,25 кг/м<sup>2</sup>. Усі зразки, які були досліджено **відповідають** вимогам ДСТУ 3789:2015 за показником тривалість гасіння піною середньої кратності модельного вогнища пожежі 55В1.

Керівник досліджень:

Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу досліджень речовин та матеріалів науково-дослідного центру досліджень та випробувань

 Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

Дослідження провели:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ігор СТИЛИК

Керівник з якості:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ольга БЕДРАТЮК



**ІНСТИТУТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
(ІНДЦЗ НУЦЗ України)**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник науково-дослідного  
центру досліджень та випробувань



**Олександр ДОБРОСТАН**

« 21 » липня 2025 р.

**ПРОТОКОЛ**

вогневих досліджень модифікованої водної вогнегасної речовини для гасіння трансформаторної оливи у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук»

**Дмитрівка-2025**

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІНДЦЗ НУЦЗ України (вул. Центральна, 60, с. Дмитрівка Бучанського району Київської області).

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Зразки піноутворювачів, а саме :

- зразок 1 – піноутворювач AFFF (Німеччина);
- зразок 2 – дослідний зразок (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи).

**МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ:** Встановлення можливості використання розробленої модифікованої водної вогнегасної речовини для гасіння трансформаторної оливи шляхом визначення показника вогнегасної здатності та порівнянням із результатами існуючого засобу пожежогасіння (водна вогнегасна речовина на основі піноутворювача AFFF (Німеччина)) згідно з Програмою експериментальних досліджень розробленою у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук».

**УМОВИ ЗБЕРІГАННЯ ЗРАЗКІВ:** До початку досліджень зразки зберігались в лабораторному приміщенні за температури  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Умови проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови проведення досліджень

Дата проведення досліджень	Умови проведення досліджень		
	температура повітря, $^\circ\text{C}$	відносна вологість повітря, %	атмосферний тиск, мм рт. ст.
21.07.2025	24,2	48,1	747

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Для досліджень використовували установку для створення компресійної піни, а також засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), перелік яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування	Заводський номер	Діапазон вимірювань	Клас точності, невизначеність, похибка ЗВТ	Дата наступного калібрування
1	2	3	4	5	6
1	Термогірометр "Testo" 608-N1	45038120	від 0 до 50 $^\circ\text{C}$ від 2 % до 98 %	$U = 0,4 ^\circ\text{C}$ , $\Delta = \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ $U = 1,2 \%$ , $\Delta = \pm 3 \%$	08.2025

1	2	3	4	5	6
2	Барометр-анероїд М67	716	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 0,6$ мм рт. ст., $\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.	08.2025
3	Ваги ВН-30-1-А	1615813	від 0,2 кг до 30 кг	$U = 0,008$ кг, $\Delta = \pm 0,01$ кг	05.2026
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	4693	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності, $U = 0,24$ с, $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с, $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$ с	05.2026
5	Циліндр мірний 1-2000	б/н	від 160 см <sup>3</sup> до 2000 см <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 20$ см <sup>3</sup>	Не калібрується

## 1. Методи досліджень:

### 1.1 Визначення тривалості гасіння вогнища класу В (трансформаторна олива) та показника вогнегасної здатності

Експериментальні дослідження проводилися у три серії дослідів, у межах яких визначали масову витрату вогнегасної речовини, інтенсивність її подавання, а також температурні параметри пального та полум'я в процесі гасіння.

Для моделювання розливу горючої рідини використовували металеве деко площею 4 м<sup>2</sup>. В якості палива (горючої речовини) використовували трансформаторну оливу. Кількість палива підбирали таким чином, щоб забезпечити формування рівномірного шару завтовшки 20 мм по всій площі дека. Після підпалу встановлювався період вільного горіння тривалістю 120 с, після чого розпочинали подавання досліджуваної вогнегасної речовини.

Масову витрату визначали шляхом зважування витраченої кількості розчину, а інтенсивність подавання розраховували, як відношення масової витрати до площі модельного вогнища та часу гасіння.

Вимірювання температури трансформаторної оливи та полум'я здійснювали з використанням термопарного дроту типу К. Для контролю температури палива термопару розміщували посередині висоти шару оливи в точці перетину діагоналей металевого дека. Температуру полум'я вимірювали на висоті 2 мм над поверхнею пального в аналогічній характерній точці. З метою зменшення похибок вимірювання та запобігання пошкодженню чутливого елемента застосовували термопарний дріт із керамічним захисним покриттям. Додатковий контроль температури полум'я здійснювали за допомогою тепловізійного обладнання.

Отримані експериментальні дані використовували для визначення показника вогнегасної здатності досліджуваних складів відповідно до формули (1):

$$Q_B = \frac{q \times \tau_{\text{гас}}}{s}, \quad (1)$$

де:  $Q_B$  – показник вогнегасної здатності,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;

$q$  – витрата,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\tau_{\text{гас}}$  – тривалість гасіння, с;

$m$  – маса витраченої ВР, кг.

