

УДК 614.842.61

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРІВ ПОЛІАКРИЛАТУ

[https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.\(19\).65-78](https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).65-78)

Стилик І. Г.^{1*}, ORCID iD 0000-0002-8474-2014
 Пономаренко Р. В.¹, ORCID iD 0000-0002-6300-3108
 Кодрик А. І.¹, ORCID iD 0000-0002-3787-5674
 Тітенко О. М.¹, ORCID iD 0000-0002-4950-8580
 Борисов А. В.², ORCID iD 0000-0001-6858-0492
 Добростан О. В.¹, ORCID iD 0000-0001-8908-0729

*E-mail: igor_stilik@ukr.net

¹Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна

²Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:
24.04.2025

Пройшла рецензування:
05.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

полімерні гідрогелі,
в'язкість розчину,
модифіковані системи,
вогнегасні властивості,
водні вогнегасні речовини,
обмеження поширення
пожеж, вогнезахист, метод
розрахунку, вогнестійкість,
математичне
моделювання,
ефективність гасіння,
методика досліджень,
пожежна безпека,
вогнезахисна
ефективність,
екологічність, поширення
вогню

АНОТАЦІЯ

Завданнями даного дослідження є виявлення зміни властивостей водних вогнегасних розчинів та підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок використання модифікованих водних вогнегасних речовин з підвищеною вогнегасною здатністю, як підґрунтя покращення показників якості наявних, розроблення нових зразків водних вогнегасних речовин з використанням сучасних гелеутворюючих сполук, а також підвищення вогнегасної ефективності при їх застосуванні в елементах систем протипожежного захисту об'єктів та при пожежогасінні. Для вирішення цих завдань запропоновано попереднє створення рідких стабілізованих концентратів гелеутворюючих сполук для подальшого їх розчинення у воді, або з проміжним розчиненням у піноутворювачі. Визначено вплив різного роду добавок на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики, що і є метою запропонованого дослідження. Проаналізовано сучасний стан щодо наявності та тенденцій розроблення у світовій та вітчизняній практиці вогнегасних речовин та технологій їх застосування. Окреслено можливі шляхи удосконалення рецептур та підвищення ефективності застосування вогнегасних речовин з урахуванням, насамперед, критеріїв їх впливу на фізико-хімічні властивості, економічності та екологічності. Зазначено, що в порівнянні з водою вогнегасні розчини на основі модифікованих систем та нових технологій їх продукування мають ряд переваг, що полягають в суттєвому збільшенні їх стійкості та покращенні адгезійних властивостей, що забезпечує підвищену вогнезахисну дію за рахунок утворення на поверхні горючої речовини пористого шару або плівки, що підвищує ефект охолодження, ускладнює розповсюдження полум'я по поверхні та захищає горючий матеріал за рахунок своєї низької теплопровідності та ізолюванню від доступу кисню з повітря, що важливо при гасінні поверхневих пожеж. На підставі аналізу літературних джерел, а також власних теоретичних та експериментальних досліджень визначені шляхи удосконалення рецептур вогнегасних речовин, технологій їх застосування, а також розвитку відповідної нормативної, навчальної та довідкової баз

Постановка проблеми.

Традиційно вогнегасні та вогнезахисні речовини на водній основі відіграють ключову роль у забезпеченні пожежної безпеки об'єктів. Крім великої кількості позитивних властивостей води, як

вогнегасної речовини, вона має і ряд недоліків [1-3]. Одним з таких недоліків є низький коефіцієнт безпосереднього використання води при гасінні пожеж, що обумовлено стіканням з вертикальних і похилих поверхонь та явищем плівкового

кипіння на розжарені поверхні (ефектом Ляйденфроста). Для зменшення втрат води в процесі гасіння та обмеження поширення пожеж практикують введення до вогнегасного розчину загусників і змочувачів [4-8]. Добавки вносять свій специфічний внесок у зміну фізико-хімічних характеристик води, які можуть підвищити її вогнегасні та вогнезахисні властивості. Змочувачі та поверхнево-активні речовини знижують поверхневий натяг води, розділяють воду на більш дрібні краплі, збільшують змочуваність поверхні 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 речовин і матеріалів. Таким чином, існує нагальна потреба у комплексному дослідженні впливу таких добавок на робочі характеристики вогнегасних речовин для розроблення нових, більш ефективних складів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для розкриття більшою мірою потенціалу води в якості вогнегасної речовини пропонується застосування відповідних добавок поверхнево-активних речовин, які утворюють у воді гідрогель і підвищують її адгезивні властивості [8-11]. 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 даному випадку водою. 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, що напряду впливає на зниження займистості матеріалів та підвищення

вогнестійкості конструкцій об'єкта, відповідно.

Недоліком таких гелів [12,13] та технологій їх отримання є можлива втрата теплоізоляційних властивостей після випаровування води, можливість грудкування при взаємодії з водою, необхідність ретельного змішування гелеутворюючого концентрату і води в розчині, що ускладнює, як розпилення гелю, так і обслуговування технічних засобів подачі після гасіння пожежі. Для вирішення цих проблем пропонується попереднє створення рідких стабілізованих концентратів гелеутворюючих сполук з подальшим їх розчинення у воді, або з проміжним розчиненням у піноутворювачі. Для цього потрібно визначити вплив різного роду добавок на їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики. В залежності від класу пожежі можливо як використання високо поглинаючих нерозчинних полімерів, наприклад Esofloc A-07, так і водорозчинних полімерів з високою молекулярною масою, наприклад Esofloc A-18, Esofloc A-25. Полімери типу Esofloc A-07 являють собою зшиті акрилові або акриламідні полімери, які можуть поглинати воду, маса якої багаторазово перевершує їхню власну масу, однак не розчиняючись у воді. Потім ці речовини присутні у формі частинок гелю, які сильно набрякають внаслідок гідратації та диспергують у воді для гасіння пожежі (рисунок 1). Якщо додати до набряклих частинок гелю надлишок води, остання залишиться у вигляді чистої водної фази обгортаючи гелеподібні частинки. Наявність таких частинок підвищує вогнегасну (вогнезахисну) ефективність протипожежного засобу оскільки при їх розпорошенні безпосередньо на вогонь (або на поверхню горючого матеріалу) на певному етапі вони налипають на поверхню, поступово випаровуються, зменшуючи ресурс часу та масу води, необхідних для гасіння пожежі. Застосування розчинів на основі такого гелеутворюючого матеріалу має бути ефективним для гасіння пожеж класу А.

