

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет технологій і дизайну

Кафедра хімії та хімічної інженерії

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Дослідження впливу піноутворювачів на фізико-хімічні і функціональні властивості дисперсних систем для пожежогасіння

Галузь знань 16 – «Хімічна та біоінженерія»

Спеціальність 161 – «Хімічні технології та інженерія»

Освітня програма – «Хімічна технологія та інженерія»

ДРХТІ.2018023.22.10.00

Виконала: здобувачка 2 курсу

Анастасія ХЕЛЕНЮК

група ХТІм-22-1

15.12.2023

Керівник: доктор техн. наук, професор

Ольга ПАРАСКА

15.12.2023

Нормоконтролер

Олександр СТРЕМЕЦЬКИЙ

18.12.2023

До захисту допускаю:

Ольга ПАРАСКА

Зав. кафедри хімії та хімічної інженерії

20.12.2023 р

Хмельницький, 2023

## ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Технологій і дизайну  
Кафедра Хімії та хімічної інженерії  
Освітній рівень Магістр  
Галузь знань 16 Хімічна та біоінженерія  
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія  
Спеціалізація Хімічні технології та інженерія  
Освітня програма Хімічна технологія та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
д.т.н., проф. Ольга ПАРАСКА

15 серпня 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Хеленюк Анастасії Олександрівни

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи Дослідження впливу піноутворювачів на фізико-хімічні і функціональні властивості дисперсних систем для пожежогасіння.

Керівник роботи д. т. н., проф. Параска Ольга Анатоліївна

Прізвище, ім'я, по батькові

Затверджено наказом ректора університету від 15 серпня 2023 р. № 30

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 20 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Звіт з переддипломної практики. Методичні рекомендації щодо підготовки та виконання кваліфікаційної роботи магістра студентами спеціальностей 102 «Хімія» і 161 «Хімічні технології та інженерія». Стандарти ХНУ Текстові документи. Загальні вимоги СОУ 201.01:2017, СОУ 202.02:2017.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Особливості застосування, сучасні вимоги до дисперсних систем для пожежогасіння. Аналіз компонентів дисперсних систем для пожежогасіння. Вплив піноутворювачів на властивості дисперсних систем для пожежогасіння.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) 11 слайдів програми презентації Power Point

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему: Дослідження впливу піноутворювачів на фізико-хімічні і функціональні властивості дисперсних систем для пожежогасіння.

Автор роботи – здобувач гр. ХТІм –22–1

Анастасія ХЕЛЕНЮК

Керівник роботи – д. т. н, професор

Ольга ПАРАСКА

Обсяг кваліфікаційної роботи 77 сторінок, 9 таблиць, 8 рисунків, 32 джерел посилань, графічної частини 11 слайдів виконаних у програмі презентації.

Ключові слова: ПНИ, ПІНОУТВОРЮВАЧІ, ДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ, ПОЖЕЖОГАСІННЯ, КРАТНІСТЬ.

Мета роботи: оцінка впливу піноутворювачів на властивості дисперсних систем для пожежогасіння. Об'єкт дослідження – процес піноутворення. Предмет дослідження – властивості дисперсних систем.

Розглянуто особливості застосування дисперсних систем для пожежогасіння. Проаналізовано властивості EXOsoft PO30, ROSULfan D, ROKAmer G3800, SULFOROKAnol A325/1, ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROKAnol L5P5 MB, виробництва PCC Group (Польща). Визначено фізико-хімічні, реологічні, функціональні, екологічні властивості дисперсних систем, а саме піноутворювальну здатність, рН, густину, в'язкість, кратність, проведено біотестування.

Рекомендовано ефективні піноутворювачі ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROSULfan D для створення дисперсних систем середньої кратності.

Здобувачка групи ХТІм –22–1

Анастасія ХЕЛЕНЮК

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК.....	6
ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ..	10
1.1 Розвиток систем пожежогасіння в світі.....	10
1.2 Основні вимоги до використання дисперсних систем в пожежогасінні.....	15
1.3 Склад та структурна будова дисперсних пожеж для пожежогасіння .....	20
2 ОБ'ЄКТИ, ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	26
2.1 Характеристика об'єктів дослідження.....	26
2.2 Визначення піноутворювальних властивостей дисперсних систем.....	27
2.3 Визначення концентрації водневих іонів рН дисперсних систем	30
2.4 Визначення кратності дисперсних систем .....	32
2.5 Методика визначення реологічних властивостей дисперсних систем .....	32
2.6 Біотестування дисперсних систем.....	35
2.7 Обробка експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики.....	36
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ.....	38
3.1 Характеристики ПАР для пожежогасіння.....	38
3.2 Структурутворення в дисперсних системах.....	48
3.3 Дослідження піноутворювальних властивостей піноутворювачів	56
3.4 Аналіз водневого показника рН дисперсних систем .....	60
3.5 Дослідження реологічних властивостей піноутворювачів .....	61

	5
3.6 Аналіз кратності піноутворювачів.....	65
3.7 Екологічні аспекти застосування піноутворювачів .....	69
ВИСНОВКИ.....	71
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	74

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК

ПАР – поверхнево-активна речовина;

АПАР – аніоноактивна поверхнево-активна речовина;

КПАР – катіоноактивна поверхнево-активна речовина;

НПАР – неіоногенна поверхнево-активна речовина;

ЄС – європейський союз;

$H_0$  – висота стовпа піни розчинів;

Сп – стійкість піни розчинів екоПАР.

ГЛБ – гдрофільно-ліпофільний баланс;

ККМ – критична концентрація міцелоутворення.

## ВСТУП

Наслідки пожеж завжди призводять до серйозних втрат, які включають в себе людські, матеріальні, екологічні ресурси. За даними підрозділів територіальних органів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) упродовж 11 місяців 2023 року в Україні зареєстровано 64 727 пожеж [1, 2]. Щодня в Україні, в середньому, виникало 193 пожежі, матеріальні втрати від яких склали 234 млн 921 тис. гривень. Кожного дня внаслідок пожеж гинули 3 людей і 4 людей отримували травми, вогнем знищувались або пошкоджувались 79 будівель (споруд) і 16 одиниць техніки. Прямі збитки від однієї пожежі становили 338 тис. гривень.

На розподіл кількості пожеж суттєво впливає інтенсивність бойових дій у межах окремих регіонів України, їх часткова окупація російськими збройними формуваннями, а також переміщення населення та промислових потужностей зі східних регіонів на захід країни. Тому надзвичайно важливе виконання заходів щодо мінімізації пожеж та їх наслідків.

Протипожежні заходи – це комплексні заходи та стратегії, спрямовані на запобігання виникненню пожежі та мінімізацію її наслідків. Ці заходи включають в себе різні аспекти безпеки та гасіння пожежі. Вони можуть бути адаптовані відповідно до конкретних умов та вимог, які характерні для конкретного об'єкта чи регіону. Правильна реалізація протипожежних заходів грає ключову роль у забезпеченні безпеки приміщень та захисту людей від пожеж [3-5]. Важливе значення при реалізації комплексу протипожежних заходів має використання дисперсних систем автоматичного пожежогасіння та спінювання.

Дисперсні системи для пожежогасіння – це системи, які використовують рідини чи гази, розпилені у вигляді дисперсії, для гасіння пожеж. Ці системи можуть бути використані для гасіння пожеж у різних типах об'єктів, таких як промислові приміщення, офіси, лабораторії, тунелі та інші [6, 7].

Для створення піни з води або іншого розчину для гасіння різних типів

пожеж використовують піноутворювачі. Піноутворювачі відіграють важливу роль у протипожежних заходах, включаючи наступне: гасіння пожежі, пригнічення пожежі, створення бар'єру для попередження розповсюдження пожежі, охолодження. Крім того, піноутворювачі використовують в широкому спектрі сфер, включаючи промислові об'єкти, транспортні засоби, електростанції, тунелі, аеропорти та інші місця, де необхідно ефективно та швидко пожежогасіння.

Піноутворювачі використовуються у спінювальних системах, системах вогнегасіння, а також у пожежних авто та інших засобах транспорту для боротьби з пожежами [8, 9]. Тому важливо вибирати піноутворювачі відповідно до типу пожежі, характеристик об'єкта та конкретних умов експлуатації для максимальної ефективності пожежогасіння.

Залежно від властивостей дисперсних систем для пожежогасіння, їх призначення, піноутворювачі мають відповідати певним вимогам [10]:

- ефективність гасіння;
- стабільність дисперсних систем (піни);
- диспергувальна здатність;
- охолодження;
- екологічна безпека;
- сумісність з системами розпилення;
- стійкість до агресивних середовищ;
- ефективність використання та легкість зберігання;
- доступна вартість.

Врахування цих вимог потребує комплексного підходу до вибору піноутворювачів, які найкращим чином відповідають конкретним умовам та потребам систем протипожежного захисту. Тому дослідження кваліфікаційної роботи є актуальними відповідно до сучасних вимог. Мета роботи – оцінка впливу піноутворювачів на властивості дисперсних систем для пожежогасіння. Об'єкт дослідження – процес піноутворення. Предмет дослідження – властивості дисперсних систем.

Результати дослідження можуть використовуватися як теоретичні засади створення дисперсних систем для пожежогасіння з заданими функціональними властивостями, так і практичні рекомендації ефективності застосування піноутворювачів в системах протипожежного захисту.

Склад піноутворювачів може варіюватися в залежності від конкретного виробника та типу піноутворювача [8, 11]. Однак основні компоненти піноутворювачів включають в себе різні хімічні речовини, які реагують з водою чи повітрям для утворення піни. Це поверхнево-активні речовини (ПАР), розчинники, реагенти для збільшення стійкості дисперсних систем, реагенти для покращення охолодження, антифризи, регулятори рН, інші добавки.

Слід зазначити, що дисперсні системи для пожежогасіння розробляються з урахуванням фізико-хімічних та функціональних властивостей, а також вимог до пожежогасіння та специфікацій конкретних систем протипожежного захисту. Підбір складу піноутворювача визначається характеристиками пожежі, типом об'єкта та умовами його експлуатації.

В даний час дисперсні системи для пожежогасіння використовуються в різних галузях і забезпечують ефективний захист від пожежі в різних умовах експлуатації [1, 3]. Застосування ефективних піноутворювачів, які надають комплекс фізико-хімічних і функціональних властивостей дисперсним системам дозволить покращити швидкість ліквідації пожеж, безпеку процесу, техніко-економічні показники протипожежних заходів.

# 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

## 1.1 Розвиток систем пожежогасіння в світі

За даними світової статистики у 2022 році глобальний ринок систем пожежогасіння оцінювався в 20,27 мільярда доларів США, і очікується, що він буде зростати на 4,8 % за прогнозований період [12]. За оцінками експертів, зростання ринку зумовлене зростаючою важливістю дотримання правил пожежної безпеки у висотних будівлях, промислових приміщеннях і комерційних секторах. Пандемія COVID-19 змінила загальний бізнес-сценарій на 2020 рік, а також на кілька наступних років у різних вертикалях. Однак через зростання кількості випадків пожежі та занепокоєння щодо безпеки серед людей очікується значне зростання галузі протягом прогнозованого періоду. Світовий прогноз застосування протипожежних систем та заходів наведено на рисунку 1.1.

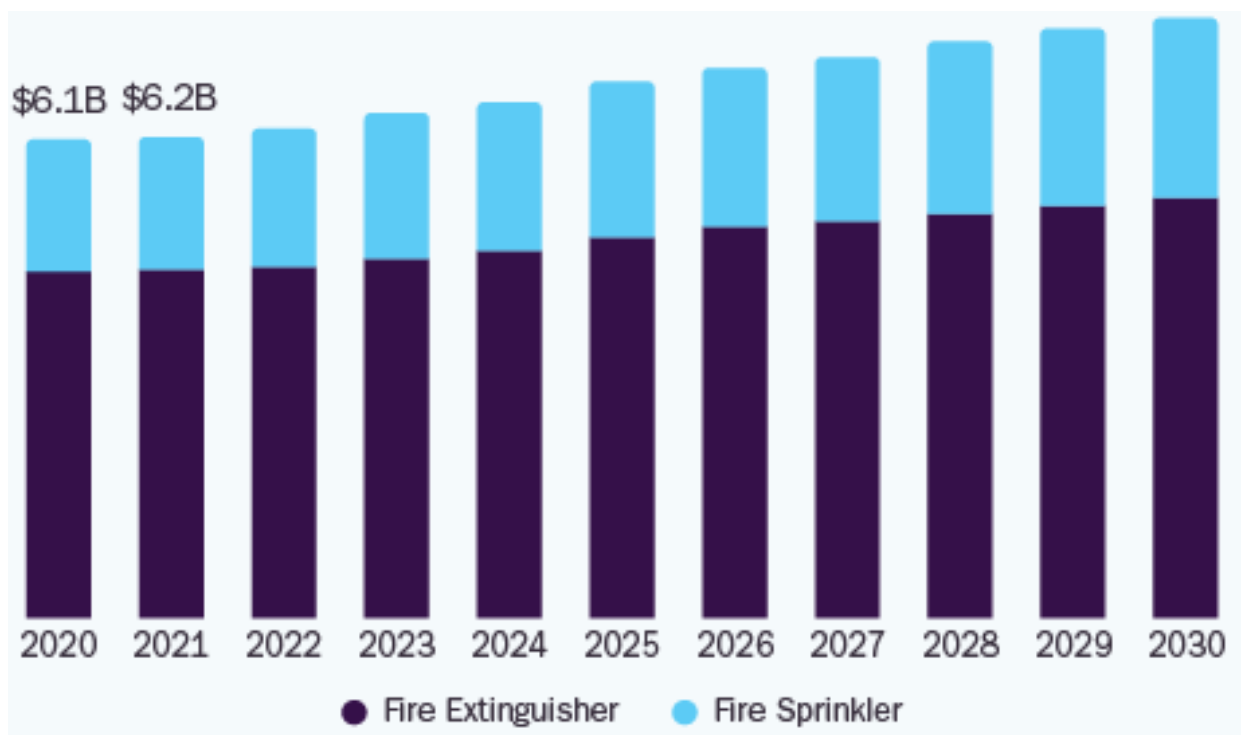


Рисунок 1.1 – Світовий прогноз застосування протипожежних систем та заходів на період з 2020 по 2023 роки

За даними рисунку 1.1. прогнозується, що попит на системи та обладнання для гасіння пожеж, особливо у промисловості зростатиме, оскільки, такі сектори як енергетика, виробництво нафтопродуктів, передбачають високий ризик пожежі. Це пояснюється тим, що у промислових процесах широко використовуються легкозаймісті матеріали: сира нафта, вугілля, нафтопродукти, розчинники та ін. Зростаюча увага споживачів, урядових організацій до покращення загальних стандартів протипожежної безпеки будівель регіону, також сприятимуть підвищенню попиту на дисперсні системи для пожежогасіння. Крім того, зростання будівництва, вимог до будівельної діяльності, а також значний акцент на модернізацію протипожежних систем, сприятимуть розширенню ринку.

З метою безпеки та контролю систем протипожежних заходів в Україні та світі розробляються норми, правила та рекомендації щодо встановлення та обслуговування систем пожежогасіння [3, 4, 13]. Також визначаються правила, які мають бути виконані для певних типів систем пожежогасіння. Очікується, що зростаюча кількість великомасштабних інвестиційних проектів у розвиток інфраструктури, таких як лікарні та готелі, сприятиме розвитку будівельної індустрії, таким чином стимулюючи попит на системи протипожежних заходів.

Найбільша частка світового доходу у 2022 році, понад 57,95 % займає сегмент вогнегасників. Вогнегасники широко використовуються для гасіння або боротьби з невеликими пожежами за допомогою вогнегасної речовини. Системи пожежогасіння можуть запропонувати захист у разі спалаху пожежі без шкоди чи пошкодження цінних активів, документів чи обладнання. Очікується, що суворі правила безпеки та впровадження правил пожежної безпеки в усьому світі прискорять зростання сегмента протягом прогнозованого періоду. Запровадження нових або переглянутих правил, ймовірно, збільшить кількість встановлення стаціонарних або портативних систем пожежогасіння.