## 2. Хід та результати досліджень:

**2.1 Результати досліджень з визначення тривалості гасіння вогнища класу В (трансформаторна олива) та показника вогнегасної здатності** наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати досліджень з визначення тривалості гасіння вогнища класу В (трансформаторна олива) та показника вогнегасної здатності

№ зразка	Склад зразка	Час гасіння, с				Показник вогнегасної здатності, $\text{кг}/\text{м}^2$
		Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3	Середнє значення	
1.	-Вода – 94%; -ПУ АFFF (ФРН)– 6%	101	99	97	99	0,74
2.	-Вода – 92,48%; -ПУ ЗП (Укр.)– 6%; -Конц. ПА* – 1,5%; -КМЦ** – 0,02%	108	112	110	110	0,86

*Розширена невизначеність результату визначення тривалості гасіння становить 3 с*

Примітка: \* - Поліакрилат натрію;

\*\* - Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози.

Робочі моменти проведення експериментальних досліджень з визначення тривалості гасіння вогнища класу В (трансформаторна олива) та показника вогнегасної здатності модифікованої водної вогнегасної речовини наведено на рисунку 1, а усереднені результати зміни температури трансформаторної оливи та полум'я – на рисунку 2.



Рисунок 1 - Робочі моменти проведення досліджень з визначення вогнегасної здатності модифікованої водної вогнегасної речовини

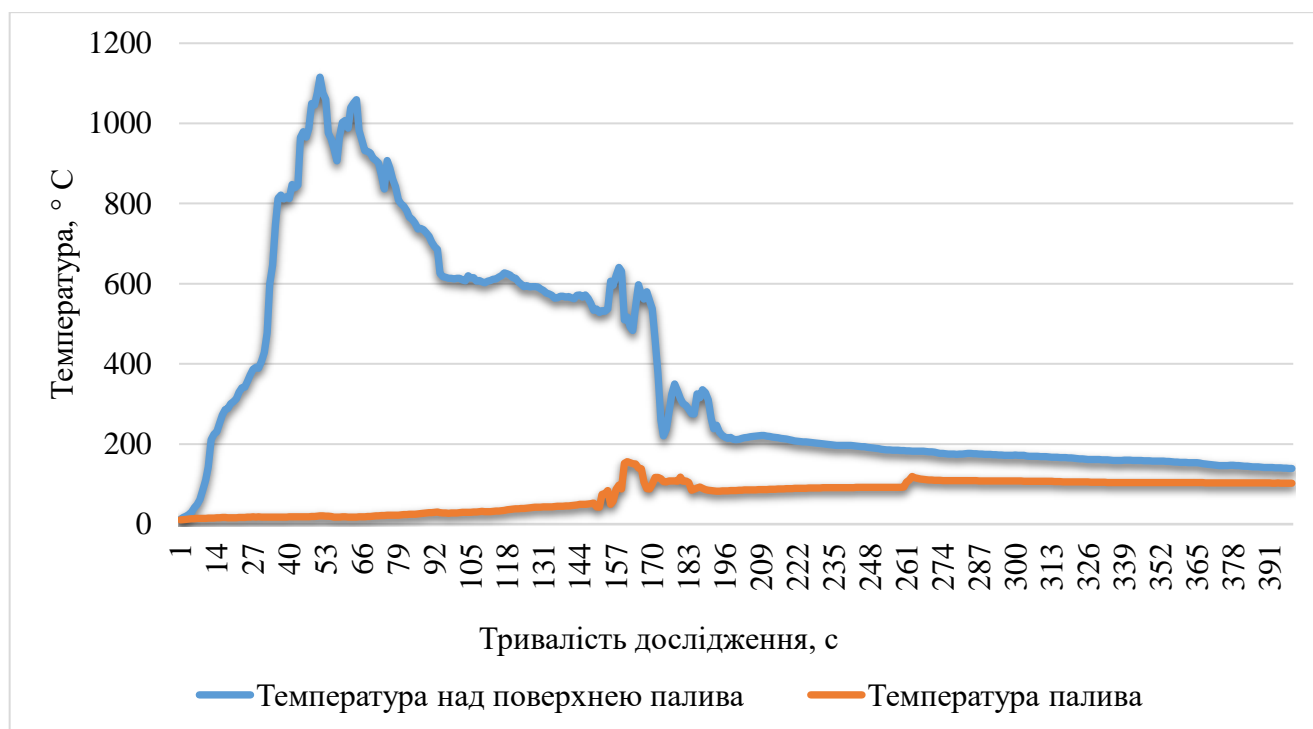



Рисунок 2 - Результати дослідження змін температури трансформаторного мастила та полум'я

**ВИСНОВОК:** За результатами досліджень встановлено, що максимальна температура прогрівання палива по середині висоти його покриття склала 155 °С, що свідчить про формування високотемпературної зони по всій товщині шару трансформаторної оливи. Модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи, за своєю вогнегасною здатністю не поступаються компресійній піні на основі плівкоутворюючого піноутворювача типу AFFF, забезпечуючи при цьому аналогічний рівень вогнегасної здатності.