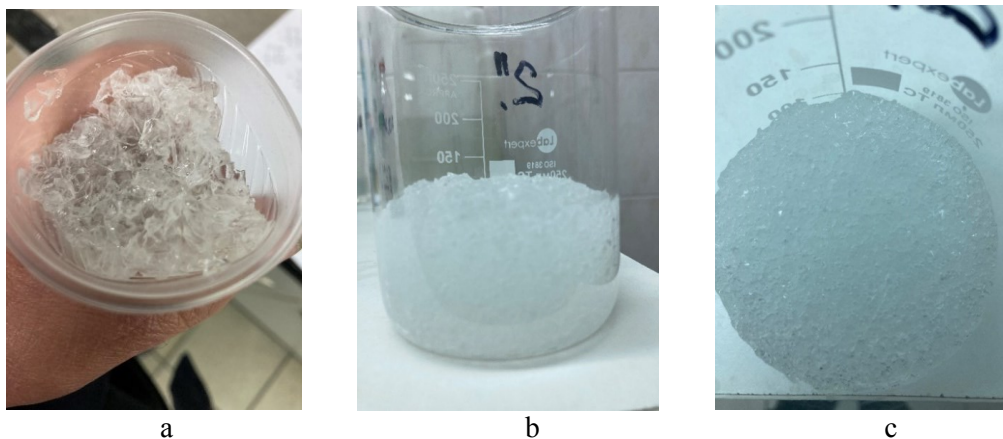


Рисунок 1 – Загальний вигляд 2% водопоглинаючого нерозчинного полімеру Ecofloc A-07 у воді

Добавки водорозчинних полімерів з високою молекулярною масою містять сополімери акрилової кислоти, зшиті за допомогою похідних поліефірів, які застосовують для надання тиксотропних властивостей воді (рисунок 2). Подібні тиксотропні суміші стоншуються під дією зсувних зусиль та/або швидкості руху [6-8] та легко розпорошуються за допомогою гідрантів. Як тільки ці зусилля зсуву усуваються, або швидкість стає близькою

до нуля (при попаданні на поверхню), суміш потовщується, що дозволяє їй зачіплятися на поверхні і покривати її, гасити полум'я і запобігати поширенню вогню. При додаванні до них додаткової води має місце як зменшення концентрації полімеру у розчині, так і зниження в'язкості. Вірогідно застосування розчинів на основі такого гелеутворюючого матеріалу буде ефективним для гасіння вогнищ класу В.

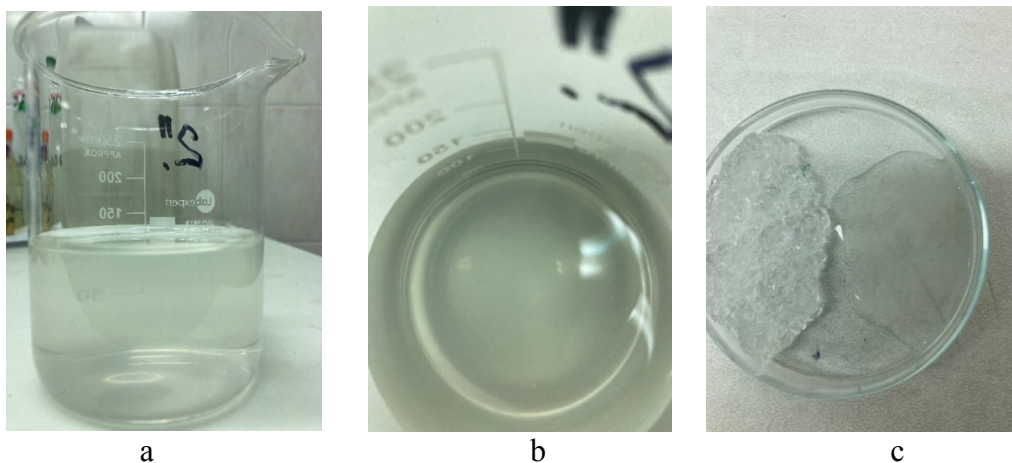


Рисунок 2 – Загальний вигляд 1% концентрату водорозчинного полімеру з високою молекулярною масою типу Ecofloc A-18 (а та б) та його порівняння з полімером типу Ecofloc A-07 (с)

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є дослідження впливу концентрації гелеутворюючих речовин та добавок до них на зміну фізико-механічних і експлуатаційних характеристик водопінних розчинів водних вогнегасних

речовин (ВВР) з метою збільшення ефективності їх застосування.

Методи досліджень. У роботі використано аналітичний та експериментальний методи досліджень, а також математичне моделювання та графічну інтерпретацію результатів досліджень.

Виклад основного матеріалу.

Досліджувались гелеутворюючі порошкові склади (які являють собою порошок, що диспергується у воді), що складаються з матеріалу твердої дисперсної фази і стабілізатора, властивості яких при цьому 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, у тому числі після часткового випаровування води, що забезпечує їй відновлюваність властивостей при повторному додаванні води;
- можливість швидкого формування вогнегасної речовини у надзвичайних ситуаціях.

В якості добавок застосовувалися:

- нерозчинний високо поглинаючий полімер Есофлос А-07 (зшиті сополімери калієвої і амонійної солей акрилової кислоти), що поглинає воду, утворюючи гелеподібні частинки, сумісні з ПАР та мінеральними високодисперсними добавками, фракційністю 20...60 меш, з концентрацією у воді від 0,01 % до 0,5 % (далі гідрогель на основі акрилатів, або ПА);
- водорозчинний поліакриламід з високою молекулярною масою ($M.M. = 2 \times 10^5 - 6 \times 10^6$), серії Есофлос А-18, Есофлос А-25 (зшиті сополімери акрилової кислоти за допомогою похідних поліефірів, сополімери акриламиду та похідних акрилової кислоти, наприклад, акрилатної солі), сумісні з ПАР та мінеральними високодисперсними добавками, фракційності 20...60 меш, з концентрацією у воді від 0,01 % до 0,5 % (далі гідрогель на основі поліакриламідів, або ПАА);
- пінистий колоїдний діоксид кремнію, як суспендуючий агент для

регулювання стабільності та текучості дисперсії;

- рафінована ріпакова олія - в якості рідкого середовища та емульгатору;
- сорбітанмоноолеат - в якості поверхнево-активної речовини з низьким ГЛБ для сприяння дисперсії сухих полімерних частинок у рослинній олії;
- натрієва сіль карбоксиметилцелюлози в якості загусника та для коригування в'язкості розчину.

В якості ПАР також використовували піноутворювачі як загального призначення, так і плівкоутворюючі, в концентрації від 0,1% до 6%. Для порівняння в якості «еталонів» використовували піноутворювачі з високою в'язкістю відомих виробників.

Здатність до прилипання гелевих вогнегасних речовин в залежності від концентрації гелеутворювача у розчині досліджували наступним чином. Щоб визначити адгезію гідрогелів до дерев'яних дощочок, останні розміром 100×50×8 (А×В×С) мм зважували перед тим, як дощечка буде занурена у гідрогель на глибину 50 мм протягом 60 с. Після того, як дощечку видаляли з гідрогелю, суспендували її протягом 600 с, та знову зважували. Масу гідрогелю, що залишався прилиплім до поверхні, розраховували з різниці в масі до і після занурювання. Потім визначали товщину утвореної плівки гідрогелю виходячи з його маси та площі поверхні зануреної до гелевого розчину. Отримані результати представлені у таблиці 1 і свідчать про те, що величина відносної здатності до прилипання гідрогелю на основі полімерного гелеутворювача може досягати значних величин (від 7 до 8 разів у порівнянні з водою). Захисний шар гідрогелю містить велику кількість води, що може захистити поверхні від нагріву. Максимально ріст здатності до налипання знаходиться при концентрації гелеутворюючої речовини у розчині у межах 0,3%, що доцільно враховувати при створенні концентрату гелеутворювача.