Наприклад, у травні 2022 року запроваджено нові обов'язки про пожежну безпеку для власників будинків, щоб покращити протипожежний захист

багатоквартирних будинків економічно ефективними та практичними способами для окремих власників.

Встановлення протипожежних автоматичних систем стрімко зростає в усьому світі завдяки суворим протоколам безпеки для висотних будівель. Наприклад, у виданні 2021 року NFPA 101, зазначено, що всі нові багатоповерхові будинки повинні мати автоматичні системи протипожежного захисту, а вже побудовані багатоповерхові будинки повинні встановити такі системи протягом 12 років.

Очікується, що це посилить зростання ринку протягом прогнозованого періоду. Очікується, що сегмент автоматичних системи протипожежного захисту стабільно зростатиме.

Автоматичні системи протипожежного захисту – це активна система, що складається зі спринклера, системи розподілу та водопостачання. Ці системи були визнані ефективними засобами для захисту життя, а також майна.

Установки автоматичного пожежогасіння є одним із найбільш ефективних засобів ліквідації джерел загоряння і задимлення на самих ранніх стадіях. Функціями установки є виявлення області загоряння, її локалізація і припинення, запобігання поширенню вогню та захист майна, людського здоров'я і життя від газоподібних продуктів горіння, вогню і високої температури.

Технічні характеристики установок автоматичного пожежогасіння, їх комплектність і кошторисна вартість встановлюються індивідуально для кожного об'єкта нерухомості в залежності від її типу, кількості квадратних метрів площі, поверховості, планування, ймовірності виникнення вогнищ горіння і інших чинників. Системи автоматичного пожежогасіння залежно від характеру активних компонентів та засобів діляться на: водні, пінні, газові, порошкові, аерозольні, комбіновані .

Порошкові системи пожежогасіння були лідерами галузі у 2022 році, на них припадала найбільша частка – понад 37,15 % світового доходу [12, 14, 15]. Зростання попиту вогнегасники із сухим хімічним порошком обумовлено зростанням обізнаності кінцевих споживачів про їх переваги. Здатність гасіння

різних видів пожеж, легке зберігання без потреби в обладнанні під тиском сприятиме зростання популярності таких вогнегасників серед споживачів. Система газового вогнегасника складається з газу CO<sub>2</sub> під тиском у герметичній ємності. Вивільнений CO<sub>2</sub> припиняє вогонь, обмежуючи контакт кисню. Використання CO<sub>2</sub> не залишає залишків, а також не завдає шкоди електричним пристроям чи обладнанню. У більшості випадків вогнегасники з CO<sub>2</sub> використовуються для локалізації вогню, пов'язаного з горінням рідини та електроприладами.

Для комерційних приміщень, промислових об'єктів, найбільш ефективними є водні та пінні системи. Очікується, що даний сегмент стабільно зростатиме протягом прогнозованого періоду. Технологічний розвиток водяних та пінних вогнегасників сприятиме зростанню сегменту протягом прогнозованого періоду. Однією з таких систем є системи водяного туману, яка оптимізує використання водних розчинів та розподіляє воду у формі туману. Пінний вогнегасник працює, покриваючи полум'я товстим шаром піни, яка обмежує подачу кисню для горіння і гасить пожежу. Хімікати, які зазвичай використовуються в пінному вогнегаснику, включають натрію бікарбонат, калію бікарбонат, моноамоній фосфат і калію хлорид.

Безумовно, лідерами світового доходу (49,10 %) в 2022 році залишаються промислові системи автоматичного пожежогасіння, які використовуються на виробничих потужностях, складах і складських будівлях, центрах розміщення даних тощо. Очікується, що постійне оновлення норм протипожежної безпеки в усьому світі значно сприятиме глобальному попиту на такі системи пожежогасіння.

Крім того постійно удосконалюються техніко-економічні, екологічні вимоги до автоматичних систем для пожежогасіння. Наприклад, запроваджено нормативні документи про створення можливостей для виробництва економічно вигідних та безпечних технологій пожежогасіння. Ця світова тенденція буде розвиватися зі стабільним зростанням протягом прогнозованого періоду. За рахунок обізнаності, впливу сучасних систем пожежогасіння для здоров'я людей

та навколишнє середовище.

Прогнозується, що європейська економіка стабільно розвиватиметься завдяки ініціативам підтримки, таким як Європейська зелена угода та програма уряду Horizon 2020, зростання заробітної плати та постійне створення робочих місць. За оцінками, державні витрати, особливо на цифрову інфраструктуру та транспортну інфраструктуру, мають позитивний вплив на загальний економічний розвиток регіону. Крім того, зростаючий попит на інтелектуальні системи домашньої автоматизації та розумні будівлі, які забезпечують оптимальну безпеку також сприятимуть активному використанню автоматичних систем пожежогасіння.

До ключових світових компаній входять як глобальні, так і регіональних корпорації. Виробники впроваджують різноманітні стратегії розробки нових дисперсних систем для пожежогасіння, щоб отримати більшу частку галузі. Наприклад, у грудні 2022 року Fike Corp. представила Fike Small Space Suppression. У цій інноваційній техніці використовується гнучка пневматична трубка, яка стратегічно розміщується в невеликих приміщеннях для локалізації та гасіння пожеж за допомогою протипожежної рідини 3MTM Novec™ 1230. Найбільшими виробниками систем пожежогасіння в світі є: Gentex Corp, Halma PLC, Hochiki America Corp, Honeywell International Inc., Robert Bosch GmbH, Siemens AG, Minimax USA LLC, Fike Corp

Таким чином, в світі надається значна увага притипожежним системам та засобам. З точки зору хімічної технології, пожежа це неконтрольоване горіння, яке спричиняє вибухи, паління матеріалів та створює небезпеку для життя і майна. Це природне або штучне явище, яке охоплює процес окислення, виділення тепла, світла і густого диму, і може поширюватися швидко, завдаючи серйозних руйнувань і шкоди [1, 5]. Для ліквідації пожеж в системах для пожежогасіння активно використовують дисперсні системи – вогнегасні речовини, які гасять легкозаймисту або горючу рідину шляхом охолодження та відділення джерела займання від поверхні. Слід зазначити, що дисперсна система (піна) пригнічує і гасить вогонь і випари, що запобігає повторному

займанню.

Дисперсні системи пожежогасіння забезпечують високоефективний і надійний захист, коли систем на основі води недостатньо. Незалежно від того, чи це легкозаймісті матеріали, центри обробки даних, фармацевтичні, промислові, комерційні, військові об'єкти, дисперсні системи найкраще підходять для протипожежного захисту. Тому вимоги до їх виробництва, властивостей, особливостей застосування потребують точності, інноваційних рішень, щоб відповідати галузевим стандартам, забезпечувати захист життя і майна споживачів.

## 1.2 Основні вимоги до використання дисперсних систем в пожежогасінні

В даний час існують різні типи дисперсних систем для пожежогасіння, включаючи [3, 10]:

- Системи розпилення води. Водяні системи розпилення створюють туман води мікророзміром, що має властивість швидкого поглиблення в об'ємі газу пожежі і охолодження навколишнього середовища, що призводить до пригнічення пожежі.
- Системи газового пожежогасіння. Ці системи використовують гази, такі як галони, карбону діоксид, аргон і інші, щоб витіснити кисень з області пожежі та здійснити гасіння. Гази використовують також для охолодження пожежі та запобігання її подальшому поширенню.
- Пінні системи – використовують піну для гасіння пожеж. Піна формує бар'єр, який запобігає доступу кисню до джерела пожежі, охолоджує поверхні та пригнічує вогонь.
- Системи сухого туману. Ці системи розпилюють воду або інші рідини в дуже маленьких краплях, створюючи так званий "сухий туман". Цей метод може бути використаний для гасіння пожежі та охолодження оточуючого повітря.

Вибір конкретної системи залежить від типу об'єкта, виду пожежі та конкретних вимог безпеки.

Системи піногасіння використовуються для охолодження вогню та покриття палива, яке споживає вогонь, щоб запобігти контакту з киснем і зменшити здатність до горіння. Піна, коли розсіюється, заглушає або покриває поверхню палива. Потім вода, що міститься в піні, охолоджує паливо та ділянку піни, що покриває паливо, щоб запобігти повторному займанню через легкозаймисті пари. Піноутворювач складається з маленьких наповнених повітрям бульбашок, які мають меншу щільність, ніж вода. Піна складається з води, пінного концентрату та повітря. У різних виробників є свої пінні розчини і концентрат. Співвідношення піни до води залежить від застосування [8, 9, 11].

Вимоги до компонентів систем пінного пожежогасіння в Україні регламентовано рядом нормативних документів, наведемо основні з них [17-21]:

- ДСТУ EN 1568-1:2018 (EN 1568-1:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 1. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною середньої кратності, що подається на поверхню.

- ДСТУ EN 1568-2:2018 (EN 1568-2:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 2. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною високої кратності, що подається на поверхню.

- ДСТУ EN 1568-3:2018 (EN 1568-3:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.

- ДСТУ EN 1568-4:2018 (EN 1568-4:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.

- ДСТУ 8615:2016 Пожежна безпека. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Настанови щодо поводження з вогнегасними речовинами, використовуваними у стаціонарних системах пінного пожежогасіння.

Аналізуючи джерела [4, 17-21], можна виділити основні вимоги, які висуваються до дисперсних систем для пожежогасіння. А саме:

- Піноутворювачі повинні бути ефективними для загасання різних типів пожеж, включаючи тверді матеріали, рідини та гази (ефективність гасіння).

- Піноутворювачі повинні утримувати стабільну піну, яка зберігає свої властивості протягом тривалого періоду часу для надійного пригнічення пожежі (стабільність піни).

- Піноутворювачі повинні мати здатність розподілятися рівномірно та швидко на пожежному об'єкті для максимального покриття (диспергувальна здатність).

- Властивості охолодження піноутворювачів важливі для зниження температури об'єктів та середовища навколо пожежі (охолоджувальна дія).

- Піноутворювачі повинні бути безпечними для здоров'я людей та екологічно безпечними, щоб не завдавати шкоди навколишньому середовищу (екологічна безпека, нетоксичність).

- Піноутворювачі повинні бути сумісними з матеріалами та компонентами систем розпилення, які використовуються для їхньої подачі (сумісність з системами розпилення).

- Піноутворювачі, які використовують у важких умовах (хімічні об'єкти або високі температури), повинні бути стійкими до агресивних середовищ (стійкість до агресивних середовищ).

- Піноутворювачі повинні бути легкими для використання та зберігання, забезпечуючи просту обробку та дозування (легкість використання та зберігання).

- Ефективні піноутворювачі повинні бути доступними та економічно вигідними для застосування в різних галузях (доступність та економічність).

Отже, ефективні дисперсні системи для пожежогасіння повинні

відповідати ряду вимог. При цьому, не завжди вдається поєднувати в рецептурах виконання одночасно всіх вимог нормативної документації.

В Україні найбільш розповсюдженою вогнегасною речовиною є вода, що подається у вигляді компактних чи розпилених струменів. Разом з тим, деякі властивості води ускладнюють або унеможливають її застосування для гасіння певних горючих рідин і твердих горючих матеріалів.

Тому для цілей пожежогасіння застосовують й інші вогнегасні речовини, зокрема піноутворювачі, з водних розчинів яких, за допомогою спеціального обладнання, генерують піну, принцип роботи яких базується на ежекції повітря струменем розчину [14].

З точки зору фізичної та колоїдної хімії піною називають плівково-коміркову структуру, що складається з водного розчину поверхнево-активних речовин і газового дисперсійного середовища, яка характеризується показниками кратності та стійкості [6, 7].

Кратністю піни це співвідношення між її об'ємом та об'ємом розчину, з якого її одержано. Стійкість піни характеризують показниками швидкості або проміжків часу до витікання з неї певної відсоткової частки рідини, витраченої на одержання піни, а також швидкістю зменшення об'єму піни або проміжками часу до його зменшення на задану величину. Чисті рідини піну не утворюють, натомість для її формування необхідна присутність молекул поверхнево-активних речовин, які здатні адсорбуватися у поверхневих шарах рідини, утворювати колоїдні міцели в її об'ємі й змінювати поверхневий натяг цієї рідини залежно від концентрації.

Поверхнево-активні речовини, які зазвичай використовують у складі піноутворювачів для гасіння пожеж, належать здебільшого до аніоноактивних, рідше – до неіоногенних речовин. Їхні молекули складаються з гідрофільної групи й гідрофобного ланцюга. Відповідно, гідрофільна частина має високу спорідненість з молекулами полярного розчинника (як правило, води), у той час як гідрофобна частина має таку спорідненість з молекулами неполярного середовища (повітря чи іншого газу). Через таку хімічну природу частина

молекул поверхнево-активної речовини, розчиненої у воді, займає усі ділянки поверхні її контактування з газовим середовищем, утворюючи щільну структуру: полярна частина молекули начебто втягується у полярний розчинник, а гідрофобні вуглеводневі ланцюги перебувають переважно у газовій фазі.

Для генерування повітряно-механічної піни, яку застосовують для цілей пожежогасіння, використовують піноутворювачі для гасіння пожеж – композиції, що складаються з поверхнево-активних речовин, функціональних добавок і води, що використовується як розчинник.

Піну низької кратності залежно від природи та призначення піноутворювача, а також особливостей пожежі, протипожежного обладнання, застосовують для гасіння пожеж поверхневим способом або подаванням у шар горючої рідини (підшарове гасіння). Піну середньої кратності застосовують переважно для гасіння пожеж поверхневим способом, а піну високої кратності – для гасіння пожеж об'ємним способом, тобто для заповнення всього простору, де сталася пожежа, піною, що забезпечує витіснення кисню, а також змочування твердих горючих матеріалів, охолодження конструкцій і, як наслідок, припинення горіння.

Сучасні піноутворювачі для гасіння пожеж виготовляють із сировини як природного, так і синтетичного походження. У їх рецептурах, відповідно, використовують синтетичні поверхнево-активні речовини, до складу молекул яких входять або не входять атоми фтору, а також поверхнево-активні речовини природного походження, що містять або не містять атоми цього елемента.

Водночас піну з високою кратністю найлегше одержати з піноутворювачів на основі синтетичних поверхнево-активних речовин, що не містять атомів фтору, до того ж, піна високої кратності, генерована з них, характеризується вищими показниками кратності та стійкості, а водні розчини таких піноутворювачів – кращими змочувальними властивостями, аніж піноутворювачі на основі фторовмісних поверхнево-активних речовин та речовин природного походження. Натомість генерування піни високої кратності зазвичай передбачає примусове змішування робочого розчину піноутворювача з

повітрям або іншим газом (азотом, карбон діоксидом, газоподібними продуктами згоряння) за допомогою генераторів піни спеціальних конструкцій. Регулюючи витрату робочого розчину піноутворювача і газоподібної речовини, можна одержати піну з бажаними показниками кратності та стійкості.

Таким чином, склад дисперсних систем для пожежогасіння визначатиме ефективність їх застосування, а також властивості піни для гасіння пожеж.

### 1.3 Склад та структурна будова дисперсних пожеж для пожежогасіння

Сучасні пінні установки пожежогасіння дозволяють створювати дисперсну систему, властивості якої відрізняються від звичайної води. Використання піноконцентрату і спеціального обладнання допомагає створити суміш із газу повітря та рідини води [12, 14]. В результаті, дисперсна система:

- має дуже низьку щільність та може бути використана для гасіння легких фракцій;
- має високу змочувальну здатність, дозволяє використовувати меншу кількість;
- може розтікатися великими ділянками ліквідації пожежі, що важливо при гасінні горючих текучих речовин на великих територіях.

Пінні системи пожежогасіння ліквідують займання, ґрунтуючись на принципі відсікання повітря від горючої речовини, адже горіння без доступу кисню не відбувається. Незалежно від конкретного типу використаної системи та різновиду концентрату гасіння пожежі відбувається за наступним алгоритмом:

- покриття плівкою або шаром вогнегасної речовини легкозаймистих речовин, сповільнюючи горіння;
- охолодження речовин і резервуарів за рахунок води, що міститься в повітряно-механічній піні;
- запобігання змішування з повітрям горючих парів, що вкрай важливо при гасінні хімічних сполук.