Керівник досліджень:

Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу досліджень речовин та матеріалів науково-дослідного центру досліджень та випробувань

 Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

Дослідження провели:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ігор СТИЛИК

Докторант докторантури-ад'юнктури Національного університету цивільного захисту України

 Марія КУЦЕНКО

Керівник з якості:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ольга БЕДРАТЮК



**ІНСТИТУТ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ  
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЦИВІЛЬНОГО  
ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
(ІНДЦЗ НУЦЗ України)**

**НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ВИПРОБУВАНЬ**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник науково-дослідного  
центру досліджень та випробувань

Олександр ДОБРОСТАН

« 08 » липня 2025 р.



**ПРОТОКОЛ**

досліджень ефективності вогнеперешкоджувальних смуг

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІНДЦЗ НУЦЗ України (вул. Центральна, 60, с. Дмитрівка Бучанського району Київської області).

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Зразки вогнезахисних речовин, а саме:

- зразок 1 – дослідний зразок (модифікована водна вогнегасна речовина, яка розроблена у рамках дисертаційної роботи);
- зразок 2 – СГ-1 (15% водний розчин суміші діамоній фосфату та карбаміду).

**МЕТА ДОСЛІДЖЕНЬ:** Встановлення можливості використання розробленої модифікованої водної вогнегасної речовини для створення вогнеперешкоджувальних смуг та порівняння її ефективності із результатами існуючої вогнезахисної речовини СГ-1 (15% водний розчин суміші діамоній фосфату та карбаміду) згідно з Програмою експериментальних досліджень розробленою у рамках виконання дисертаційної роботи «Підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі гелеутворюючих полімерних сполук».

**УМОВИ ЗБЕРІГАННЯ ЗРАЗКІВ:** До початку досліджень зразки зберігались в лабораторному приміщенні за температури  $(20 \pm 3) ^\circ\text{C}$ . Умови проведення досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови проведення досліджень

Дата проведення досліджень	Умови проведення досліджень		
	температура повітря, $^\circ\text{C}$	відносна вологість повітря, %	атмосферний тиск, мм рт. ст.
07.07.2025	24,2	48,7	746
08.07.2025	25,0	49,6	750

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Для досліджень використовували оприскувач «Леміра», а також засоби вимірювальної техніки (ЗВТ), перелік яких наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Засоби вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування	Заводський номер	Діапазон вимірювань	Клас точності, невизначеність, похибка ЗВТ	Дата наступного калібрування
1	2	3	4	5	6
1	Термогірометр "Testo" 608-N1	45038120	від 0 до 50 $^\circ\text{C}$ від 2 % до 98 %	$U = 0,4 ^\circ\text{C}$ , $\Delta = \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ $U = 1,2 \%$ , $\Delta = \pm 3 \%$	08.2025

1	2	3	4	5	6
2	Барометр-анероїд М67	716	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 0,6$ мм рт. ст., $\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.	08.2025
3	Ваги ВН-30-1-А	1615813	від 0,2 кг до 30 кг	$U = 0,008$ кг, $\Delta = \pm 0,01$ кг	05.2026
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	4693	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності, $U = 0,24$ с, $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с, $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$ с	05.2026
5	Циліндр мірний 1-2000	б/н	від 160 см <sup>3</sup> до 2000 см <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 20$ см <sup>3</sup>	Не калібрується
6	Камера випробувальна КХТВ-500	003/02/09/21	від мінус 40 °С до 150 °С, від 10 % до 95 %	$\Delta = \pm 0,5$ °С, $U = 0,35$ °С, $\Delta = \pm 3$ %, $U = 1,2$ %	06.2027
7.	Термоанемометр VA 893	230800051	від 0 до 30 м/с,	$\Delta = \pm 0,1$ м/с, $U = 0,28$ м/с	05.2026

## 1. Методи досліджень:

### 1.1 Визначення ефективності вогнеперешкоджувальної смуги

Для створення модельного шару наземних горючих матеріалів використовують суміш компонентів хвойних порід дерев (дрібні гілки, кора, шишки тощо), що належать до найбільш пожежонебезпечних лісових горючих матеріалів. Перед проведенням досліджень підготовлену суміш кондиціюють протягом 24 год за температури  $(45 \pm 2)$  °С з метою стабілізації її вологості та забезпечення відтворюваності результатів.