Таблиця 1 – Адгезія гелеутворювача до дерев'яних дощочок в залежності від його концентрації.

Концентрація гелю у розчині, %	1,00	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05
№ дощечки	4	3	6	9	7	8
Вага чистої дощечки, г	12,44	13,41	13,23	13,62	16,44	15,92
Вага дощечки після 600 с 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 ²	0,0224	0,0160	0,1260	0,0090	0,0054	0,0034
Товщина утвореної гелевої плівки, мм	0,021	0,015	0,012	0,0085	0,0049	0,0032

Залежність в'язкості водних вогнегасних речовин від вмісту гелеутворювача досліджувалась наступним чином. У випадку використання гідрогелю, отриманого з концентрату ВВР, виявлено значний діапазон величин в'язкості. В залежності від складу вогнегасної речовини та умов дослідження значення в'язкості гідрогелю можуть відрізнятися приблизно в 20000 разів від: 1 сП до 21,723 сП. Для вимірювання в'язкості були використані методики досліджень, які запропоновані у [2, 14].

Для вимірів у середині діапазону (динамічна в'язкість від 1,5 сП до 40 сП), або близьких до верхньої границі (динамічна в'язкість від 40 сП та вище) використовувався метод вимірювання та розрахунку уявної динамічної в'язкості (apparent dynamic viscosity) Стокса (падіння кульки в рідинному середовищі вздовж осі трубки) із застосуванням відповідних математичних моделей.

Вимірювання уявної динамічної в'язкості виконувалося шляхом відеозйомки та подальшої обробки відеофайлу з використанням комп'ютерної системи Movavi Video Suite 17.5.0, за допомогою якої обчислювались висота та час падіння кульки у випробуваному середовищі.

Досліджувалась залежність уявної в'язкості (apparent viscosity) гідрогелю від концентрації гелеутворювача та величини градієнта швидкості (velocity gradient), або швидкість відносної деформації зсуву (shear rate) в різних умовах руху гідрогелю. При змінах концентрації гелеутворювача від мінімальної 0 % до максимальної 1,819 % мали місце зміни фізичних властивостей рідин: від характерних для ньютонівських

рідин до неньютонівських псевдопластичних (pseudoplastic liquids), для яких характерне зменшення уявної в'язкості (apparent viscosity) при зростанні напруження зсуву (shear stress) та тиксотропних (thixotropic liquids), для яких характерним є залежна від часу уявна в'язкість в умовах сталого градієнта швидкості.

Вимірювання значень у середині діапазону (динамічна в'язкість від 1,5 сП до 40 сП) відповідає часу падіння кульки у середовищі рідини, в'язкість якої ми вимірюємо, в діапазоні від 0,2 с до 0,7 с. У зв'язку з величинами в'язкості у вказаному діапазоні має місце прискорений рух кульки.

Для цього випадку (вимірів у середині діапазону) була розроблена математична модель руху з прискоренням кульки у рідинному середовищі. Сила супротиву руху кулі може бути виражена у вигляді загального рівняння Ньютона:

$$F_{fr}(t) = \xi(Re(t)) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2}, \text{ N}, \quad (1)$$

де: t – поточний час руху кульки, с;

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

S – площа поперечного перетину кулі, м³;

$\rho_g = 1100$, густина гелю, кг/м³;

$\omega(t)$ – швидкість руху кулі у середовищі гідрогелю, м/с

Рівняння, що описує динаміку руху кулі буде виглядати:

$$m \cdot \frac{d}{dt}(\omega(t)) = m \cdot (\rho_d - \rho_g) - F_{fr}(t), \text{ N}, \quad (2)$$

де: m – маса кулі, кг;
 $\rho_d = 7800$, густина кулі, кг/м³

Для розрахування коефіцієнту гідравлічного супротиву обтікання кулі обрана модель Glift та Gauvin, яка з точністю до 2% відповідає кривій Релея у діапазоні: $0,1 < Re < 200000$:

$$\xi(Re(t)) = \frac{24}{Re(t)} \cdot \left(1 + 0.15 \cdot Re(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{Re(t)^{1.16}}} \right), \quad (3)$$

При цьому, величина критерію Рейнольдса розраховується за традиційною формулою:

$$Re(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)}, \quad (4)$$

де: d – діаметр кулі, м.

Тоді, використовуючи (2 та 3) 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:

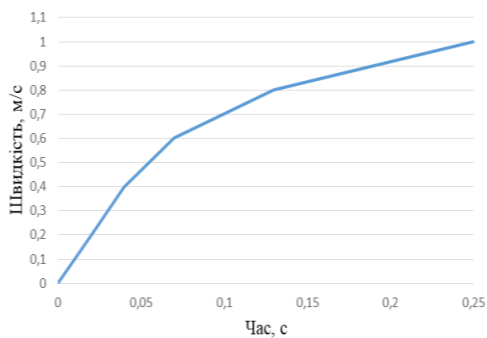
$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt}(\omega(t)) = (\rho_d - \rho_g) - \frac{24}{Re(t)} \cdot \left(1 + 0.15 \cdot Re(t)^{0.686} + \frac{0.42}{1 + \frac{42500}{Re(t)^{1.16}}} \right) \cdot S \cdot \frac{\rho_g \cdot \omega(t)^2}{2}, \\ Re(t) = \frac{\rho_g \cdot d \cdot \omega(t)}{\mu(\omega(t), t)} \\ L = \int_{t_0}^{t_f} (\omega(t)) dt \end{array} \right. \quad (5)$$

де: $L = 0,25$ – довжина падіння кулі, м;
 t_0, t_f – час, відповідно, початку та кінця падіння кулі, с;
 $\mu(\omega(t))$ – уявна динамічна в'язкість, Па·с

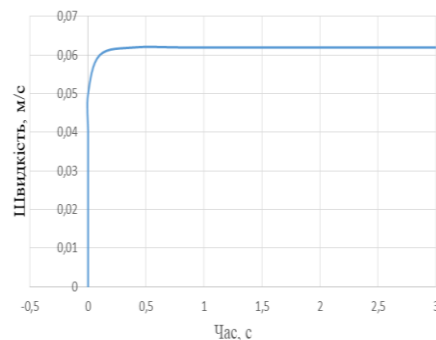
Вимірювання значень у діапазоні величин динамічної в'язкості близьких до верхньої границі (динамічна в'язкість від 40 сП і вище), що відповідає часу падіння

кульки у середовищі рідини, в'язкість якої вимірюється, від 0,7 с і більше.