Більшість піноутворювачів в дисперсних системах для пожежогасіння створюють піну, що відсікає джерело горіння від повітря та перешкоджає виділенню випарів.

Окрім іншого, економічну і технічну вигоду дозволяє отримати врахування основних властивостей піноутворювачів, як концентрація і кратність.

Поняття концентрації визначає кількість частин води і піни, необхідних для створення пінного розчину. Наприклад, піноутворювач afff 3 % означає, що для приготування дисперсоні системи з потрібними властивостями на 3 частини концентрату беруть 97 частин води. Застосування більш концентрованого піноутворювача дозволить зменшити його об'єм, що, у свою чергу, значно спростить транспортування, зберігання гарячого і холодного резерву для пінних систем пожежогасіння.

Кратність піни визначається фінальним об'ємом отриманої речовини по відношенню до початкового об'єму рідини (вода+піноконцентрат). За кратністю дисперсні системи бувають:

- низьократними, збільшення кінцевого об'єму менш, ніж в 20 разів;
- середньократними, 1 літр води з піноутворювачем дасть від 20 до 100 літрів піни залежно від параметрів обладнання;
- високократними, кратність вище 100.

Високократна піна придатна для об'ємного гасіння (наприклад, в авіаційних ангарах), при якому речовиною заповнюється усе приміщення. Якщо в приміщенні є горючі текучі речовини, машинне масло, паливо, то цей вид боротьби з пожежею особливо ефективний.

Високократна піна дозволяє заповнити об'єм, припиняючи горіння, охолоджуючи об'єкти, що захищаються, і поверхні, що горять, а також перешкоджаючи змішуванню легких парів з повітрям. Крім того, відпадає необхідність локалізації місця горіння.

Однак за наявності сильних сторін є деякі недоліки. Це необхідність утилізації піни після гасіння та висока вартість піноконцентрату й обладнання.

Якісні пінні концентрати є стійкими, утворюють міцну і щільну пінну. Склад піноутворювачів переважно містить активний хімічний елемент – фтор. Такі дисперсні системи після гасіння потрібно збирати та утилізувати, щоб не завдати екологічної шкоди. Відповідно, фінансові витрати збільшуються. Це також обмежує проведення тестових випробувань готових дисперсних систем для пожежогасіння.

Тому рекомендовано використання дисперсних систем, які не містять фтор і фторполімери. Такі дисперсні системи розкладаються і можуть зливатися після використання в звичайну каналізацію. Захист від пожежі за допомогою такого пінного концентрату допоможе уникнути проблем, пов'язаних з екологічністю, утилізацією, відповідно, грошовими витратами.

Використання безпечних та біорозкладних дисперсних систем для пожежогасіння має більшу вартість, ніж фторомісткі засоби. Однак, враховуючи світові тренди розвитку циркулярної економіки, сталого розвитку [23, 24], впровадження безпечних піноутворювачів зростатиме. Слід зазначити, що дешеві піноутворювачі швидко втрачають вихідні властивості дисперсної системи та мають короткий терміном придатності. Виникає необхідність замінювати увесь об'єм речовини через короткі проміжки часу. В той же час біорозкладні дисперсні системи можуть зберігатися до 20-ти років, не втрачаючи при цьому своїх фізико-хімічних та функціональних властивостей.

Основними компонентами сучасних пінних засобів для пожежогасіння, є: поверхнево-активні речовини, розчинники, реагенти для збільшення стійкості дисперсних систем, реагенти для покращення охолодження, антифризи, регулятори рН, інші добавки. Поєднання цих компонентів дозволяє створювати дисперсні системи різної кратності та стійкості для конкретних видів пожеж та середовищ. При цьому головними компонентами дисперсних систем є поверхнево-активні речовини різних класів. Наведемо коротку характеристику основних компонентів дисперсних систем для пожежогасіння.

Поверхнево-активні речовини відповідають за формування стабільної піни, допомагають знижувати поверхневий натяг води та сприяють утворенню

бульбашок піни.

Розчинники – полегшують розчинення і реагування інших компонентів дисперсних систем.

Реагенти для збільшення стійкості піни – додають для покращення стійкості піни в часі. Особливо актуально в умовах високої температури чи агресивного середовища.

Реагенти для охолодження дисперсних систем, речовини, які допомагають у відведенні тепла та охолодженні об'єкта пожежі.

Антифризи для запобігання замерзанню піни при низьких температурах.

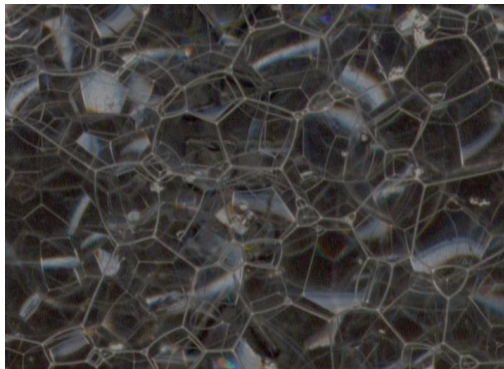
Регулятори рН для контролю та регулювання рівня рН піни, що допомагає в оптимальному функціонуванні піноутворювача.

Інші добавки, покращують властивості дисперсних систем залежно від конкретного застосування.

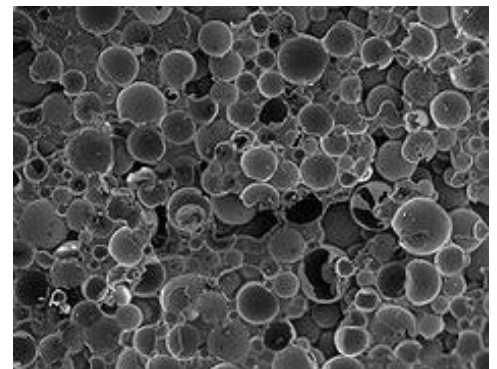
Відомо, що піни – це грубодисперсні висококонцентровані системи, в яких дисперсною фазою є бульбашки газу, а дисперсійним середовищем – рідина у вигляді тонких плівок [6, 7, 22]. Піни, на відміну від інших дисперсних систем, склад яких визначається концентрацією дисперсної фази, характеризуються змістом дисперсійного середовища. Піни є нестійкими дисперсними системами, так як щільність рідини в сотні і навіть тисячі разів перевищує щільність газу, з якого формуються бульбашки піни. Піни вважаються грубодисперсними системами: в момент піноутворення неозброєним оком видні пухирці піни. Маса і об'єм газової дисперсної фази непостійні і швидко змінюються, розміри бульбашок сильно різняться, тому піни можна вважати полідисперсними системами. Піни є типовими ліофобними дисперсними системами.

Структура пін визначається співвідношенням об'ємів газової і рідкої фаз. В залежності від цього співвідношення, комірки піни можуть мати сферичну або багатогранну (поліедричну) форму. Перехідна форма комірок від сферичної до багатогранної названа Манегольдом комірковою завдяки схожості зі структурою бджолиних сотів. Комірки піни приймають сферичну форму в тому випадку, якщо об'єм газової фази перевищує об'єм рідини не більше ніж в 20 разів. У таких

пінах плівки бульбашок мають відносно велику товщину. Чим більше відношення об'ємів газової і рідкої фаз, тим товщина плівки більша. Комірki пін, у яких це відношення складає декілька десятків і навіть сотень, розділені дуже тонкими рідкими плівками; їх комірki являють собою багатогранники. В процесі старіння куляста форма бульбашок піни перетворюється в багатогранну внаслідок стоншення плівок. Зміна форми бульбашок піни від кулястої до багатогранної відбувається досить. Стан піни з багатогранними комірками близький до рівноважного, тому такі піни володіють більшою стійкістю, ніж піни з кулястими комірками. На рисунку 1.2 представлено приклади поліендричних та сферичних дисперсних систем.



поліендрична піна



сферична піна

Рисунок 1.2 – Приклади дисперсних систем різної структури

Отже, для ефективності дисперсних систем в пожежогасіння, необхідно, щоби вони виконували наступні функції [10, 17-21]:

- гасіння та пригнічення пожежі, шляхом утворення товстого шару піни, який засмоктує та пригнічує продукти горіння;
- створення бар'єру та запобігання розповсюдження пожежі.
- охолодження – пониження температури в локалізації пожежі, зменшує ризик відновлення загоряння.

За результатами літературного огляду показано, що існують різні типи піноутворювачів. Більшість з них містять спеціальні хімічні речовини, які

взаємодіють з водою чи повітрям для утворення піни. Піноутворювачі широко використовують в системах протипожежного захисту, таких як вспінювальні системи різного типу. Вибір піноутворювача залежить від типу пожежі та конкретних умов, тому що різні пожежі можуть вимагати різних характеристик дисперсних систем.

## 2 ОБ'ЄКТИ, ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Піноутворювачі використовують для створення піни, яка може бути ефективно використана для загасання пожежі. Піна може виступати як бар'єр, який запобігає доступу кисню до джерела пожежі, і одночасно охолоджувати поверхні, зменшуючи температуру.

### 2.1 Характеристика об'єктів дослідження

Дослідження впливу піноутворювачів на властивості дисперсних систем проведено з використанням сучасних аніоноактивних та неіоногенних поверхнево-активних речовин виробництва PCC Group (Польща). Речовини обирали з урахуванням показників екологічної безпеки, функціональних властивостей для ефективного застосування в якості піноутворювачів для дисперсних систем для пожежогасіння [20]. Зокрема:

- EXOsoft PO30;
- ROSULfan D;
- ROKAmer G3800;
- SULFOROKAnol A325/1;
- ROSULfan OD;
- ROSULfan D911;
- ROKAnol L5P5 MB.

Обрані поверхнево-активні речовини відповідають критеріям біологічного розкладання, Регламенту (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів. Транспортні правила ADR/RID, ADN, IMDG, ICAO/IATA не поширюються на їх транспортування.

## 2.2 Визначення піноутворювальних властивостей дисперсних систем

Для оцінки якості піноутворювальних властивостей дисперсних систем та їх сумішей використовують різні критерії: кратність піни, стабільність (стійкість) і дисперсність піни.

Комплексною характеристикою, що враховує максимальний за даних умов об'єм піни і час її життя є піноутворювальна здатність розчину. Кількісно вона виражається об'ємом піни (або висотою пінного стовпа), який можна отримати в конкретних умовах (спосіб піноутворення, температура, концентрація ПАР, рН, і т. д.) з певного об'єму розчину.

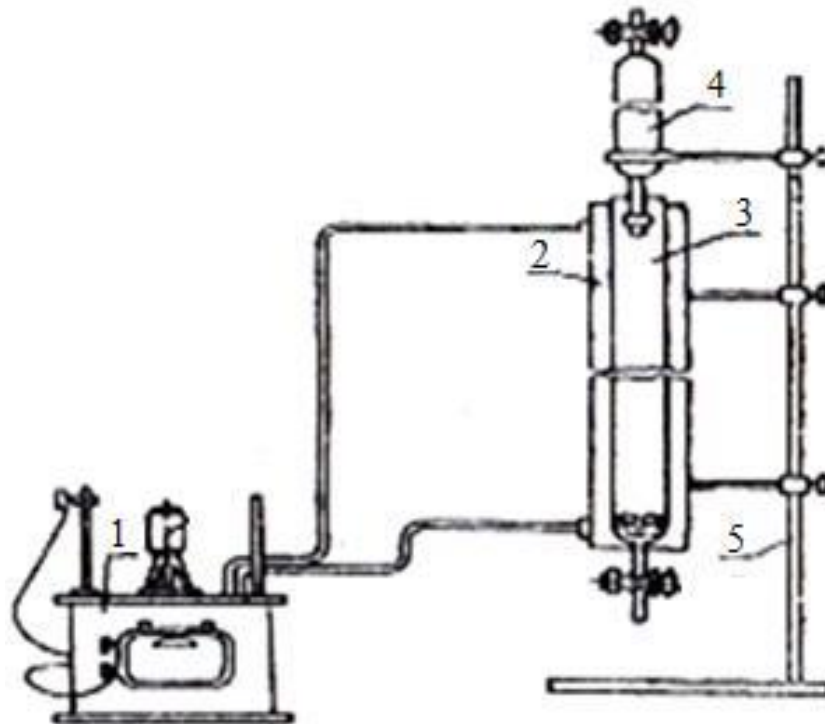
Під стійкістю піни в загальному випадку розуміють її здатність зберігати незмінними часі основні параметри: дисперсність бульбашок, вміст рідини (кратність) і об'єм піни в цілому. В якості простої кількісної міри стійкості часто використовують час руйнування.

Основною і найбільш ефективною методикою визначення піноутворювальної здатності розчинів є метод виливання Росса-Майлса, ДСТУ ISO 696: 2005. Цей метод прийнятий в багатьох країнах в якості стандартного [27-29]. За цим методом піна утворюється в результаті падіння струменя розчину з певної висоти на поверхню того ж самого розчину через калібрувальний отвір.

До конструкції даного приладу пред'являються особливі вимоги. Розміри окремих вузлів повинні бути суворо регламентовані. Калібрувальна трубка для витікання рідини повинна мати гладкі краї і переріз, перпендикулярний до осі. Режимми роботи приладу, об'єм розчину, що виливається, швидкість його подачі, об'єм розчину в посудині, повинні бути постійними. Схема пристрою, представлена на рисунку 2.1.

В літературі зустрічаються різні модифікації приладу Росса-Майлса, вдосконалені з метою автоматизації виливання розчину і реєстрації одержуваних результатів. Для речовин з низькою піноутворювальною здатністю придатний прилад, в якому струмінь рідини виливається з форсунки під тиском, що

створюється насосом. Застосування цього приладу обмежується необхідністю дослідження великих об'ємів пінних систем.



1 – термостат, 2 – водяна сорочка, 3 – мірний циліндр, 4 – циліндр, 5 – штатив

Рисунок 2.1 – Схема пристрою Росс-Майлса

Всі скляні складові приладу промивають хромовою сумішшю, ополіскують водою до повного видалення слідів кислоти і знову ополіскують випробувальним розчином. Трубку із нержавіючої сталі протягом 30 хв. витримують у парах суміші етилового спирту з трихлоретиленом у співвідношенні 1:1 і промивають невеликою кількістю випробувального розчину.

Водяну сорочку 3 з'єднують з термостатом 1, включають термостат і доводять температуру рідини в сорочці до заданої. Одночасно 300 см<sup>3</sup> розчину випробувального засобу термостатують до температури випробування. Із цієї кількості беруть 50 см<sup>3</sup> розчину, заливають у мірний циліндр 4 по стінці так, щоб не утворилася піна. Через 10 хвилин за допомогою гумової груші або насоса вводять у піпетку 5 випробувальний розчин в об'ємі 200 см<sup>3</sup> так, щоб не

утворилася піна. Піпетку з розчином закріплюють у штативі б так, щоб її вихідний отвір знаходився на відстані 900 мм від рівня рідини в циліндрі та забезпечував потрапляння струменя до центра рідини. Потім відкривають кран піпетки. Після витікання розчину із піпетки включають секундомір і вимірюють висоту стовпа піни, що утворилася, в міліметрах ( $H_0$ ). Далі через 5 хв вимірюють висоту стовпа піни, що утворилася, в міліметрах ( $H_5$ ). Якщо рівень стовпа піни має нерівну поверхню, то за висоту стовпа приймають середнє арифметичне вимірів максимальної та мінімальної висот піни. Перед кожним новим визначенням трубку 4 промивають дистильованою водою. З метою детального вивчення дисперсних систем визначали динаміку процесу піноутворення протягом години.

Різниця між діаметром трубок окремих приладів здійснює вплив на висоту стовпа піни, що утворилася. Тому для кожного приладу необхідно встановити поправковий коефіцієнт, за допомогою якого перераховують усі отримані при вимірах значення, які відповідають висоті стовпа піни, точно вимірної приладом з внутрішнім діаметром трубки 50 мм.