Після кондиціонування суміш масою  $(1000 \pm 10)$  г рівномірно розміщують у металевому деці розмірами  $(900 \pm 5) \times (55 \pm 5)$  мм, формуючи однорідний шар по всій площі дека.

Оброблення досліджуваною вогнезахисною речовиною здійснюють методом розпилення з утворенням вогнеперешкоджувальної смуги шириною  $(500 \pm 1)$  мм, розташованої симетрично відносно центральної осі дека та дотриманням вимог виробника з метою рівномірного розподілу речовини по поверхні горючих матеріалів.

Для ініціювання горіння використовують бензин марки А-92 у кількості  $(25 \pm 2)$  мл, який наносять на поверхню матеріалів смугою шириною  $(50 \pm 10)$  мм. Після нанесення пального здійснюють підпалювання з навітряної сторони вздовж сторони дека, паралельно вогнеперешкоджувальній смузі.

Дослідження необхідно проводити у вогневому випробувальному боксі. Перед підпалюванням створюють контрольований повітряний потік зі швидкістю  $(1,0 \pm 0,1)$  м/с для імітації умов поширення низової пожежі. Після займання здійснюють візуальне спостереження за розвитком процесу горіння та фіксують максимальну глибину проникнення полум'я у межі вогнеперешкоджувальної смуги.

Вогнеперешкоджувальну смугу вважають ефективною за умови, що у двох повторних дослідах максимальна глибина проникнення полум'я не перевищує 50 % її ширини. Дослід повторюють з періодичністю 6 год. до моменту втрати смугою своєї ефективності. Отримані результати використовують для оцінювання вогнезахисної ефективності досліджуваних складів.

## 2. Хід та результати досліджень:

**2.1 Результати досліджень з визначення ефективності вогнеперешкоджувальних смуг створених за допомогою розробленої модифікованої водної вогнегасної речовини та вогнезахисної речовини СГ-1 (15% водний розчин суміші діамоній фосфату та карбаміду) наведено у таблицях 3, 4.**

Таблиця 3 – Результати досліджень з визначення ефективності вогнеперешкоджувальної смуги створеної за допомогою розробленої модифікованої водної вогнегасної речовини

Час проведення досліджень, год	Результати	
	Дослід 1	Дослід 2
6	Прогорання відсутнє	Прогорання відсутнє
12	Прогорання відсутнє	Прогорання відсутнє
18	Прогорання відсутнє	Прогорання відсутнє
24	Прогорання відсутнє	Прогорання відсутнє
30	Присутнє прогорання глибиною 45 мм	Присутнє прогорання глибиною 37 мм
36	Присутнє максимальне прогорання глибиною 350 мм	Присутнє максимальне прогорання глибиною 320 мм

Таблиця 4 – Результати досліджень з визначення ефективності вогнеперешкоджувальної смуги створеної за допомогою вогнезахисної речовини СГ-1 (15% водний розчин суміші діамоній фосфату та карбаміду)

Час проведення досліджень, год	Результати	
	Дослід 1	Дослід 2
6	Прогорання відсутнє	Прогорання відсутнє
12	Присутнє прогорання глибиною 58 мм	Присутнє прогорання глибиною 62 мм
18	Повне прогорання	Повне прогорання



Рисунок 1 - Робочі моменти проведення досліджень з визначення ефективності створених вогнеперешкоджувальних смуг

**ВИСНОВОК:** За результатами досліджень встановлено, що вогнеперешкоджувальна смуга, яка створена із застосуванням розробленої модифікованої водної вогнегасної речовини, протягом перших 24 год після нанесення забезпечувала повну відсутність прогорання в обох повторних дослідах. Через 30 год спостерігалось часткове проникнення полум'я на глибину 37–45 мм, що не перевищує 50 % ширини смуги та відповідає критерію ефективності. Максимальне прогорання 320–350 мм зафіксовано через 36 год, що свідчить про втрату необхідних вогнезахисних властивостей захисної смуги протягом зазначеного часу.

Вогнеперешкоджувальна смуга, сформована із застосуванням вогнезахисної речовини СГ-1 (15 % суміш діамоній фосфату та карбаміду) через 12 год демонструвала наявність прогорання глибиною 58–62 мм, що не перевищує допустимий критерій ефективності. Подальші дослідження (18 год) вказують на втрату необхідних вогнезахисних властивостей захисної смуги.

Керівник досліджень:

Провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу досліджень речовин та матеріалів науково-дослідного центру досліджень та випробувань

 Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

Дослідження провели:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ігор СТИЛИК

Керівник з якості:

Старший науковий співробітник науково-дослідного відділу технічного регулювання, метрології та системи якості науково-дослідного центру нормативно-технічного регулювання

 Ольга БЕДРАТЮК