У зв'язку з величинами в'язкості у вказаному діапазоні має місце рух кульки практично з постійною швидкістю (рисунок 3 б).



а



б

Рисунок 3 – Залежність швидкості процесу падіння від часу падіння кульки в умовах проведення дослідів на існуючому обладнанні: а – при значеннях динамічної в'язкості у середньому діапазоні, б – при високих значеннях динамічної в'язкості, близьких до верхньої границі діапазону вимірювань

Для цього випадку (вимірів високих значеннях динамічної в'язкості, близьких до верхньої границі) була використана відома математична модель руху з постійною швидкістю кульки у рідинному середовищі – модель Стокса з уточненням Ладенбурга:

$$\mu = \frac{D_s^2 \cdot (\rho_F - \rho) \cdot g \cdot t_{fm}}{18 \cdot L \cdot \left(1 + 2.4 \cdot \frac{D_s}{D_{tube}}\right)}, \text{ м}^2, \quad (6)$$

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

D_s – діаметр кульки, м;

D_{tube} – діаметр циліндру, м;

ρ , ρ_F – густина випробуваної рідини та сталі, кг/м³;

$g = 9.81$ м/с² – прискорення вільного падіння;

μ – величина динамічної в'язкості випробуваної рідини, Па·с;

t – поточний час, с;

L – довжина падіння кульки, м

Результати експериментів з вимірювання уявної динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту гелеутворювача Есофлос-07 у водному середовищі та у межах концентрацій, що забезпечують максимальний діапазон динамічної в'язкості, представлені на рисунку 4.

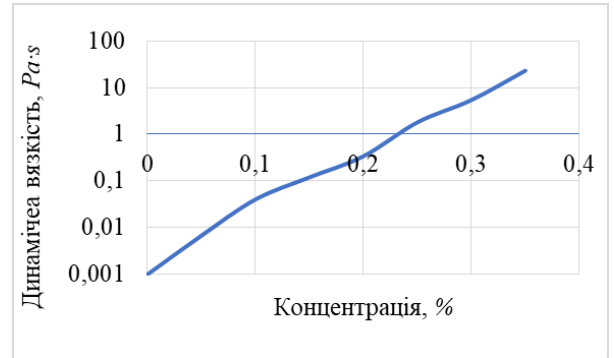


Рисунок 4 - Залежність уявної динамічної в'язкості від концентрації гелеутворювача

Результати експериментів з вимірювання уявної динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакриламід у межах, що можуть бути застосовані для створення рецептур водних вогнегасних речовин, представлені на рисунку 5.

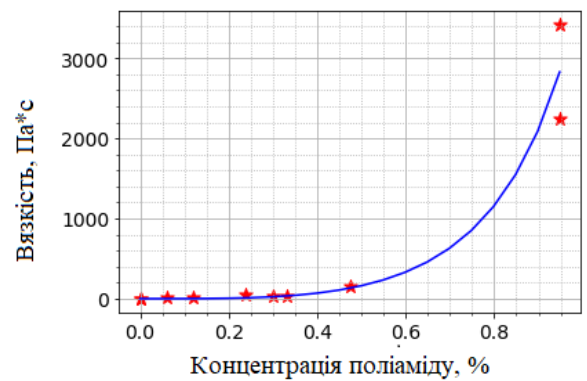


Рисунок 5 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакриламід

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакриламід з величиною достовірності аппроксимації $R^2 = 0,952$:

$$\mu = 0,482 \cdot \left(\exp \left[\left(\frac{p}{0,948} \right)^{3,706} \right] - 1 \right) \cdot 3412 + 1, \text{ с П}, \quad (7)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;

p – доля поліакрилату натрію, %

На Рисунку 6 представлена графічна залежність в'язкості розчину від концентрації — високомолекулярного розчинного полімеру Есофлос А-18 при додаванні до розчину натрієвої солі карбоксиметилцелюлози.

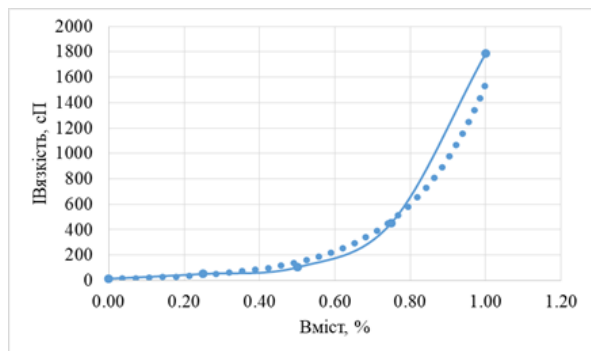


Рисунок 6 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту КМЦ при вмісті поліакриламід 0,1% та ПАВ 3%

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0,964$:

$$\mu = 13,396 \cdot \exp(4,747 \cdot p), \text{ сП}, \quad (8)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;
 p – доля КМЦ, %

На рисунку 7 представлена графічна залежність в'язкості розчину від концентрації в робочого розчину поліакрилату натрію – нерозчинного водапоглинального полімеру Есофлос А-07.

Отримана апроксимаційна формула залежності в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0,964$:

$$\mu = 1,75 \cdot \exp(10,394 \cdot p), \text{ сП}, \quad (9)$$

де: μ - в'язкість робочого розчину, сП;
 p – доля поліакрилату натрію, %

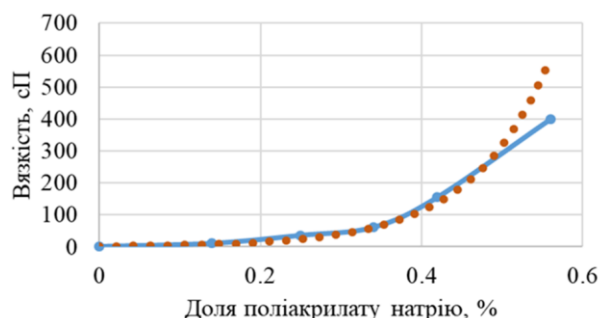
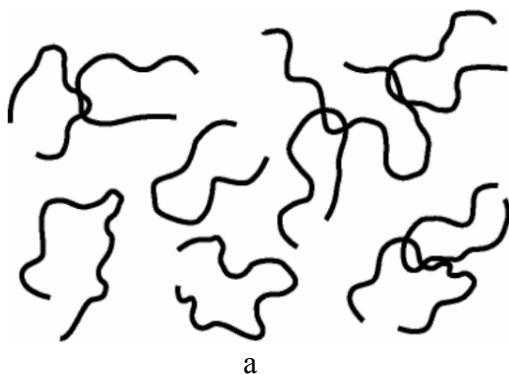
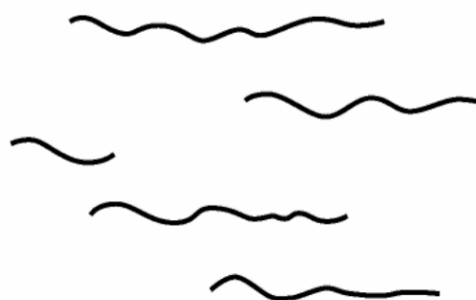


Рисунок 7 – Залежність динамічної в'язкості робочого розчину від вмісту поліакрилату натрію

В подальшому досліджувалась залежність в'язкості вогнегасних речовин від швидкості руху. Специфічність такої залежності для речовин, що досліджувались, можна пояснити тим, що основою гелеутворювача є поліакриламід, який має лінійно-ланцюгову структуру (linear-chain structure). Цим можна пояснити пониження уявної в'язкості при підвищенні значень відносного зсуву, адже при цьому має місце перехід від ізотропної (рисунк 8 а) до анізотропної структури (рисунк 8 б), що ускладнює вихрові потоки, характерні для турбулентного режиму. У той же час відомі тиксотропні властивості гідрогелів [7, 8], які можуть значно затримувати процес переходу від ізотропної до анізотропної структури.