Поправковий коефіцієнт визначають за формулою:

$$K = \frac{D_1^2}{2500}, \quad (2.1)$$

де  $D_1$  – фактичний внутрішній діаметр випробувального приладу, мм;

$2500 = (50)^2$  – квадрат внутрішнього діаметра трубки стандартного приладу.

Пінотворювальну здатність характеризували висотою стовпа піни ( $H_0$  та  $H_i$ ) у міліметрах визначали за формулами 2.2, 2.3.:

$$H_0 = H_{0\text{вим}} \cdot K, \quad (2.2)$$

де  $H_{0\text{вим}}$  – початкова висота стовпа піни, яку виміряли приладом, мм;

$$H_5 = H_{5\text{вим}} \cdot K, \quad (2.3)$$

де  $H_{5\text{вим}}$  – висота стовпа піни після 5 хв., яку виміряли приладом, мм.

Стійкість піни (Сп) розраховано за формулою 2.4.:

$$C = \frac{H_5}{H_0}. \quad (2.4)$$

За кінцевий результат випробувань приймають середнє арифметичне трьох паралельних визначень, допустиме розходження між якими для початкової висоти стовпа піни не повинно перевищувати 10 мм.

На практиці запропоновано інші модифікації методу Росс-Майлса, наприклад, виливання струменя піноутворювального розчину на екран і багатоструменеве витікання рідини.

Для оцінки піноутворювальної здатності дисперсних систем використовували такі показники: об'єм або висота стовпа піни, їх відношення до початкового об'єму рідини та часу руйнування. Однак, до теперішнього часу немає єдиного універсального критерію, здатного об'єктивно оцінювати процес спінювання в різних умовах.

### 2.3 Визначення концентрації водневих іонів рН дисперсних систем

Для визначення концентрації водневих іонів рН дисперсних систем використано кондуктометр ADWA AD32. Зовнішній вигляд представлено на рисунку 2.2



Рисунок 2.2 – Кондуктометр ADWA AD32

Для проведення досліджень зважують 10 г лабораторної проби з точністю до 0,01 г. Метод приготування і концентрацію розчину проби зазначають у стандарті на конкретний засіб (для піномийних, пастоподібних мийних засобів 1 % розчин). рН-метр калібрують згідно з інструкціями, використовуючи два стандартних буферних розчини, з температурою 20°C.

Під час вимірювань температура електродів, води для промивання і стандартних буферних розчинів повинна бути в межах  $20 \pm 1$  °C і не відрізнятись більше як на 1 °C.

Після калібрування приладу електроди промивають водою, а потім досліджуваним розчином. Перемішують досліджуваний розчин, наливають достатню кількість у мірну посудину і занурюють у неї електроди. Після того, як показники іонометра (рН-метра) будуть стабільними протягом 1 хв, знімають дані.

Повторюють вимірювання для нового зразка досліджуваного розчину. Якщо результат другого вимірювання відрізняється від першого на 0,1 од. чи більше, проводять третє вимірювання. Якщо результат третього вимірювання також не дозволяє зробити висновок про величину рН, повторюють весь аналіз, включаючи калібрування.

У випадку випробування катіонних поверхнево-активних речовин іонометр (рН-метр) калібрують після кожного вимірювання.

Середнє значення заокруглюють до 0,1 од. рН. Результати виражають в одиницях рН при температурі 20 °С.

#### 2.4 Визначення кратності дисперсних систем

Кратність піни  $\beta$  це відношення об'єму піни до об'єму розчину, який необхідний для її утворення [6, 7]. Кратність піни визначали за формулою 2.5:

$$\beta = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{р}}} \quad (2.5)$$

де  $V_{\text{п}}$  – об'єм піни, яка утворилася, мл;

$V_{\text{р}}$  – об'єм розчину, який необхідний для утворення піни, мл

Величина обернена кратності піни - її щільність ( $\rho$ ). Розрахунок щільності піни відбувається з урахуванням маси піноутворювального розчину і об'єму отриманої піни. Щільність піни розраховують за формулою 2.6:

$$\rho = \frac{m}{V_{\text{п}}} \quad (2.6)$$

де  $m$  – маса піноутворювального розчину, мг;

$V_{\text{п}}$  – об'єм отриманої піни, мл.

#### 2.5 Методика визначення реологічних властивостей дисперсних систем

Реологічні (структурно-механічні) властивості дисперсних систем мають особливості, які дозволяють розглядати їх як структуровані системи, які володіють властивостями твердих тіл. Зовні це проявляється в здатності піни

зберігати певний час свою початкову форму. Реологічні властивості дисперсних систем характеризували кінетичною в'язкістю та густиною розчинів [8, 9, 22].

В'язкість – це реологічна характеристика, знання якої дозволяють визначати умови перекачування піни в трубах, розтікання пінни поверхнею, що важливо при гасінні пожежі, здатність до вільного стікання з отворів. Значення в'язкості, змінюються в широкому інтервалі залежно від кратності і дисперсності пін і від напруги зсуву (швидкостей течії). Кінематичну в'язкість визначали віскозиметричним методом за допомогою віскозиметра ВПЖ-2 (рисунок 2.3).

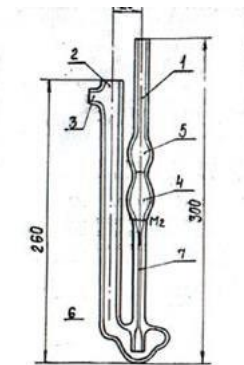


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд віскозиметра ВПЖ-2

Як видно з рисунку 2.3 віскозиметр ВПЖ-2 виготовлено зі скла V-подібної трубки, в середині якої знаходиться капіляр 7. При вимірюванні в'язкості рідина із резервуару 4 тече по капіляру 7 в розширення 6.

Віскозиметр заповнюють за допомогою гумового шлангу, який одягають на трубку 3. Далі, затиснувши пальцем коліно 2, повернувши віскозиметр, опускають коліно 1 у посудину з рідиною і засмоктують її (за допомогою груші, насоса або іншим способом) до верхньої позначки. При цьому слідкують за тим, щоб в рідині не з'явилися бульбашки повітря. У той момент, коли рівень рідини досягне нижньої позначки, віскозиметр виймають з посудини і швидко перевертають у нормальне положення. Знімають із зовнішнього боку кінця коліна 1 залишок рідини і надівають на нього гумову трубку.

Віскозиметр встановлюють в термостат так, щоб розширення 5 було нижче рівня рідини в термостаті. Після витримки в термостаті не менше 15 хвилин при заданій температурі засмоктують рідину у коліно 1, приблизно до однієї третьої

висоти розширення 5. Сполучають коліно 1 з атмосферою і визначають час опускання меніска рідини від верхньої до нижньої позначки.

Для вимірювання швидкості витікання дисперсних систем, внутрішню посудину віскозиметра наповнюють дослідним розчином до фіксуєної поділки. Швидко піднімають ковпачок віскозиметра і одночасно запускають секундомір. В момент, коли рідина витече, секундомір зупиняють та визначають час витікання розчину крізь капіляр.

Вимірювання проводять декілька разів. За точний час приймають середнє значення часу витікання рідини через капіляр. Вимірювання проводять при різних температурах.

Кінематичну в'язкість дисперсних систем визначають за формулою 2.7.

$$\nu = \nu \frac{g}{980,7} t \quad (2.7)$$

де  $a$  – стала віскозиметра (1,129);

$t$  – час витікання рідини, с;

$\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Вимірювання відносної густини дисперсних систем проводили за допомогою набору аерометрів (рисунок 2.4).

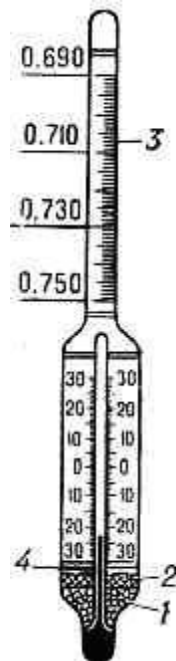


Рисунок 2.4 – зовнішній вигляд аерометра

У нижній частині ареометра знаходиться кулька, заповнена баластом (дробом, рідше ртуттю). Шкали ареометрів градуують в одиницях густини, при визначенні концентрації розчинів, у відсотках (за об'ємом або масою).

Для визначення відносної густини досліджуваний зразок рідини наливають у широкий циліндр, обережно занурюють у неї ареометр. Ареометр не повинен торкатися стінок циліндра. Чим більше відносна густина рідини, тим менше в неї занурений ареометр. Значення відносної густини показують визначають поділками на шкалі, проти якого встановлено рівень рідини.

## 2.6 Біотестування дисперсних систем

Для біотестування відбирали однакові за розмірами рослини ряски, які мали одну сформовану лопать та другу, що розвивається [29, 30]. Рослини мали по одному кореню однакової довжини з неушкодженим кореневим чохлаком. Візуально рослини були життєздатні та мали хороший фізіологічний стан.

Відібрані рослини ряски по 10 екземплярів поміщали у дослідні розчини піноутворювачів і контрольні (дистильована вода) скляні ємності об'ємом 500 мл при гарному природному сонячному освітленні. Температури води і температура повітря під час проведення експерименту становила від 21 до 25 °С.

Облік біологічних показників у гострому досліді проводили на 1, 3, 5, 7, 9, 11, 14-у добу. Ступінь впливу дисперсних систем на ряску малу визначали за наступними біолого-фізіологічними показниками життєдіяльності рослин:

- стану рослин (зміна забарвлення листя із зеленого на біле, а потім жовте; втрата тургору, в'янення листя; відрив листочків тощо);
- виживаності (кількість рослин ряски).

Враховували, що вищі водні рослини проходять певні стадії відмирання: спочатку змінюється забарвлення листя із зеленого на жовте, буре або коричневе, потім листя в'яне, втрачає тургор, а його маса поступово розкладається.

## 2.7 Обробка експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики

Статистичну обробку експериментальних даних проведено на основі кореляційно-регресійного аналізу, який передбачає розрахунок точкових і інтервальних оцінок результатів дослідження [31, 32].

З метою оцінки достовірності експериментальних даних, перевірки рівності середніх значень одержаних у двох вибірках використано критерій Стюдента (t-критерій). Для цього спочатку розраховують середнє арифметичне вимірюваної величини  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.8)$$

де  $x_i$  – вимірюване значення;

$n$  – кількість вимірювань.

Потім визначають стандартне відхилення  $\sigma$  (середньоквадратичну похибку середнього значення вимірюваної величини на вказаних рівнях):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.9)$$

Довірчий інтервал для істинного значення ( $X$ ) визначають за формулою:

$$\bar{X} - \Delta X \leq X \leq \bar{X} + \Delta X \quad (2.10)$$

де  $\Delta X$  – допустиме відхилення середнього арифметичного  $\bar{X}$  від істинного значення  $X$ .

$\Delta X$  розраховують за формулою:

$$\Delta X = \pm \frac{t \cdot S}{\sqrt{n}} \quad (2.11)$$

де  $t$  – критерій Ст'юдента, який залежить від кількості дослідів і довірчої ймовірності.

Перевірку адекватності отриманої регресійної моделі проведено за допомогою критерію Фішера. Розрахункове значення критерію Фішера визначається як відношення більшої дисперсії  $S_1^2$  до меншої  $S_2^2$ :

$$F_P = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad S_1^2 \geq S_2^2 \quad (2.12)$$

Розрахункове значення критерію Фішера ( $F_P$ ) порівнюється з табличним (критичним) значенням  $F_{кр}$ , взятим для обраного рівня значущості  $\alpha$  і відповідних ступенів вільності  $f_1 = n_1 - 1$  та  $f_2 = n_1 - 1$ . Якщо розрахункове значення критерію менше критичного:  $F_P \leq F_{кр}$ , то це означає, що дисперсії відрізняються незначно, тобто вони однорідні, а відповідні фактори вважають незначимими. Якщо дисперсійне співвідношення більше табличного, то вплив фактору вважають значимим.

Для визначення однорідності дисперсій застосовано критерій Кохрена. При цьому серед розглянутих дисперсій  $S_1, S_2, \dots, S_i$  вибирається максимальна  $S_{max}$ , яка ділиться на суму всіх дисперсій  $\sum_{i=1}^n S_i^2$ :

$$G_P = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \quad (2.13)$$

де  $n$  – кількість дисперсій, які порівнюють.

Критичне значення ( $G_{кр}$ ) знаходять з таблиць для рівня значущості  $\alpha$  і ступенів вільності  $f_{max} = n - 1$  і  $f_{\Sigma} = n$ . Дисперсії є однорідними, якщо розрахункове значення критерію не перевищує табличного  $G_P \leq G_{кр}$ .

Методикою статистичної обробки експериментальних даних передбачено математичний опис істинного значення досліджуваного показника при значенні довірчої вірогідності  $\alpha = 95\%$ . Кількість дослідів визначено таким чином, щоб довірчий інтервал знаходився в межах від 2 до 3% від середнього значення.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

#### 3.1 Характеристики ПАР для пожежогасіння

Залежно від виду горючих матеріалів, пожежі поділяються на п'ять основних класів: А, В, С, D і F. Кожен клас має свої особливості та потребує спеціальних засобів пожежогасіння. В таблиці 3.1 представлено характеристики основних класів пожеж.

Таблиця 3.1– Основні класи пожеж

Клас пожежі	Характеристики	Що використовується для гасіння
А	Супроводжуються горінням твердих матеріалів, зазвичай органічного походження, під час горіння яких зазвичай утворюються тліючі вуглини: деревина, текстиль, папір, солома тощо.	Вода, піна, порошок або вуглекислота
В	Супроводжуються горінням рідин або твердих речовин, які переходять у рідкий стан: бензин, масло, лак, парафін тощо.	Не можна використовувати воду, оскільки вона сприяє поширенню вогню. Слід застосовувати піну, порошок або вуглекислоту
С	Супроводжуються горінням газоподібних речовин: пропану, бутану, метану, ацетилену тощо.	Потрібно спочатку припинити подачу газу до джерела загоряння, а потім застосовувати порошок або вуглекислоту

Кінець таблиці 3.1

D	Супроводжуються горінням металів та їх сплавів: алюмінію, магнію, натрію, калію тощо.	Не можна використовувати звичайні засоби пожежогасіння, оскільки вони можуть спричинити хімічну реакцію або вибух. Слід застосовувати спеціальні порошковими складами
F	Супроводжуються горінням речовин, які використовують для приготування їжі (рослинні й тваринні олії та жири) і містяться в кухонних приладах.	Не можна використовувати воду, піну або порошок, оскільки вони можуть спричинити розбризування гарячої речовини або погіршити ситуацію. Слід застосовувати спеціальні засоби пожежогасіння класу F5

За даними таблиці для гасіння пожеж класу А, В рекомендовано застосовувати пінні та водні розчини. При цьому пінні системи є більш ефективними ніж вода. Пожежі класу С, D і F супроводжуються горінням сплавів металів, газоподібних речовин і потребують комплексне поєднання спеціальних протипожежних засобів та попередніх заходів для їх припинення.

За даними ДСНС [1, 2] більшість пожеж відносяться до класу А, В. Тому важливим є використання дисперсних систем для пожежогасіння.

В експериментальних дослідженнях використано сучасні аніоноактивні та неіоногенні ПАР, які можуть застосовуватися як ефективні піноутворювачі для дисперсних систем для пожежогасіння [20]. А саме, EXOsoft PO30, ROSULfan D, ROKAmer G3800, SULFOROKAnol A325/1, ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROKAnol L5P5 MB, виробництва PCC Group (Польща).

EXOsoft PO30 – аніонна поверхнево-активна речовина на основі натуральних інгредієнтів рослинного походження (калію олеат), що відноситься до групи мила. EXOsoft PO30 належить до групи засобів, на які поширюється сертифікат RSPO в моделі балансу маси [21]. Це означає, що пальмова олія, яка використовується для виробництва основної сировини, яка входить до складу EXOsoft PO30 MB, походить із культур, які не виснажують природні ресурси. При температурі від 20 до 25 °C EXOsoft PO30 має вигляд прозорої жовтої рідини. Вміст сухих речовин у водному розчині від 25% до 28 %. Не містить консервантів, твердне при 0 °C, альтернатива іншим ПАР, таким як SLES або SLS. У косметичних рецептурах діє як емульгатор і мийний засіб. Активно використовується в композиціях мийних засобів для тіла та волосся (шампуні, гелі для душу, рідке мило), а також в дитячих мийних засобах.