а



б

Рисунок. 8 – Зміни структури гідрогелю в залежності від швидкості потоку: а – рідина у нерухомому стані; б – рідина у стані руху

Встановлено факт різкого зниження в'язкості гідрогелю (близько до звичайної води) при збільшенні швидкостей подачі ВВР існуючими засобами пожежної техніки, що створює зручні умови для проектування спеціальної пожежної техніки з використанням гідрогелевих вогнегасних речовин.

На рисунку 9 представлена графічна залежність динамічної в'язкості від швидкості для ряду гелевих піноутворювачів відомих марок.

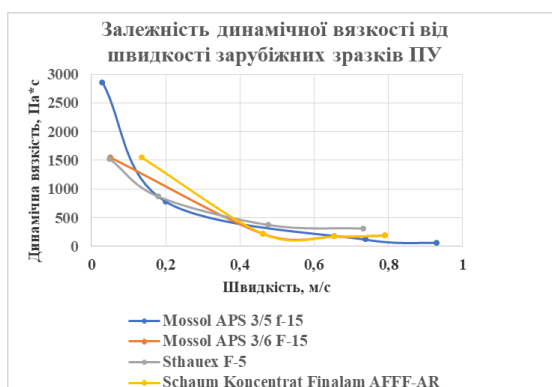


Рисунок 9 – Залежність динамічної в'язкості гелевих піноутворювачів від швидкості

На рисунку 10 наведена графічна залежність динамічної в'язкості ряду дослідних гелевих піноутворювачів на основі високомолекулярних гелеутворювачів типу Ecosfloc A-18 та добавок до нього від швидкості.

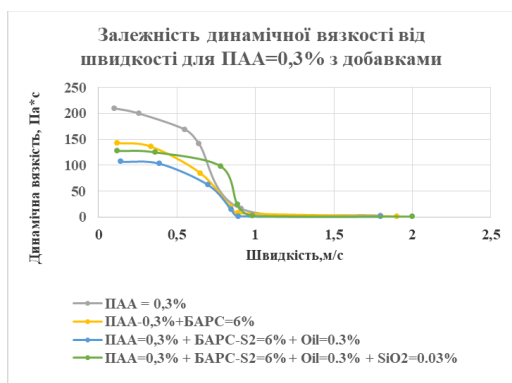


Рисунок 10 – Залежність динамічної в'язкості ряду дослідних гелевих піноутворювачів на основі високомолекулярних гелеутворювачів

типу Ecosfloc A-18 та добавок до нього від швидкості

В'язкість наведених відомих ПУ знаходилася у межах від 150 Па·с до 3000 Па·с. Вірогідно таку в'язкість розчину можливо отримати при додаванні до розчину піноутворювача гелеутворюючі сполуки. Частково це підтверджується і значним зменшенням в'язкості розчину при збільшенні швидкості (рисунки 9, 10), що характерно для розчинів з гелеутворюючими сполуками. Більш докладна інформація про наявність у цих ПУ гелеутворювача відсутня, оскільки інформація про склад концентратів є власністю фірм-виробників.

Однією з важливих характеристик розчинів, що досліджувалась, є їх в'язкість. Враховуючи, що на меті планувалось створення концентратів розчинів для гасіння вогнищ класу А та В, в тому числі на базі існуючих піноутворювачів, в якості контрольованих параметрів були кратність та стійкість піни, які є показниками її якості.

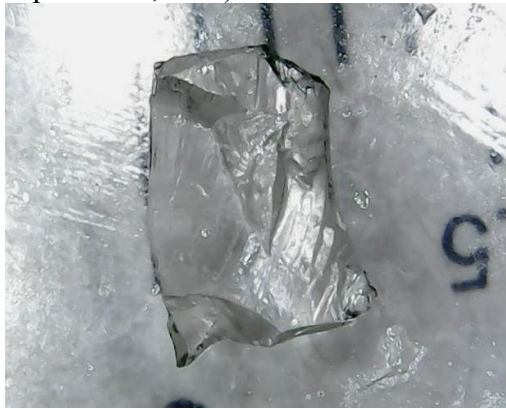
В подальшому вивчалися вплив на ВВР її концентрації, типу та кількості ПУ і вплив добавок: рапсової олії, колоїдного діоксиду кремнію (SiO_2), сорбітанмоноолеату (Span – 80) та натрієвої солі карбоксиметилцелюлози (КМЦ). Досліджувався їх вплив на в'язкість, кратність та стійкість утворюваного пінного або водного розчину.

При взаємодії часток гелеутворюючих сполук з водою важливо контролювати час набухання часток гелю, який залежить від розмірів часток та можливий процес їх агрегації. У таблиці 2 наведено орієнтовний час повного набухання (коли розмір частки перестає змінюватись) часток водо поглинаючого полімеру Ecosfloc A-07 при зміні фракційності часток гелеутворювача.

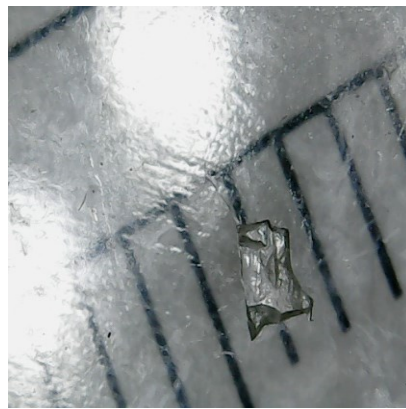
Таблиця 2 – Залежність часу набухання часток гелеутворювача від його фракційності

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

На рисунку 11а зображена частка гелеутворювача, а на 11б набухлий частка гелю. Частка гелю, що набухла у чистій воді за 50 секунд. Фракція більш ніж 0,125 мм (поділка на фото дорівнює 0,1 мм).



а



б

Рисунок 11 – Частка гелю, що набухла у чистій воді за 50 секунд

На рисунку 12 наведені фото частки гелів ПАА та ПА, що зіпилися при контакті з водою.



а



б

Рисунок 12 – Частки гелю, що зіпилися при контакті з водою: а - високомолекулярний водорозчинний полімер; б – нерозчинний волого поглинальний полімер

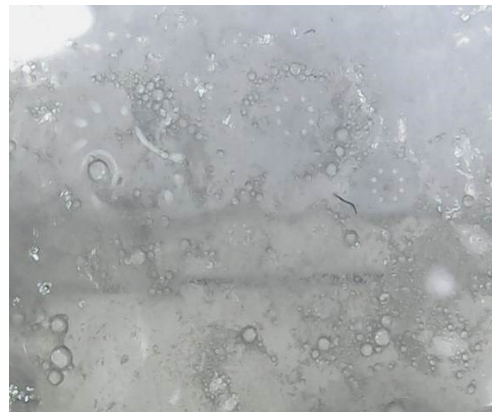
Для вирішення питання щодо одночасного набухання часток прийнято рішення надалі використовувати частки однакової фракційності у діапазоні сит на розділювачі матеріалів. При використанні гелеутворювача без домішок при створенні гелевого розчину проводилося його додавання до води, що оберталася, малими дозами та однієї фракційності. Отриманий розчин перемішували у мішалці протягом 10 хвилин, потім відстоювали 30 хвилин. Подальше використання розчину

проходило після контролю однорідності розчину. Якщо у розчині залишалися грудки, їх знову розбивали у мішалці.

При приготуванні комбінованих розчинів гелеутворювача, згідно з рекомендацій [7], використовували дисперсію полімеру в рапсовій рафінованій олії. Застосування олії (можливо з додаванням Span – 80 та діоксиду кремнію) надійно захищало частинки від агрегації (рисунок 13).



а



б

Рисунок 13 - Загальний вигляд розчину у воді дисперсії полімерів у олії з додаванням діоксиду кремнію та Span – 80: а - високомолекулярний водорозчинний полімер; б - нерозчинний вологопоглинальний полімер

На рисунках 14 та 15 наведені діаграми впливу добавок на експлуатаційні характеристики піни низької кратності, отриманої з розчинів високомолекулярного водорозчинного

полімеру (ПАА) та нерозчинного вологопоглинального полімеру (ПА) у розчині 6 % ПУ загального призначення Барс 2S.

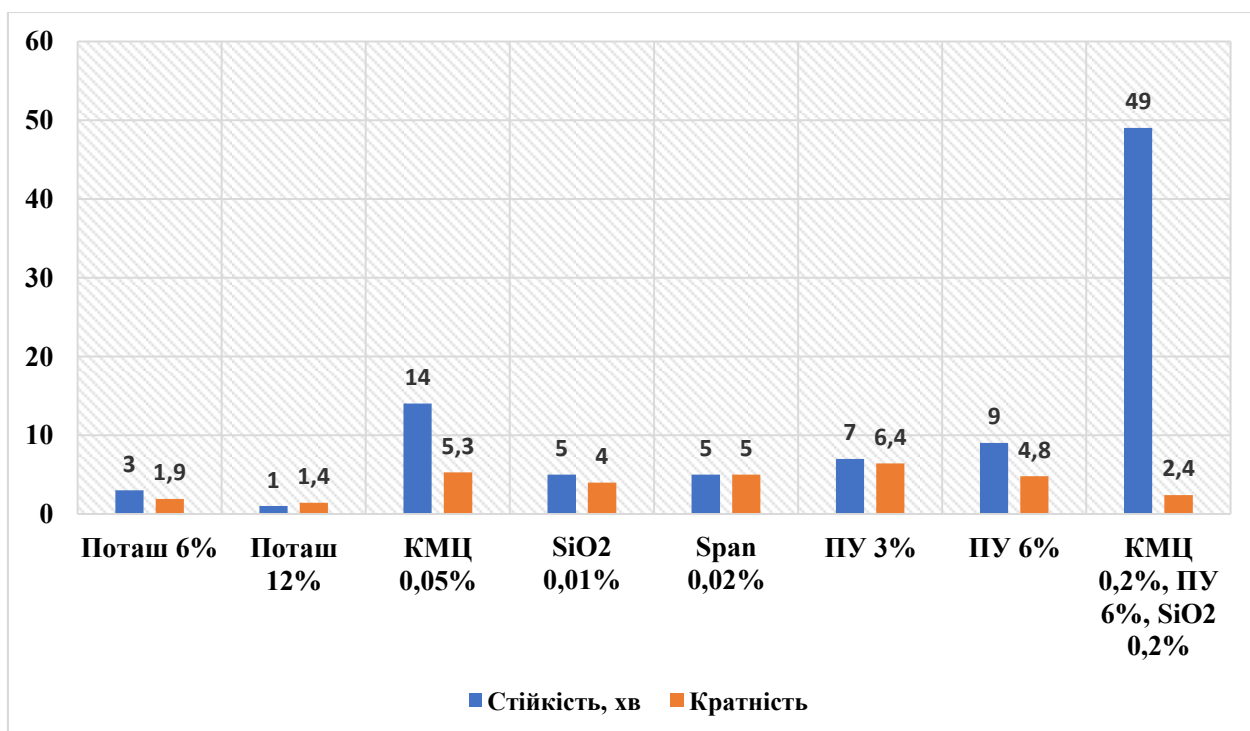


Рисунок 14 – Вплив добавок на стійкість і кратність піни утвореної у розчині 0,5% концентрату ECOFLOC A-07 та 6% ПУ загального призначення

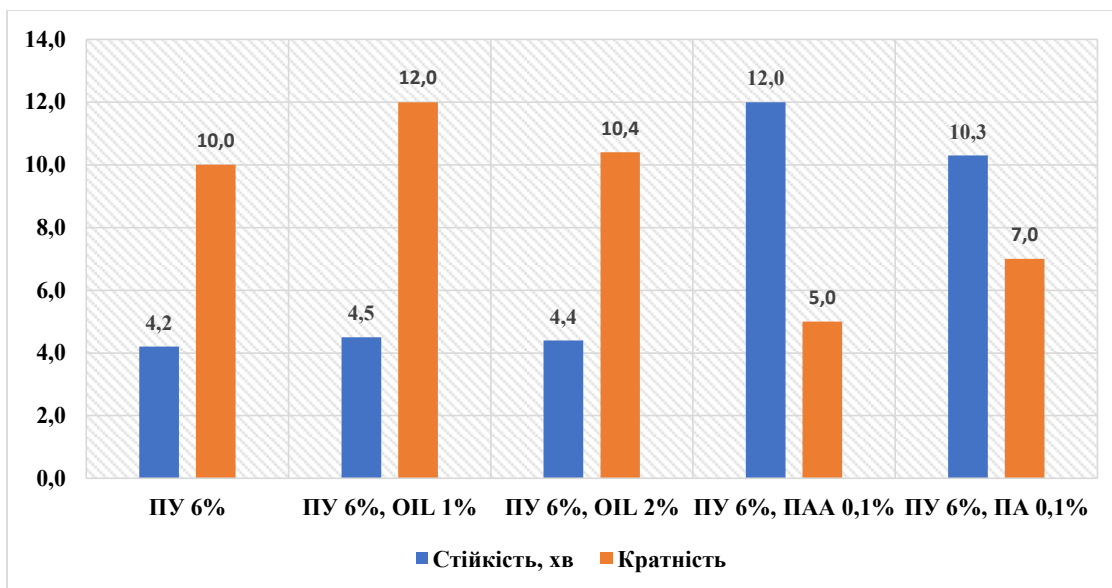


Рисунок 15 – Вплив добавок на стійкість і кратність піни отриманої з 0,5% концентрату вологопоглинаючого нерозчинного полімеру та 6% розчину ПУ загального призначення

Висновки та напрями подальших досліджень.