Завдяки дуже хорошим мийним властивостям EXOsoft PO30 можна використовувати як компонент побутових, так і професійних мийних засобів. Особливо рекомендовано для використання як компонент мийних засобів для контролю піноутворення.

EXOsoft PO30 біологічно розкладається, не підпадає під дію правил ADR/RID.

ROSULfan OD – аніонна поверхнево-активна речовина, що відноситься до групи алкілсульфатів, натрієва сіль n-октил і n-децилсульфату. Концентрація діючої речовини у водному розчині становить від 40 % до 42 %. Має низьку в'язкість і світло-жовтий колір або безбарвний.

ROSULfan OD має помірні піноутворювальні властивості, утворюючи середньо- та малостійкі піни навіть у жорсткій воді. Піни, отримані з ROSULfan OD, характеризуються високим ступенем гідратації (так звана волога піна) і неоднорідною структурою бульбашок. ROSULfan OD також має низьку схильність до гелеутворення в розчинах електролітів, що усуває проблеми, пов'язані з локальним підвищенням в'язкості, наприклад, в системах дозування.

ROSULfan OD також використовують як компонент синтетичних вогнегасних засобів і засобів, що містять фторовані і перфторовані ПАР (типу

AFFF, FFFP, типу FP і типу AR, що утворюють водну плівку). У цих умовах він діє як додатковий піноутворювач і може бути змішаний з іншими поверхнево-активними речовинами. Продукт може використовуватися в лужних вогнегасних засобах. Виявляє стійкість до їдких розчинів з концентрацією до 180 г/л.

Завдяки піноутворювальним властивостям ROSULfan OD також може бути використаний як повітровтягувач у будівельній галузі, головним чином у виробництві гіпсокартону, завдяки чому можливе виробництво легких і міцних матеріалів.

Поверхнево-активна речовина є біологічно розкладаною та відповідає критеріям біорозкладаності, викладеним у Регламенті (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів.

ROSULfan D911 – аніонна поверхнево-активна речовина з групи алкілсульфатів з довжиною вуглецевого ланцюга C<sub>9</sub>-C<sub>11</sub>. ROSULfan D911 це натрієва сіль алкілсульфату, випускають у вигляді 35 % водного розчину низької в'язкості від безбарвного до світло-жовтого кольору. Має дуже хороші піноутворювальні властивості, утворюючи високу та стійку піну навіть у жорсткій воді.

Піни, отримані з ROSULfan D911, характеризуються високим ступенем гідратації (волога піна) і малим діаметром бульбашок (дрібна піна). ROSULfan D911 також має низьку схильність до гелеутворення в розчинах електролітів, що усуває проблеми, пов'язані з локальним підвищенням в'язкості (наприклад, в системах дозування).

Завдяки своїм унікальним піноутворювальним властивостям, ROSULfan D911 в основному використовують як повітровтягувач у будівельній промисловості, головним чином у виробництві гіпсокартону. Його використовують для виготовлення легких та міцних матеріалів. ROSULfan D911 також використовують як компонент синтетичних вогнегасних засобів, є основним піноутворювачем, може добре поєднуватися з іншими поверхнево-активними речовинами. Речовину можна використовувати в лужних засобах пожежогасіння з стійкістю до їдкого розчину до 90 г/л.

ROSULfan D911 також використовують як компонент бурових розчинів у тунельних процесах, де його властивості спінювання та змочування також відіграють важливу роль.

ROSULfan D911 легко біологічно розкладається, відповідає критеріям біологічного розкладу, викладеним у Регламенті (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів.

ROSULfan D – аніонна поверхнево-активна речовина з групи алкілсульфатів, натрієва сіль алкілсульфату. Випускають у вигляді 35 % водного розчину низької в'язкості від безбарвного до світло-жовтого кольору. Має дуже хороші піноутворювальні властивості, утворює високу та стійку піну навіть у жорсткій воді.

Піни, отримані з ROSULfan D, характеризуються високим ступенем гідратації (волога піна) і малим діаметром бульбашок (дрібна піна). ROSULfan D має низьку схильність до гелеутворення в розчинах електролітів, що усуває проблеми, пов'язані з локальним підвищенням в'язкості (наприклад, в системах дозування).

Завдяки своїм унікальним піноутворювальним властивостям, в основному використовують як повітротягач у будівельній промисловості, головним чином у виробництві гіпсокартону. ROSULfan D використовують як компонент синтетичних вогнегасних засобів, є основним піноутворювачем і може змішуватися з іншими поверхнево-активними речовинами. Можна використовувати в лужних засобах пожежогасіння з стійкістю до їдкого розчину до 90 г/л.

ROSULfan D також використовують як компонент бурових розчинів у тунельних процесах, де його властивості спінювання та змочування відіграють важливу роль. Використовують як додатковий стабілізатор піни в складах активної піни, для автомийок самообслуговування.

ROSULfan D дуже легко розкладається, відповідає критеріям регламенту (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів.

ROKAmeg G3800 – це неіоногенна поверхнево-активна речовина, яка належить до групи блок-сополімерів етиленоксиду та пропіленоксиду (EO/PO) з використанням гліцерину як основи. Блок-сополімер із середньою молярною масою близько 3800 г/моль. Безбарвна прозора рідина, має низьку температуру замерзання, тобто нижче  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . ROKAmeg G3800 – висококонцентрована ПАВ, концентрація діючої речовини 100 %.

Характеризується зниженою розчинністю у воді (при низьких концентраціях і при низьких температурах води). Температуру помутніння ROKAmeg G3800 визначають у 25 % розчині, мутніє в діапазоні температур від 25 до  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

ROKAmeg G3800 має ряд унікальних властивостей: піноутворення, особливо в жорсткій воді; повітровтягуючі властивості; оптимальні зволожувальні властивості; легка у використанні; робота як в кислому, так і в лужному середовищі; дуже легко розкладається.

ROKAmeg G3800 відповідає критеріям біорозкладаності Регламенту (ЄС) № 648/2004 про мийні засоби.

SULFOROKAnol A325/1 – аніонна поверхнево-активна речовина (амонію лаурет). Випускають у формі в'язкої рідини, консервованої МП/СІТ. SULFOROKAnol A325/1 має високі властивості до піноутворення, тому може використовуватися як піноутворювач.

Використовують у засобах для миття тіла, рідкому милі, гелях для душу та шампунях. SULFOROKAnol A325/1 рекомендовано для виробництва прозорих або перламутрових шампунів середньої або високої в'язкості, утворює рясну шовковисту піну. Використовують в рецептурах піни для ванн, гелів для душу, в яких м'якість і високі піноутворювальні властивості мають ключове значення. Засіб забезпечує хороше піноутворення навіть в жорсткій воді та великої кількості забруднень.

SULFOROKAnol A325/1 слід застосовувати в рецептурах, де значення рН нижче 9, через виділення аміаку в лужному середовищі. Продукт рекомендований для косметичних рецептур у поєднанні з амфотерними

поверхнево-активними речовинами та амінокислотами. Для отримання відповідних реологічних характеристик SULFOROKAnol A325/1 можна комбінувати з алканоламідами або амонію хлоридом. Продукт сумісний з аніонними, неіонними та амфотерними ПАР.

SULFOROKAnol A325 / 1 біологічно розкладається і відповідає критеріям біологічного розкладу, Регламенту (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів.

ROKAnol L5P5 MB відноситься до групи неіоногенних поверхнево-активних речовин типу алкоксильованих жирних спиртів натурального походження. Прозора або злегка каламутна рідини з низькою температурою замерзання -9 °С. Продукт має температуру помутніння у воді в діапазоні від 27 до 31 °С. Низький рівень помутніння у водних розчинах дозволяє використовувати ПАР при температурах, близьких до кімнатної або трохи вище.

ROKAnol L5P5 MB належить до групи ПАР, на які поширюється сертифікат RSPO у моделі балансу маси [21]. Це означає, що пальмова олія, яка використовується для виробництва основної сировини, що входить до складу продукту ROKAnol L5P5 MB, походить з культур, які не виснажують природних ресурсів. ROKAnol L5P5 MB є одним з найкращих зволожувачів, з високою мийною дією для побутового та професійного клінінгу. Пінні властивості значно знижуються після перевищення температури помутніння у воді, що позитивно позначається на продуктивності засобів.

ROKAnol L5P5 MB використовують в добавках для текстильної промисловості, головним чином у відбілювачах для текстилю. Поєднує в собі дві відмінну змочуваність різних типів тканин і високу здатність видаляти плями з текстильних матеріалів. Ці характеристики використовують в професійних мийних засобах, призначених для посудомийних машин. ROKAnol L5P5 MB, зменшує контактний кут на твердих поверхнях, сприяє швидкому висиханню посуду, запобігаючи утворенню плям. Також може бути солубілізатором у косметичних рецептурах, наприклад засобах після засмаги, антиперспірантах, гелях для душу, косметиці по догляду за тілом, кольоровій косметиці та засобах для укладання волосся.

Транспортні правила ADR/RID, ADN, IMDG, ICAO/IATA не поширюються на транспортування цього продукту. Поверхнево-активна речовина відповідає критеріям біологічного розкладання, Регламенту (ЄС) № 648/2004 щодо мийних засобів.

Основні властивості досліджуваних ПАР представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Фізико-хімічні властивості ПАР для пожежогасіння

Назва, тип ПАР	Хімічний склад	Фізичні властивості	Функція	Біорозклад
EXOsoft PO30 MB, АПАР	калію олеат	прозора жовта рідина	мийна дія, піноутворювач	+
ROSULfan OD, АПАР	алкілсульфати, натрієва сіль n-октил і n-децилсульфату	світло-жовта або безбарвна рідина	мийна дія, піноутворювач, наповнювач	+
ROSULfan D911 АПАР	алкілсульфати з довжиною вуглецевого ланцюга C <sub>9</sub> -C <sub>11</sub> .	світло-жовта або безбарвна рідина	мийна дія, піноутворювач, наповнювач, змочувач	+
ROSULfan D, АПАР	алкілсульфати з довжиною вуглецевого ланцюга C <sub>9</sub> -C <sub>11</sub> .	світло-жовта або безбарвна рідина	піноутворювач, наповнювач, стабілізатор	+
SULFOROKAnol A325 / 1, АПАР	амонію лаурет	в'язка рідина	піноутворювач, стабілізатор, мийна дія	+

Кінець таблиці 3.2

ROKAmer G3800, НПАР	блок-сополімер етиленоксиду та пропіленоксиду (EO/PO) на основі гліцерину	Безбарвна рідина	мийна дія, емульгатор, піноутворювач, змочувач	+
ROKAnol L5P5 МВ, НПАР	алкоксильовані жирні спирти	прозора рідина	відбілювач, змочувач, емульгатор, мийна дія	+

За даними таблиці 3.2 наведені ПАР є багатофункціональними та біорозкладними. Тому є перспективними для застосування в дисперсних системах для пожежогасіння без шкоди для навколишнього середовища та здоров'я людей.

Піни, як та інші дисперсні системи, можна отримати двома способами: диспергуванням та конденсаційним [9, 32, 33].

При диспергуванні піна утворюється в результаті інтенсивного спільного диспергування піноутворювального розчину і повітря. Технологічно диспергування здійснюють:

- при проходженні струменів газу через шари рідини (в барботажних або аераційних установках, і апаратах з пінним шаром, застосовуваних для очищення газів, що відходять, в піногенераторах деяких типів, що мають сітку, зрошувану піноутворювальним розчином);

- при дії рухомих пристроїв на рідину в атмосфері газу або при дії рідини, що рухається на перешкоду (у технологічних апаратах при перемішуванні мішалками, струшуванні, збиванні, переливанні розчинів);

- при ежектуванні повітря струменем розчину, що рухається у деяких

піногенераторах, призначених для гасіння пожеж.

Конденсаційний спосіб отримання пін засновано на зміні параметрів фізичного стану системи, що веде до пересичення розчину (робочого середовища) газом. До цього ж способу відноситься утворення піни в результаті хімічних реакцій та мікробіологічних процесів, що супроводжуються виділенням газоподібних продуктів.

Пересичення розчину газом і в результаті цього спінювання відбуваються при створенні зниженого тиску в апаратах з розчином, при підвищенні температури розчину (при випаровуванні розчинів, дистиляції тощо), при введенні розчин речовин, що зменшують розчинність газів.

Отримання пін може бути обумовлено дією кількох джерел піноутворення одночасно. Так, деякі технологічні процеси проводять при аерації та перемішуванні. При мікробіологічному синтезі крім аерації п перемішування утворення піни обумовлено виділенням газоподібних продуктів метаболізму.

За даними вчених [6, 7, 22], механізм утворення бульбашки піни полягає у формуванні адсорбційного шару на міжфазній поверхні газоподібного або пароподібного включення в рідкому середовищі, що містить ПАР. Швидкість формування цього шару визначається швидкістю дифузії молекул ПАР із глибини розчину до поверхні включення. При виході бульбашок на поверхню розчину він оточується подвійним шаром орієнтованих молекул.

Слід зазначити, що процес піноутворення ускладнюється через спільний вплив численних фізико-хімічних, фізико-технічних та інших факторів. Одержані піни, істотно залежать від умов проведення конкретного технологічного процесу або експерименту. Безліч змінних параметрів, вплив яких не завжди можливо визначити, практично виключає можливість суворого математичного опису процесів піноутворення.

Одним із можливих способів узагальнення експериментальних даних про властивості пін є використання теорії подібності, яка дозволила знайти рівняння подібності, що описує процес піноутворення барботажних апаратів.

### 3.2 Структурування в дисперсних системах

Піни за своєю природою близькі до концентрованих емульсій, але дисперсною фазою в них є газ, а не рідина. Піни одержують із розчинів поверхнево-активних речовин [7, 22]. Для підвищення їх стійкості до розчинів ПАР додають високомолекулярні речовини, що підвищують в'язкість розчинів. Як характеристики піни використовується комплекс властивостей, що всебічно характеризують піну.

Піноутворювальна здатність розчину — кількість піни, що виражається її об'ємом ( $\text{см}^3$ ) або висотою стовпа (м), яка утворюється із заданого постійного об'єму піноутворювального розчину при дотриманні деяких стандартних умов піноутворення протягом постійного часу [29, 31].

Кратність піни, яка є відношенням об'єму піни до об'єму розчину, що пішов на її утворення.

Стабільність (стійкість) піни — її здатність зберігати загальний об'єм, дисперсність і перешкоджати витіканню рідини. Часто як міру стабільності використовують час існування виділеного елемента піни (окремої бульбашки або плівки) або певного об'єму піни.

Дисперсність піни, яка може бути охарактеризована середнім розміром бульбашок, розподілом їх за розмірами або поверхнею розділу розчин — газ в одиниці об'єму піни.

Піни, на відміну інших дисперсних систем, склад яких визначається концентрацією дисперсної фази, характеризуються наявністю дисперсійної середовища.

Піни є нестійкими дисперсними системами, оскільки щільність рідини в сотні і навіть тисячі разів перевищує густину газу, з якого формуються бульбашки піни. Піни вважаються грубодисперсними системами: у момент піноутворення одразу видно бульбашки піни. Маса та об'єм газової дисперсної фази непостійні і швидко змінюються, розміри бульбашок сильно відрізняються, тому піни можна вважати полідисперсними системами. Піни є типовими

ліофобними дисперсними системами.

Піни як дисперсні системи мають свої особливості, що визначаються властивостями дисперсної фази, дисперсійного середовища та межі поділу фаз між ними, такими як: зміна енергії Гіббса, міжфазний поверхневий натяг, форма бульбашок (сферична, поліедрична).

Піни термодинамічно нестійкі, тому що в них протікають процеси, що ведуть до зміни будови та руйнування пін. До таких процесів відносять:

- Стоншення плівок та їх подальший розрив. В результаті збільшується середній розмір осередків при розриві плівок в об'ємі піни або зменшується висота стовпа (шару) піни, якщо розриваються плівки, що відокремлюють поверхневі осередки піни від зовнішнього газового середовища, дисперсність піни падає.

- Дифузійне перенесення газу з малих осередків у більші (у полідисперсній піні) або з поверхневих осередків у зовнішнє середовище. Це призводить до зникнення поверхневих осередків та зменшення висоти стовпа (шару) піни.

- Набрякання дисперсійного середовища під дією сили тяжіння у високостабільних пінах, що призводить до виникнення гідростатично рівноважного стану (синерезису), в якому кратність шару піни тим більша, чим вище він розташований. У низькократних пінах синерезис веде до виникнення під піною шару рідини.

Для пін, особливо високократних, характерна пориста плівково-каналова структура, в якій заповнені газом осередки розділені тонкими плівками – стінками бульбашок (рисунок 3.1). Три плівки, що сходяться, розташовані під кутом  $120^\circ$ , утворюють канал, чотири канали з кутом між ними близько  $109^\circ 28'$  сходяться в одній точці і утворюють вузол. Найбільш типовою формою осередку в монодисперсній піні є пентагональний додекаедр (дванадцятигранник із п'ятикутними гранями), часто від 1 до 3 додаткових граней; середня кількість плівок, що оточують комірку, зазвичай близько до 14. У низькократній піні форма осередків близька до сферичної та розмір плівок малий.

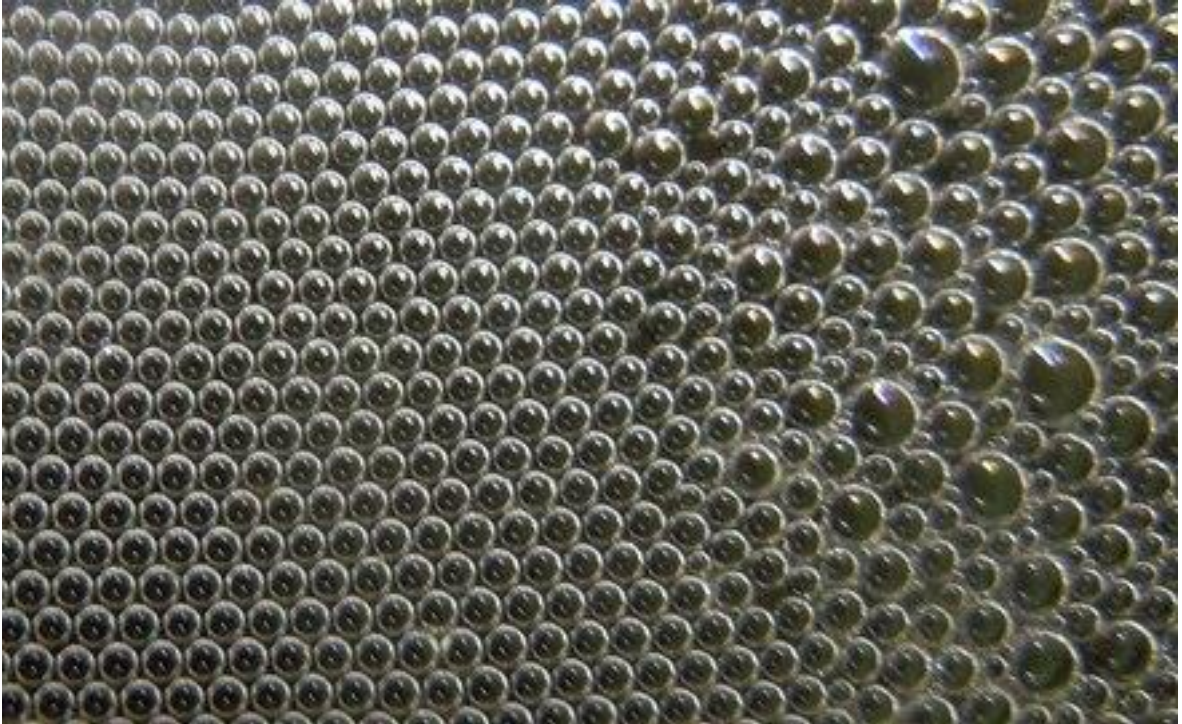


Рисунок 3.1 – Трикутники Плато між повітряними бульбашками у піні

Системи з твердим дисперсійним середовищем та газовою дисперсною фазою – Г/Г часто називають твердими пінами. Тверді піни, як і рідкі піни, внаслідок великого розміру бульбашок газової фази зазвичай відносять до мікрогетерогенних і навіть грубодисперсних системам.

Прикладом природної твердої піни може служити пемза – пориста, дуже легка гірська порода вулканічного походження, що використовується як абразив для полірування та шліфування, а також у будівельній справі для виготовлення пемзобетону. Зі штучних твердих пін можна вказати піноскла та пінобетони, що широко застосовуються як будівельні та ізоляційні матеріали. Достоїнствами цих матеріалів є мала щільність, мала теплопровідність і досить велика міцність, обумовлена їх пористою структурою та міцністю дисперсійного середовища. Сюди треба віднести штучні губчасті матеріали, виготовлені на основі полімерів.

За даними Плато багатогранна структура піни описується двома геометричними правилами. В кожному ребрі багатогранника сходяться три плівки, кути між якими рівні і складають  $120^\circ$ . Місця стиків плівок (ребра

багатогранників) чергуються та утворюють у поперечному перерізі трикутник. Ці проміжки – каналами Плато або Гіббса. Вони являють собою взаємопов'язану систему і пронизують всю структуру піни. Аналогічною є система каналів, які утворені плоскими (або викривленими) плівками, площа перерізу яких менша, ніж каналів Плато. Ці канали складаються з двох адсорбційних шарів молекул ПАР і прошарків розчину між ними.

В одній точці сходяться чотири канали Плато, утворюючи однакові кути. Багатогранну структуру бульбашок піни вивчали шляхом отримання одиночних бульбашок при вдуванні в розчин ПАР визначеного об'єму повітря. Число граней у бульбашках змінювалось від 12 до 15 граней. Форма граней в основному була п'ятикутною, хоча зустрічались квадратні, шести- і семикутні грані.

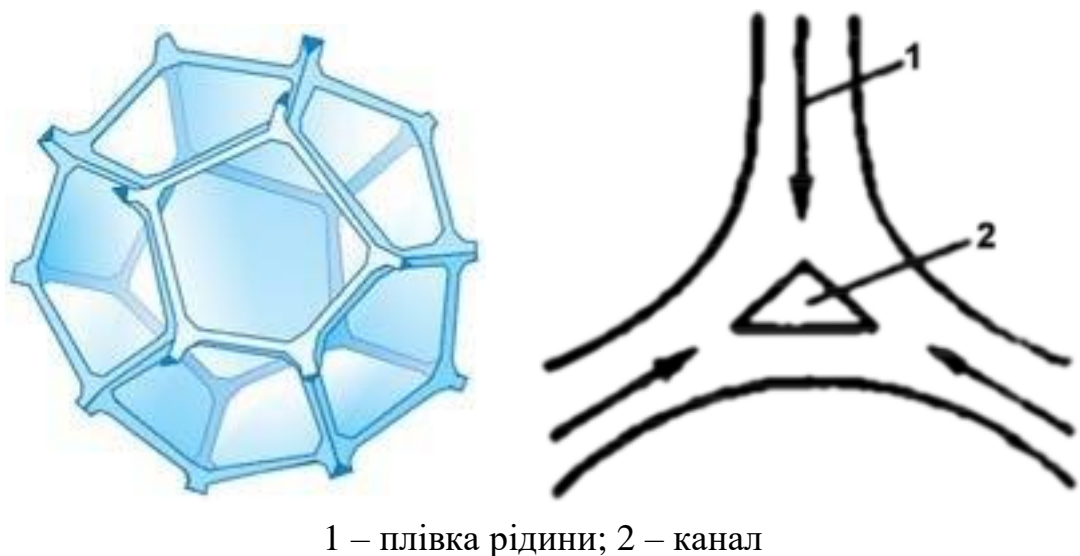


Рисунок 3.2 – Структура каналів Плато-Гіббса

Перегрупування багатогранних бульбашок у піні показало, що у процесі руйнування піни внаслідок газової дифузії бульбашки послідовно приймають форму паралелепіпеда, трикутної призми і тетраедра незалежно від першочергової структури. На останній стадії (тетраедр) відбувається перетворення об'ємної фігури у вузол (місце стиків каналів Плато). Поверхня граней комірок піни може бути плоскою тільки у випадку п'ятикутних

багатогранників.

Вершини сусідніх пентагональних додекаедрів утворюють вузли, у яких сходяться, чотири канали. При цьому чотири вершини, найближчі до даної, утворюють тетраедр (подібно до розташування атомів найближчої координаційної сфери в ґратах алмазу). Канали та вузли утворюють єдину розгалужену систему, за якою може здійснюватися перенесення дисперсійного середовища, зокрема, його стікання під дією сили тяжіння.

У пінах з кратністю до від 100 до 1000 (залежно від дисперсності та товщини плівок) основна частина дисперсійного середовища міститься в каналах і лише її мала частка – у плівках. Вміст рідини у вузлах найбільше в дуже низькократних пінах (при кратності, що наближається до трьох).

Реальні піни, зазвичай, полідисперсні [22]. Це спричиняє зміну форми осередків пін. Однак правила Плато (три плівки утворюють канал, чотири канали утворюють вершину) дотримуються у всіх випадках. Дисперсність піни можна характеризувати її питомою поверхнею. Частіше вимірюють деякі середні значення геометричних параметрів осередку, наприклад, середнє число осередків в одиниці об'єму  $\nu$  або середній еквівалентний радіус. Товщина плівок, середній еквівалентний радіус осередків (об'єму), середня кратність піни  $K$ , а також висота стовпа (шару) піни є основними геометричними параметрами, які в першому наближенні характеризують будову піни. При повнішому розгляді слід враховувати зміну перших трьох параметрів за висотою пінного стовпа.

Піни та ізольовані пінні плівки є зручним об'єктом вивчення природи відносної стійкості ліофобних дисперсних систем, механізмів та кінетики їх руйнування. Водночас піни широко використовують у різних галузях сучасної техніки: при гасінні пожеж, у флотації, у виробництві хлібопекарських та кондитерських виробів (хліб – приклад затвердженої піни), теплоізоляційних матеріалів (пінобетони, пінопласти, мікропористі гуми) тощо.

Як правило, здійснюється диспергуванням повітря (рідше іншого газу) в рідині, що містить ПАР – піноутворювач. Іноді вводять добавки стабілізаторів піни, що також є поверхнево-активними речовинами, які посилюють дію

піноутворювача.

Диспергування газу може здійснюватися пропусканням повітря через шар рідини (барботажні піни) або за допомогою мішалок обсягом рідини. Застосовують і піногенератори різних конструкцій, у багатьох із яких утворення піни відбувається на сітці. При цьому, задаючи витрату повітря та розчину піноутворювача, можна отримувати піну необхідної кратності. Для забезпечення необхідної дисперсності піни по дорозі пінного потоку встановлюється ряд сіток, у яких відбувається диспергування осередків піни. Такі піногенератори можуть забезпечити швидке отримання великих кількостей піни, необхідних при гасінні пожеж, особливо палив палива та інших органічних рідин.

Піни, в яких відбувається затвердіння дисперсійного середовища (хліб, піноматеріали), зазвичай утворюються конденсаційним шляхом, заснованим на виділенні будь-якого газу, найчастіше  $\text{CO}_2$  в результаті хімічної реакції або біохімічного процесу.

Руйнування піни супроводжується зміною в часі параметрів, що характеризують будову піни, і пов'язане з перебігом розглянутих процесів потоншення і прориву плівок, ізотермічної перегонки газу від дрібних осередків до більших, а також синерезису – витікання дисперсійного середовища з каналів Гіббса, сили тяжіння.

Наявність адсорбційних шарів ПАР на поверхні плівки забезпечує затвердіння поверхонь внаслідок ефекту Марангоні – Гіббса. Водночас можуть траплятися й відхилення від рейнольдівського режиму потоншення плівок. У деяких випадках ці відхилення пов'язані з поверхневою та об'ємною дифузією молекул ПАР. В інших випадках (особливо для плівок великого розміру) може спостерігатися більш швидке потоншення периферійних частин плівок із збереженням у їхній центральній частині ділянки товстої плівки. Ця центральна частина надалі може зливатися з каналом Плато-Гіббса.

Потоншення плівок може закінчуватися їх розривом або утворенням метастабільно-рівноважного стану, коли розклинювальний тиск у плівці дорівнює по абсолютній величині капілярному тиску, що визначається

кривизною поверхні навколишнього плівку меніска. Цю величину можна змінювати, відсмоктуючи рідину з каналу Плато-Гіббса. Виникнення позитивного за знаком розклинювального тиску в пінних плівках може бути зумовлене його електростатичною складовою. В області порівняно товстих плівок розклинювальний тиск у плівці визначається молекулярною та електростатичною складовими.

У ряді випадків відбувається зменшення рівноважних товщин плівок, якщо поряд з ПАР до складу дисперсійного середовища вводити електроліт, що викликає зменшення електростатичної складової тиску, що розклинює. Залежність товщини пінних плівок від концентрації електроліту в дисперсійному середовищі, описується теорією ДЛФЗ. Більш того, варіюючи капілярний тиск у каналі плато-Гіббса і вимірюючи товщини плівок, можна отримати залежність тиску, що розклинює, від товщини плівки при постійній концентрації електроліту.

Зміна дисперсності піни в часі може бути пов'язана як із перебігом ізотермічного перенесення газу через плівки, так і з розривом самих плівок. Вимірювання дисперсності піни та її змін у часі зазвичай проводиться підрахунком числа осередків, що контактують зі стінкою судини, в якій знаходиться піна (за мікрофотографіями). Ізотермічний перенесення газу від малих осередків з більш високим тиском повітря до великих, у яких тиск повітря нижчий, особливо суттєвий для високодисперсних полідисперсних пін, тобто на початкових стадіях їх руйнування. Оскільки товщина плівок у пінах у стані, близькому до метастабільно-рівноважного, не змінюється в часі.

Розрив плівок у пінах носить випадковий характер, при цьому ймовірність прориву плівок та об'єднання сусідніх осередків пропорційна числу плівок в даний момент часу.

Зі зростанням висоти, кратність піни зростає. У стовпі піни заданої висоти з певним розміром осередків в умовах рівноваги може міститися лише певна кількість рідкої фази, якій відповідає деяке рівноважне значення середньої кратності.

У високодисперсних пінах початкове значення кратності може перевищувати цю величину. З таких пін у початкові моменти часу, не тільки не відбувається витікання рідкої фази, але, навпаки, такі дуже сухі піни здатні всмоктувати в себе рідину. Подальше падіння дисперсності піни призведе до зменшення кількості рідини, що може утримуватися в піні, з неї почне витікати дисперсійне середовище і, відповідно, зростатиме кратність. При цьому збільшення в часі кратності піни цілком визначається падінням її дисперсності: розрив плівок призводить до зменшення числа каналів в одиниці об'єму піни, а переріз каналів (при заданій висоті) залишається незмінним.

У низькократних пінах, навпаки, саме у перші моменти часу відбувається швидке закінчення дисперсійного середовища та зростання кратності аж до досягнення стану, близького до гідростатично рівноважного. Надалі хід зміни кратності виявляється таким самим, як і для високократних пін. Зручним методом визначення кратності піни є вимір її електричної провідності (кратність обернено пропорційна електропровідності піни).

Зміна у часі висоти пінного шару (або висоти стовпа піни в посудині) обумовлена підвищеною швидкістю руйнування верхніх, що контактують із зовнішнім середовищем плівок піни. Це може бути пов'язано з випаровуванням дисперсійного середовища з плівок, так що швидкість руйнування стовпа піни істотно залежить від вологості повітря, що контактує з нею. При контакті шару піни з рідким вуглеводнем, що знаходиться під нею, також може відбуватися прискорене руйнування піни в області контакту. У цьому висота шару піни залишається деякий час незмінною, але поблизу вуглеводню у піні утворюються порожнини. Особливо швидке руйнування піни відбувається при її контакті з органічними полярними рідинами, що є серйозною перешкодою для використання пін для гасіння полярних розчинників, що горять.