1. Основні напрями подальших робіт стосовно створення концентратів ВВР, використовуючи в якості основи полімерні матеріали, мають включати застосування поперечно-зшитих полімерних частинок у формі дисперсії в рослинній олії. Додавання до дисперсії водо поглинаючої добавки до води необхідно в кількості, достатній для збільшення в'язкості отриманої суміші вода-добавка вище 100 сП, при цьому після поглинання води добавка має утримувати більше ніж 50 вагових відсотків (мас. %) від загальної кількості води. Дисперсія повинна легко змішуватися з водою, щоб отримати суміш з достатньо високою в'язкістю, яка б легко прилипла до вертикальних і горизонтальних поверхонь у функціональній товщині.

2. Полімер, що міститься в дисперсії, повинен мати короткий час набухання (для поглинання води) і легко виводиться за допомогою стандартного обладнання для пожежогасіння.

3. Дисперсію отримують шляхом диспергування подрібненого сухого полімеру, який набухає у воді, у рослинній

олії, необов'язково з відповідними поверхнево-активними речовинами та стабілізуючими речовинами (якщо це необхідно або бажано).

4. Переважно, дисперсія являє собою сухий зшитий полімер щонайменше одного гідрофільного мономеру, диспергованого в рослинній олії. Як правило, полімер є сополімером акриламідів та похідних акрилової кислоти (наприклад, акрилатної солі). Добавка поєднує в собі властивості супер абсорбуючого полімеру, оскільки він може поглинати значну кількість води в порівнянні зі своїм розміром і вагою, і загусника, оскільки отримана суміш має відносно високу в'язкість. Полімерні частинки що використовуються, зазвичай повинні мати приблизно однакові розміри, для легшого контролю процесу набухання. Використовуватися можуть полімерні частинки розміром від приблизно 10 мікрон до приблизно 200 мікрон.

5. Додавання солей лужних металів негативно впливає на стійкість та кратність піни що утворюється. Застосування солей має сенс при використанні їх у водному розчині для гасіння пожежі, ефективність такого застосування підтверджено у [2].

6. Додавання до розчину суспензуючого агенту (діоксид

кремнію – SiO_2) та поверхнево-активної речовини з низьким ГЛБ (сорбітанмоноолеату – Span-80) практично не впливають на характеристики піни;

7. Натрієва сіль карбоксиметилцелюлози навіть у малих кількостях суттєво впливає на підвищення

стійкості піни при одночасному зменшенні її кратності.

8. Концентрати для гасіння пожеж класу А доцільно створювати на водному розчині та розчині піноутворювача, концентрати ж для гасіння пожеж класу В - на розчині піноутворювача.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі : навчальний посібник. Харків, 2004. 252 с.
2. Звіт про науково-дослідну роботу (заключний) : Наукове обґрунтування підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок модифікації складів водних вогнегасних речовин та способів їх подавання / Кодрик А.І., Тітенко О.М., Борисов А.В., Мороз А.І. К. : ІДУ НД ЦЗ ДСНС України, 2021. 239 с. № ДР 0121U108447.
3. Fire protection agent and fire extinguishing agent for fires of solid materials / Freddy Kai Klaffmo, Bert Johnny Nilson, Britt Ann-Christine Langselius, pat. WO 2014 115038A2, C09D5 / 18, filed 22.01.2013, date of Patent 30.10.2014.
4. Kodrik A., Titenko, O., Zhartovskyi S., Borisov A. Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*. 2022. Vol. 927. P. 87–104.
5. Kodrik A.I., Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Titenko O.M., Parkhomchuk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54), P. 29–35.
6. A fire retardant and a method for production thereof flammeschutzmittel und dessen herstellung agent ignifuge et procede de fabrication / Nilsson Jens Birger, Glenelg North, pat. EP 1546 286 B1, C09K 21/04 (2006.01) C09K 21/06 (2006.01), A62D 1/00 (2006.01) A62D 1/06 (2006.01), filed 7.08.2002, date of Patent 29.06.2005.
7. 界面活性剤系組成物 (Surfactant Composition) / 大庭啓彦 (OHBA, Yoshihiko), 岩本真司 (IWAMOTO, Shinji), 光宗将太 (MITSUMUNE, Shota), 小林正隆 (KOBAYASHI, Masataka), 鶴仁 (TSURU, Hitoshi), 波多江修一 (HATAE, Shuuichi), 上江洲一也 (UEZU, Kazuya), 山家桂一 (YAMAGA, Keiichi), 永友義夫 (NAGATOMO, Yoshio), 梅木久夫 (UMEKI, Hisao), pat. WO 2006/028233 A1, filed 05.09.2005, date of Patent 16.03.2005.
8. Sortwell Methods of preventing and/or extinguishing fires / Edwin T., pat. US 7,189,337 B2 US20050045849A1, date of Patent 13.03.2007.
9. 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.
10. High-stability foams for long-term suppression of hydrocarbon vapors / Sophany Thach, Kenneth C. Miller, Karen S. Schultz, pat. US 5296164, МПК A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00; B01J 019/16, filed 2.07.1992, date of Patent 22.03.1994.
11. Foam concentrate / Louis R. DiMaio, Peter J. Chiesa, Jr., pat.US 5225095, A01N 25/16 (20060101); A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00, filed 2.08.1991, date of Patent 6.07.1993.
12. Fire mitigation and moderating agents / Edmund R. J. Pennartz, pat. US 8080186 США, МПК A62D 1/00 (20060101); C09K 21/04 (20060101); C09K 21/08 (20060101); C09K 21/06 (20060101), filed 16.11.2010, date of Patent 20.12.2011.
13. Flame retardant and fire extinguishing product for fires in solid materials / Brytt Ann-Krystyn Lanhseylus, Freddy Kai Klaffmo, pat. US 9 586 070 SShA, МПК A62D 1/00 (20060101); C09D 5/18 (20060101); C09K 21/12 (20060101); C09K 21/10 (20060101); C08L 27/12 (20060101); C09K 21/04 (20060101), filed 22.06.2015, date of Patent 7.03.2017.
14. 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*. Vol. 438. 2025. Pp.123–130.