Піни, що використовуються у різних галузях, повинні мати різну стійкість. Так, у флотації, коли проводиться барботування великої кількості повітря через водні розчини ПАР, що містять частинки руди, утворення багатої високостійкої піни небажане, оскільки це ускладнить подальше виділення з піни цінного

мінералу. У цьому випадку використовують ПАР першої групи (за класифікацією Ребіндера), тобто слабкі піноутворювачі, для яких час життя індивідуальних бульбашок не перевищує кількох десятків секунд. Як такі слабкі піноутворювачі зазвичай застосовують нижчі спирти або продукти переробки деревини (соснова олія). Піна, що містить флотовані частинки (так звана трифазна піна), має більш високу стійкість, ніж піна без твердих частинок, так що на поверхні флотаційного апарату утворюється порівняно тонкий шар «вершків», що містять досить високу концентрацію мінералу, що флотується. Періодично видаляючи з поверхні ці вершки, потім руйнуючи піну, отримують концентрат даного мінералу.

Високостійкі піни, стабілізовані ПАР третьої та четвертої груп, використовуються у пожежогасінні, особливо при горінні нафти та рідких палив. У цьому випадку важливими характеристиками пін є швидкість розтікання по поверхні нафтопродукту, що горить, і їх ізолююча здатність – час запобігання виходу парів горючої рідини. Для отримання подібних високостійких пін використовують складні складки, що включають, крім основного піноутворювача, добавки інших ПАР, що додатково стабілізують піну. Значні перспективи має застосування фторзаміщених сполук.

### 3.3 Дослідження піноутворювальних властивостей піноутворювачів

В пожежогасінні значення пін виняткове, оскільки піни, які використовуються при гасінні пожеж, зазвичай містять у вигляді дисперсної фази карбон діоксид. Така піна при нанесенні на предмети, що горять, перешкоджає доступу до них повітря і сприяє загасанню вогню.

Піни є нестійкими дисперсними системами, і за певних умов піноутворення з одного об'єму різних розчинів утворюються різні об'єми піни, то до теперішнього часу немає універсального критерію, який би однозначно оцінював пінні системи в будь-яких умовах.

Основною і найбільш ефективною методикою визначення

піноутворювальної здатності розчинів є метод виливання Росса-Майлса (ДСТУ ISO 696: 2005). Цей метод прийнятий в багатьох країнах в якості стандартного [27, 28].

Піноутворювальні властивості характеризували висотою пінного стовпа  $H$ , мм та стійкстю пінни  $Sp$ , %. Кінетика піноутворення досліджуваних піноутворювачів наведена в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Динаміка піноутворення дисперсних систем

Піноутворювач	$H_0$ , мм	$H_{10}$ , мм	$H_{20}$ , мм	$H_{30}$ , мм	$H_{40}$ , мм	$H_{50}$ , мм	$H_{60}$ , мм
EXOsoft PO30 MB	113	113	113	110	110	100	100
ROSULfan OD	200	200	200	200	198	198	198
ROSULfan D911	220	220	220	210	210	210	210
ROSULfan D	180	180	180	175	175	175	175
SULFOROKAnol A325 / 1	120	120	110	110	110	100	100
ROKAmer G3800	40	38	38	38	38	35	35
ROKAnol L5P5 MB	20	20	20	18	18	16	16

Як видно з таблиці 3.3 висота пінного стовпа досліджуваних піноутворювачів знаходиться в межах від 20 до 220 мм. Спостерігається тенденція незначного руйнування дисперсної системи протягом години. Низька піноутворювальна здатність проявляється в розчинів ROKAmer G3800 (35 мм), ROKAnol L5P5 MB (16 мм), тому ці речовини не доцільно використовувати як піноутворювачі для пожежогасіння. Ефективними для дисперсних систем в пожежогасінні можуть бути ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROSULfan D, їх піноутворювальна здатність складає 198 мм, 210 мм, 175 мм відповідно.

Важливою характеристикою дисперсних систем для пожежогасіння є стійкість піни. Адже піноутворювачі повинні утримувати стабільну піну, яка зберігає свої властивості протягом тривалого періоду часу для надійного пригнічення пожежі. Стійкість дисперсних систем представлена в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Стійкість дисперсних систем

Піноутворювач	СП <sub>10</sub> , %	СП <sub>60</sub> , %
EXOsoft PO30 MB	100	88
ROSULfan OD	100	99
ROSULfan D911	100	95
ROSULfan D	100	97
SULFOROKAnol A325 / 1	100	83
ROKAmer G3800	95	88
ROKAnol L5P5 MB	100	80

Дослідження стійкості піни показали, що піноутворювачі мають високу стійкість – 100 % у перші 10 хвилин виливання розчинів. Це дуже важливо, оскільки сприятиме утворенню щільної піни на початку гасіння пожежі і локалізації полум'я. Протягом години, стійкість дисперсних систем змінюється, і становить від 80 до 99 %. Найбільшу стійкість мають піни ROSULfan OD (99 %), ROSULfan D911 (95 %), ROSULfan D (97 %).

Одержані дані корелюються з загальними теоретичними дослідженнями процесів піноутворення. Стійкість пін із розчинів неіоногенних ПАР практично завжди нижча, ніж із розчинів аніонних ПАР. Стійкість піни збільшується для оксиетильованих сполук із зростанням довжини вуглеводневого ланцюга та числа оксиетилепових груп, проте до певної міри. Якщо після досягнення деякої довжини алкільного ланцюга стійкість пін з подальшим збільшенням числа атомів вуглецю в ланцюгу знижується (менше розчинність таких сполук), то зі збільшенням числа оксиетиленових груп стійкість пін може залишатися незмінною або зменшуватися, а потім при досягненні деякого значення

залишатися постійною. Відомо, що неіоногенні ПАР з малим числом оксиетиленових груп є пеногасниками, тому їх не рекомендовано для дисперсних систем, які використовують для пожежогасіння. Вважають, що оптимальна кількість груп, що зумовлює як стабільність пін, так і піноутворювальну здатність, становить від 7 до 9. У розчинах неіоногенних ПАР максимум піноутворюючої здатності відповідає критичному гідрофільно-ліпофільному балансу (ГЛБ) його молекули.

Дослідження показують, що при збільшенні концентрації ПАР у розчині стабільність пін, як правило, підвищується, досягаючи максимального значення при критичній концентрації міцелоутворення (ККМ), потім знижується стабільність.

Зростання стійкості пін зі збільшенням концентрації ПАР до певної межі відповідає насичення адсорбційного шару [6, 22]. Наприклад, для алкілсульфатів, алкілсульфонатів і натрієвих мил максимум стабільності зсувається в сторону менших концентрацій зі збільшенням довжини радикала і стає більш розмитим.

Вплив температури на стійкість дисперсних систем пов'язаний з перебігом низки одночасних процесів. Так, при підвищенні температури збільшується випаровування розчинника та піноутворювальної речовини, залежно від концентрації піноутворювача і його будови стійкість піни може зростати або знижуватися. При підвищенні температури зменшується адсорбція ПАР, що може призвести до зниження стабільності піни, одночасно поліпшується розчинність піноутворювача, що сприяє збільшенню стійкості піни. У разі підвищення температури посилюються теплові коливання адсорбованих молекул, унаслідок чого механічна міцність поверхневого шару, утвореного молекулами піноутворювача, послаблюється. Крім того, в'язкість піноутворювального розчину знижується і відповідно збільшується швидкість закінчення рідини з піни, а також змінюються умови гідратації полярних груп піноутворювача. При підвищенні температури стійкість гідратних шарів знижується, що спричинює зменшення стійкості піни.

### 3.4 Аналіз водневого показника рН дисперсних систем

Стійкість пін із розчинів аніонних ПАР у кислому середовищі помітно збільшується, а у лужному – знижується. Наприклад, додециламінопропіонова кислота утворює піни з мінімальною стійкістю в ділянці рН від 1 до 4 залежно від її концентрації в розчині. Для сполук з коротким вуглеводневим ланцюгом характерне зниження стабільності пін у кислому середовищі та деяке збільшення – у лужному. Це зумовлено, по-іншому, впливом йонів гідрогену і гідроксила на взаємодію гідрофільних і гідрофобних частин молекул, що зрушує рівновагу між адсорбцією ПАР і міцелоутворення в той чи інший бік.

Деякі піноутворювачі можуть містити речовини для регулювання рівня рН піни, що допомагає в оптимальному функціонуванні піноутворювача. Крім того врахування показника рН важливо при застосуванні дисперсних систем в агресивних середовищах. У разі застосування піноутворювачів у важких умовах, таких як хімічні речовини чи високі температури, вони повинні бути стійкими до агресивних середовищ. Для лужних середовищ рекомендовано рН <9. В таблиці 3.5 представлені значення рН піноутворювачів.

Таблиця 3.5 – Значення рН дисперсних систем

Піноутворювач	рН
EXOsoft PO30 MB	5,5
ROSULfan OD	6,6
ROSULfan D911	6,5
ROSULfan D	6,5
SULFOROKAnol A325 / 1	7,1
ROKAmer G3800	6,0
ROKAnol L5P5 MB	6,1

За даними таблиці 3.5, дисперсні системи мають наближений до нейтрального рН. Значення водневого показника рН знаходиться в межах від 5,5

до 7,1, що дозволяє стверджувати про безпечність для здоров'я людини обраних піногасників. Крім того, досліджувані ПАР, будуть добре поєднуватися з іншими компонентами дисперсних систем для пожежогасіння.

### 3.5 Дослідження реологічних властивостей піноутворювачів

Реологічні характеристики дисперсних систем важливі для розуміння властивостей піни, що використовують для пожежогасіння. Реологічні властивості піни грають ключову роль у її ефективності та можливості застосування [19, 22]. Піноутворювачі повинні мати наступні реологічні властивості:

- низька в'язкість, щоби легко розподілятися на поверхні пожежі та швидко розповсюджуватися;
- добра текучість, що сприяє розподілу та текучості дисперсної системи, забезпечуючи рівномірне покриття об'єкта, який горить;
- стійкість піни, для забезпечення ефективності гасіння пожежі та уникнення втрат під час транспортування чи зберігання;
- Плинність, під час розпилення та розподілу на поверхню пожежі піна повинна легко плинути та адаптуватися до форми об'єкта;
- Стійкість до зниженого тиску, має зберігатися під час роботи з різними тисками, що може виникати при розпиленні та подачі піни.

Реологічні властивості дисперсних систем характеризували показниками кінетичної в'язкості та густини.

Густину досліджуваних ПАР визначали при різних температурах. Результати вимірювань представлено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Густина піноутворювачів при різних температурах

Піноутворювач	$\rho_{20}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{40}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{60}$ , кг/м <sup>3</sup>
EXOsoft PO30 MB	1100	1100	1100
ROSULfan OD	1050	1050	1050
ROSULfan D911	1050	1050	1050
ROSULfan D	1020	1020	1020
SULFOROKAnol A325 / 1	980	980	1000
ROKAmer G3800	1195	1190	1200
ROKAnol L5P5 MB	1300	1280	1300

Густина піноутворювачів в діапазоні температур від 20 до 60 °С залишається не змінною. Густина дисперсних систем становить від 980 до 1300 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає нормованим значенням (від 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup>) для піногасників в пожежогасінні. Найменша густина 980 кг/м<sup>3</sup> має SULFOROKAnol A325 / 1, оскільки вихідна речовина в'язка.

Таким чином, реологічні властивості піни можуть бути адаптовані в залежності від конкретних потреб та умов, де вона використовується для гасіння пожеж. А також визначатимуть функціональність та ефективність систем протипожежного захисту.

Кінематичну в'язкість визначали візкозиметричним методом при температурах 20 °С, 40 °С, 60 °С. Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 3.7.

За даними таблиці 3.7, піноутворювачі мають невисоку в'язкість. При підвищенні температури в'язкість незначно зменшується. Для збільшення в'язкості дисперсних систем можна додавати загусники.

Для стабілізації дисперсних систем використовують введенням в розчин карбоксиметилцелюлози, амідів, полівінілового спирту та ін. Крім цього, ці речовини, збільшуючи в'язкість розчину і плівок, сприяють уповільненню процесу закінчення рідини. Піни з розчинів натрію алкілсульфатів стабілізують

жирними спиртами та деякими ефірами, у присутності яких різко знижується проникність плівок для повітря та збільшується в'язкість поверхневого шару, проте це проявляється у дуже вузькій області концентрацій подібних стабілізаторів.

Таблиця 3.7 – Кінематична в'язкість піноутворювачів

Піноутворювач	$\nu_{20}, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu_{40}, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu_{60}, \text{м}^2/\text{с}$
EXOsoft PO30 MB	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$
ROSULfan OD	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$
ROSULfan D911	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$	$0,51 \cdot 10^{-6}$
ROSULfan D	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$0,32 \cdot 10^{-6}$
SULFOROKAnol A325 / 1	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$
ROKAmer G3800	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$0,25 \cdot 10^{-6}$	$0,20 \cdot 10^{-6}$
ROKAnol L5P5 MB	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \cdot 10^{-6}$	$0,40 \cdot 10^{-6}$

Дослідження механізму дії спиртів нормальної будови як стабілізаторів вільних плівок та пін при використанні піноутворювача натрію лаурилсульфату показав, що найбільша стійкість плівок визначається високою поверхневою в'язкістю і досить високою швидкістю адсорбції стабілізатора. Ці два фактори сумарно зумовлюють максимум стійкості плівок, що відповідає середній довжині ланцюга спирту ( $C_1$ - $C_{12}$ ) як стабілізатора. Молекули ПАР за його концентрації вище ККМ взаємодіють зі стабілізатором (спиртом), утворюючи конденсовані шари, куди входять молекулярні комплекси. При адсорбції та десорбції відбувається перенесення комплексу, причому мала швидкість адсорбції може бути обумовлена великим обсягом комплексу (порівняно з обсягом індивідуальних молекул).

Стабілізатори викликають значне зниження ККМ розчину ПАР. Найбільш ефективні ті, в молекулі яких є нерозгалужена ланцюг і полярні групи, здатні

утворювати водневі зв'язки з молекулами води (-ОН, -КН<sub>2</sub>, = NH та ін). Якщо в розчині містяться ПАР різного типу ефект стабілізації може збільшуватися за рахунок підвищення розчинності ПАР.

Для розчинів натрію олеату та карбоксилатів кислот гірчичної олії залежність стійкості піни від концентрації розчину ПАР характеризується двома максимумами стійкості. Причому якщо перший максимум стійкості відповідає концентраціям, що практично наближені до ККМ для розчинів, то другий максимум стійкості і її подальше зниження в області високих концентрацій, пов'язані, ймовірно, зі зміною структури насичених адсорбційних шарів ПАР на межі газ – рідина. Зазначена закономірність проявляється при рН>9 у розчинах лужних солей насичених карбонових кислот, отриманих з олії.

Ступінь насичення адсорбційного шару для стабільності плівок і пін, сприяє тому, що стійкість бульбашок і пін в розчинах міцелоутворювальних ПАР різко збільшується при досягненні насичення адсорбційного шару аж до ККМ.

Для розчинів жирної кислоти і жирного спирту стабільність піни залежить від кількісного співвідношення цих речовин і рН. Наприклад, при рН = 9 і мольному співвідношенні кислоти та спирту 1 : 1 (деканова кислота та деканол) стабільність піни мінімальна. Так як у цих умовах площа, що припадає на одну молекулу, більша, ніж при рН, що дорівнює 8 і 10, науковці вважають, що стабільність піни зменшується через зниження в'язкості поверхневого шару, що складається з різних молекул, а можливо, і з міцел [6, 7, 22].