REFERENCES

1. Tarakhno O. V., Sharshanov A. Ya. (2004). Fizyko-khimichni osnovy vykorystannia vody v pozhezhnii spravi [Physico-chemical basics of water use in firefighting]. Kharkiv [in Ukrainian].
2. Kodryk A.I., Titenko O.M., Borysov A.V., Moroz A.I. (2021). Zvit pro naukovo-doslidnu robotu (zakliuchnyi): Naukove obgruntuvannia pidvyshchennia efektyvnosti hasinnia pozhezh za rakhunok modyfikatsii skladiv vodnykh vohnehasnykh rehovyn ta sposobiv yikh podavannia [Research report (final): Scientific justification for increasing the efficiency of fire extinguishing by modifying the compositions of aqueous fire extinguishing agents and methods of their application] K: IDU ND TsZ DSNS Ukrainy, № DR 0121U108447 [in Ukrainian].
3. Fire protection agent and fire extinguishing agent for fires of solid materials / Freddy Kai Klaffmo, Bert Johnny Nilson, Britt Ann-Christine Langselius, pat. WO 2014 115038A2, C09D5 / 18, filed 22.01.2013, date of Patent 30.10.2014 [in English].
4. Kodrik A., Titenko, O., Zhartovskyi S., Borisov A. (2022). Theoretical Prerequisites for Creating a Fire-Extinguishing Solution Based on Water-Absorbing Polymer Ecoflocf-07 for Extinguishing Fires in Ecosystems. *Key Engineering Materials*, 927, 87–104 [in English].

5. Kodrik A.I., Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Titenko O.M., Parkhomchuk O.V. (2020). Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*, 4/3(54), 29–35 [in English].
6. A fire retardant and a method for production thereof flammenschutzmittel und dessen herstellung agent ignifuge et procede de fabrication / Nilsson Jens Birger, Glenelg North, pat. EP 1546 286 B1, C09K 21/04 (2006.01) C09K 21/06 (2006.01), A62D 1/00 (2006.01) A62D 1/06 (2006.01), filed 7.08.2002, date of Patent 29.06.2005 [in English].
7. 界面活性剤系組成物 (Surfactant Composition) / 大庭啓彦 (OHBA, Yoshihiko), 岩本真司 (IWAMOTO, Shinji), 光宗将太 (MITSUMUNE, Shota), 小林正隆 (KOBAYASHI, Masataka), 鶴仁 (TSURU, Hitoshi), 波多江修一 (HATAE, Shuuichi), 上江洲一也 (UEZU, Kazuya), 山家桂一 (YAMAGA, Keiichi), 永友義夫 (NAGATOMO, Yoshio), 梅木久夫 (UMEKI, Hisao), pat. WO 2006/028233 A1, filed 05.09.2005, date of Patent 16.03.2005 [in English].
8. Sortwell Methods of preventing and/or extinguishing fires / Edwin T., pat. US 7,189,337 B2 US20050045849A1, date of Patent 13.03.2007 [in English].
9. Kodryk A.I., Vynohradov S.A., Titenko O.M., Shakhov S.M. (2019). Vplyv kratnosti kompresii noi pini na dyspersnist i stiikist [The effect of compression foam multiplicity on dispersion and stability]. *Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 45, 27–43 [in Ukrainian].
10. High-stability foams for long-term suppression of hydrocarbon vapors / Sophany Thach, Kenneth C. Miller, Karen S. Schultz, pat. US 5296164, MIIK A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00; B01J 019/16, filed 2.07.1992, date of Patent 22.03.1994 [in English].
11. Foam concentrate / Louis R. DiMaio, Peter J. Chiesa, Jr., pat. US 5225095, A01N 25/16 (20060101); A62D 1/02 (20060101); A62D 1/00 (20060101); A62D 3/00 (20060101); B01J 013/00, filed 2.08.1991, date of Patent 6.07.1993 [in English].
12. Fire mitigation and moderating agents / Edmund R. J. Pennartz, pat. US 8080186 CIIA, MIIK A62D 1/00 (20060101); C09K 21/04 (20060101); C09K 21/08 (20060101); C09K 21/06 (20060101), filed 16.11.2010, date of Patent 20.12.2011 [in English].
13. Flame retardant and fire extinguishing product for fires in solid materials / Brytt Ann-Krystyn Lanhseylus, Freddy Kai Klaffmo, pat. US 9 586 070 SShA, MPK A62D 1/00 (20060101); C09D 5/18 (20060101); C09K 21/12 (20060101); C09K 21/10 (20060101); C08L 27/12 (20060101); C09K 21/04 (20060101), filed 22.06.2015, date of Patent 7.03.2017 [in English].
14. Stylyk I., Kodrik A., Titenko O., Zhartovskyi S. (2025). The possibilities of using a fire extinguishing substance based on water-soluble polymer for extinguishing solid combustible materials. *Defect and Diffusion Forum*, 438, 123–130 [in English].

INVESTIGATION OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF WATER-BASED FIRE EXTINGUISHING AGENTS BASED ON POLYACRYLATE POLYMERS

I. Stylyk¹, R. Ponomarenko¹, A. Kodryk¹, A. Borysov², O. Titenko¹, O. Dobrostan¹

¹*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

²*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

KEYWORDS:

polymer hydrogels, solution viscosity, modified systems, fire extinguishing efficiency, water-based agents, fire spread limitation, fire protection, formulation design, fire resistance, mathematical modeling, suppression effectiveness, experimental methodology, fire safety, fire-retardant performance, environmental compatibility, flame propagation.

ABSTRACT

This study aims to investigate changes in the properties of water-based fire extinguishing solutions and to enhance fire suppression efficiency through the application of modified agents with improved fire-extinguishing performance. The research serves as a basis for improving the quality indicators of existing solutions and for developing new formulations using advanced gel-forming compounds. These agents are intended for use in fire protection systems and in active firefighting applications to increase overall extinguishing effectiveness. The proposed approach involves the preliminary formulation of stabilized liquid concentrates containing gel-forming compounds, which are subsequently diluted in water or, optionally, in foam-forming agents. The study focuses on assessing the impact of various additives on the physicochemical, mechanical, and operational properties of the resulting fire extinguishing solutions. A comprehensive analysis of the current state and development trends in fire extinguishing agents and their application technologies, both internationally and domestically, is presented. Potential directions for formulation optimization and improvements in extinguishing efficiency are identified, with special emphasis on the influence of component selection on physicochemical properties, cost-efficiency, and environmental safety. Compared to water, modified fire extinguishing solutions offer several advantages, including increased stability, enhanced adhesion to combustible surfaces, and the formation of a porous or film-like protective layer. These features contribute to improved cooling, inhibition of flame propagation, and thermal insulation, thereby limiting oxygen access and increasing the overall fire resistance of treated materials. Such properties are particularly critical for the suppression of surface fires. Based on literature review and the authors' theoretical and experimental findings, this work outlines strategies for improving fire extinguishing formulations, application technologies, and the development of corresponding regulatory, educational, and reference frameworks.