Додавання електролітів також впливає на стабільність піни, для 0,1 % розчинів натрію лаурату (рН=10). Найбільш сильні піностабілізуювальні властивості мають фосфат іони. З катіонів, вплив яких взагалі значно менше, ніж аніонів, більш активно стабілізують піну іони цезію. Стабілізуючий ефект іонів калію, натрію та особливо літію менший. Стабілізуючий вплив електролітів обумовлено електричними явищами у поверхневому шарі. Для пін з додаванням електролітів фактором стійкості є ступінь гідратації іонів.

Також додавання електролітів дуже впливає на стабільність бульбашок піни. Якщо адсорбційний шар не насичений молекулами ПАР, введення

електроліту дещо підвищує стабільність бульбашок. При концентрації ПАР, що забезпечує насичення адсорбційного шару або перевищує його, додавання натрію хлориду різко знижує стабільність бульбашок. Не виключено, що цей факт пояснюється утворенням на міжфазній поверхні мікрокрапель ПАР (мікрогетерогенність поверхні). Внаслідок зменшення концентрації ПАР у розчині поверхневий натяг його підвищується.

Зустрічаються рецептури дисперсних систем на основі ПАР різних класів для пожежогасіння з додаванням амінокислот як стабілізуючих добавок. У розчинах аніоноактивних речовин найбільша стабільність відзначається при співвідношенні амінокислоти та ПАР 1:1. У розчинах неіоногенних і катіонних ПАР це співвідношення знижується до 0,125:1. Максимальна стабільність буде проявляється в ділянці рН, що відповідає ізоелектричному стану амінокислот.

### 3.6 Аналіз кратності піноутворювачів

Піни є грубодисперсними висококонцентрованими системами. Об'ємний вміст дисперсійного середовища зазвичай характеризують кратністю піни, тобто відношенням об'єму піни до об'єму дисперсійного середовища.

На кратність піни впливають: природа та концентрація піноутворювача, конструкція піноутворювальних апаратів. Великий вплив на кратність дисперсних систем має також температура повітря, що входить до складу бульбашок. Чим більша температура цього повітря, тим менша кратність. Прогрівання повітря до 200 °С знижує кратність піни на 50 % і більше.

Певний вплив на стабільність пін має природа газової фази. Час руйнування стовпа піни може різнитися у 10 і більше разів, якщо для процесу піноутворення використовували водень та аргон. Оскільки водень дає найменш стійку піну, а аргон найбільш стійку. Це пояснюється відмінністю відносної щільності цих газів і коефіцієнта дифузії молекул ( $D$ ) в рідких плівках. Крім того, стійкість пін залежить від розчинності газу в рідині ( $L$ ). Так, стійкість пін (виражена через зміну середнього діаметра бульбашок), заповнених  $Ar$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  і

повітрям, обернено пропорційна добутку DL. Відносно вуглеводнів чіткої кореляції немає, проте якісно зазначена залежність зберігається.

Вологість повітря також впливає на стабільність пін. При обдуванні повітрям дуже високої вологості піна практично не руйнувалася, тоді як підсушене повітря ( $\varphi = 38 \%$ ) викликало руйнування половини стовпа піни протягом 10 хв. Дані про вплив випаровування на стійкість пін дозволяють прогнозувати поведінку дисперсних систем в реальних умовах використання.

На практиці піни часто взаємодіють з різними твердими тонкодисперсними, речовинами. Стійкість трифазних пін значно вище, ніж двофазних. Так, піни на основі мил, що містять полірувальний порошок, значно стійкіші за піни без порошку. Іноді піни утворюють жорсткий каркас, здатний зберігатися тривалий час. Тонкодисперсні тверді речовини можуть також сприяти руйнуванню піни. Наприклад, гідроксиди металів (при певних концентраціях) є стабілізаторами пін, а сульфідні зменшують їхню стабільність, хоча й незначною мірою.

Стабілізацію трифазних дисперсних систем пов'язують з механічним зміцненням плівок піни в результаті їхнього насичення частинками твердої фази. Це може бути навіть у тому випадку, коли дрібнодисперсних частинок недостатньо для повного покриття бульбашок. Вважають також, що тверді частинки закупорюють канали Плато - Гіббса, зменшуючи тим самим швидкість закінчення рідини.

Вплив твердої фази на стійкість пін залежить від концентрації піноутворювача. При невеликому вмісті піноутворювача (близько 0,1 %) введення твердої фази викликає різке підвищення стійкості пін з одночасним збільшенням швидкості витікання рідини. При високих концентраціях піноутворювача (1 %) вплив твердої фази менш помітний: збільшення стабільності, а також деяке уповільнення швидкості витікання рідини незначне. Цю відмінність пояснюють тим, що при малих концентраціях ПАВ більша його частина адсорбується на поверхні частинок твердої фази, внаслідок чого зменшується концентрація ПАВ у розчині і відповідно збільшується поверхневий

натяг останнього, що спричиняє прискорення процесу закінчення рідини з пін. При концентраціях ПАР значно більших ККМ частка речовини, адсорбованої твердою фазою, незначна порівняно із загальним вмістом ПАР у розчині. Тому збільшення стійкості трифазної піни та зниження швидкості витікання розчину обумовлено звуженням та закупоркою каналів Плато – Гіббса.

Для розчинів органічних рідин з обмеженою взаємною розчинністю характерно наявність двох областей максимальної стабільності піни: області істинної (молекулярної) розчинності при малих концентраціях ПАР та області розшарування рідин при вмісті ПАР понад 50 %. Подібна поведінка неводних розчинів пояснюється значними змінами структури, що відбуваються в підшарі. В ділянці істинної розчинності підшар складається з ПАР, а при концентрації > 50 % у ньому переважає поверхнево-інактивну речовину.

Стійкість плівок, отже, і пін, отриманих з неводних розчинів, лінійно залежить від зворотної величини капілярного тиску. Є три області стійкості плівок залежно від капілярних тисків: відсутність стійкості, область кінетичної нестійкості та метастабільного стану, при якому стійкість піни необмежено зростає. Області кінетичної нестійкості відповідає тривалість життя плівки, що визначається капілярним тиском.

Із плином часу, кратність піни збільшується, оскільки вода відділяється швидше, ніж із піни виходить повітря, тому кількість піни стає меншою, а кратність її – більшою.

Піни низької кратності застосовують переважно для гасіння здебільшого твердих горючих матеріалів. Такі піни добре змочують поверхню і розтікаються по ній.

Найбільш широке застосування знайшли піни середньої кратності. Такі піни – основний засіб гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів. При гасінні, піну подають на окремі ділянки поверхонь рідини, що горить. Із цих ділянок піна поступово розтікається по всій поверхні. При цьому, у протиріччя вступають два процеси: піна, злита на якусь ділянку товстим шаром, намагається поширитися

на сусідні ділянки, з тим, щоб створити шар рівномірної товщини. Оптимальним при припиненні горіння нафтопродуктів є піни з кратністю від 70 до 159.

Піни високої кратності застосовуються при об'ємному гасінні пожеж, коли піною заповнюють підвал, вузькі місця, наприклад канал, тунель, трюм та ін. Дослідження кратності піни протягом часу наведено в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Кратність дисперсних систем

Піноутворювач	$\beta$	$\beta_{10}$	$\beta_{20}$	$\beta_{30}$	$\beta_{40}$	$\beta_{50}$	$\beta_{60}$
EXOsoft PO30 MB	11,3	11,3	11,3	11	11	10	10
ROSULfan OD	20	20	20	20	19,8	19,8	19,8
ROSULfan D911	22	22	22	21	21	21	21
ROSULfan D	18	18	18	17,5	17,5	17,5	17,5
SULFOROKAnol A325 / 1	12	12	11	11	11	10	10
ROKAmer G3800	4	3,8	3,8	3,8	3,8	3,5	3,5
ROKAnol L5P5 MB	2	2	2	1,8	1,8	1,6	1,6

Результати експериментальних досліджень, показали, що кратність дисперсних систем складає від 2 до 22. Це означає, що EXOsoft PO30, ROSULfan D, ROKAmer G3800, SULFOROKAnol A325/1, ROKAnol L5P5 MB утворюватимуть піни низької кратності (кратність не більше 20). А ROSULfan OD, ROSULfan D911 утворюватимуть дисперсні системи середньої кратності. (від 21 до 200). Для коригування кратності дисперсних систем необхідно змінювати концентрацію розчинів, способи подачі піни, температуру розчинів.

### 3.7 Екологічні аспекти застосування піноутворювачів

Щоб не завдавати шкоди навколишньому середовищу та здоров'ю людей піноутворювачі повинні бути безпечними. За даними таблиці 3.2, обрані піногасники мають високий ступінь біорозкладу та відповідають критеріям біологічного розкладання, Регламенту (ЄС) № 648/2004.

З метою визначення впливу дисперсних систем на живі організми, проводили біотестування рослин. В якості об'єкту біотестування використовували ряску малу. Результати біотестування протягом 14 діб, наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Біотестування дисперсних систем

Піноутворювач	Кількість загиблих рослин, %						
	1 доба	3 доба	5 доба	7 доба	9 доба	11 доба	14 доба
EXOsoft PO30 MB	0	0	0	0	0	0	0
ROSULfan OD	0	0	0	0	0	0	0
ROSULfan D911	0	0	0	0	0	0	0
ROSULfan D	0	0	0	0	0	0	0
SULFOROKAnol A325 / 1	0	0	0	0	0	0	0
ROKAmer G3800	0	0	0	0	0	0	0
ROKAnol L5P5 MB	0	0	0	0	0	0	0

Результати біотестування підтверджують екологічну безпеку застосування піногасників для пожежогасіння. Під час експерименту всі особини ряски залишилися без змін кольору, структури листочків, їх еластичності.

Отже, застосування піноутворювачів надає необхідні фізико-хімічні та функціональні властивості дисперсним системам. Аналіз експериментальних

даних свідчить про те, що ефективними піноутворювачами в процесах піногасіння є ROSULfan D, ROSULfan OD, ROSULfan D911. Ці піногасники утворюють густу, щільну піну. Мають високу стабільність та в'язкість дисперсних систем. Рекомендовані для утворення дисперсних системи середньої кратності. Екологічна безпека обраних піноутворювачів підтверджена результатами біотестування.

## ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проаналізовано особливості застосування, сучасні вимоги до дисперсних систем для пожежогасіння. Здійснено аналіз компонентів дисперсних систем для пожежогасіння. Досліджено вплив піноутворювачів на властивості дисперсних систем для пожежогасіння.

Кваліфікаційна робота складається вступу, трьох розділів, висновків. В першому розділі здійснено огляд літератури особливостей систем для пожежогасіння. Детально описано світові тенденції застосування дисперсних систем та перспективи їх розвитку. У другому розділі наведено об'єкти, методи та методики досліджень. У третьому розділі визначено показники ефективності піноутворювачів та здійснено порівняльний аналіз їх впливу на фізико-хімічні, функціональних властивості дисперсних систем. Рекомендовано компоненти для створення дисперсних систем низької та середньої кратності.

Підбір компонентів піноутворювачів на основі фізико-хімічних та функціональних властивостей, дозволяє коригувати та адаптувати дисперсні системи для пожежогасіння відповідно до класу пожеж і способів їх ліквідації. Використання біорозкладних піноутворювачів, в складі дисперсних систем для пожежогасіння, сприяє покращенню екологічних показників процесу.

В експериментальних дослідженнях використано сучасні аніоноактивні та неіоногенні ПАР, які можуть застосовуватися як ефективні піноутворювачі для дисперсних систем для пожежогасіння. А саме, EXOsoft PO30, ROSULfan D, ROKAmer G3800, SULFOROKAno1 A325/1, ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROKAno1 L5P5 MB, виробництва PCC Group (Польща).

Піноутворювальні властивості характеризували висотою пінного стовпа  $H$ , мм та стійкістю пінни  $Sp$ , %. Висота пінного стовпа досліджуваних піноутворювачів знаходиться в межах від 20 до 220 мм. Спостерігається тенденція незначного руйнування дисперсної системи протягом години. Низька піноутворювальна здатність проявляється в розчинів ROKAmer G3800 (35 мм), ROKAno1 L5P5 MB (16 мм), тому ці речовини не доцільно використовувати як піноутворювачі для пожежогасіння. Ефективними для дисперсних систем в

пожежогасінні можуть бути ROSULfan OD, ROSULfan D911, ROSULfan D, їх піноутворювальна здатність складає 198 мм, 210 мм, 175 мм відповідно.

Дослідження стійкості піни показали, що піноутворювачі мають високу стійкість – 100 % у перші 10 хвилин виливання розчинів. Це дуже важливо, оскільки сприятиме утворенню щільної піни на початку гасіння пожежі і локалізації полум'я. Протягом години, стійкість дисперсних систем змінюється, і становить від 80 до 99 %. Найбільшу стійкість мають піни ROSULfan OD (99 %), ROSULfan D911 (95 %), ROSULfan D (97 %).

Досліджувані дисперсні системи мають наближений до нейтрального рН. Значення водневого показника рН знаходиться в межах від 5,5 до 7,1, що дозволяє стверджувати про безпечність для здоров'я людини обраних піногасників.

Густина піноутворювачів в діапазоні температур від 20 до 60 °С залишається не змінною. Густина дисперсних систем становить від 980 до 1300 кг/м<sup>3</sup>, що відповідає нормованим значенням (від 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup>) для піногасників в пожежогасінні. Найменша густина 980 кг/м<sup>3</sup> має SULFOROKAnol A325 / 1, оскільки вихідна речовина в'язка.

Кінематичну в'язкість визначали візкозиметричним методом при температурах 20 °С, 40 °С, 60 °С. Піноутворювачі мають невисоку в'язкість. При підвищенні температури в'язкість незначно зменшується. Для збільшення в'язкості дисперсних систем можна додавати загусники.

Результати експериментальних досліджень, показали, що кратність дисперсних систем складає від 2 до 22. Це означає, що EXOsoft PO30, ROSULfan D, ROKAmer G3800, SULFOROKAnol A325/1, ROKAnol L5P5 MB утворюватимуть піни низької кратності (кратність не більше 20). А ROSULfan OD, ROSULfan D911 утворюватимуть дисперсні системи середньої кратності. (від 21 до 200). Для коригування кратності дисперсних систем необхідно змінювати концентрацію розчинів, способи подачі піни, температуру розчинів.

Застосування піноутворювачів надає необхідні фізико-хімічні та функціональні властивості дисперсним системам. Аналіз експериментальних даних свідчить про те, що ефективними піноутворювачами в процесах піногасіння є ROSULfan D, ROSULfan OD, ROSULfan D911. Ці піногасники утворюють густу, щільну піну. Мають високу стабільність та в'язкість дисперсних систем. Рекомендовані для утворення дисперсних системи середньої кратності. Екологічна безпека обраних піноутворювачів підтверджено результатами біотестування.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Державна служба з надзвичайних ситуацій України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dsns.gov.ua/> (дата звернення 15.09.2023).
2. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://idundcz.dsns.gov.ua/uk> (дата звернення 15.09.2023).
3. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2004): Наказ МНС України № 126 від 19.10.2004 р.
4. Пожежна безпека. Загальні положення. ДСТУ 8828:2019. Національний стандарт України. Київ ДП «УкрНДНЦ». – 84 с.
5. Потребко Р.С. Пожежна тактика і тактика дій підрозділів при ліквідації надзвичайних ситуацій: Навчальний посібник. Р. С. Потребко, Р. З. Борисюк, Б. В. Костишин, А. Й. Павелко. – Івано-Франківськ: Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Івано-Франківської області. – 2014. – 89 с.
6. Великонська Н.М. Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник. Великонська Н.М., Надточій А.А. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 78 с.
7. Поверхневі явища і дисперсні системи : навч. посіб. / О. П. Некрасов, Б. А. Веретенченко. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – 112 с.
8. Хімія смаку, кольору і запаху: навч. посібник / укл. Борук С. Д., Дійчук В. В., Воробець М. М., Сема О. В., Чернівці: Чернівецький нац. ун-т ім. Юрія Федьковича, 2020. – 80 с.
9. ДСТУ EN 1568-3:2018 (EN 1568-3:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.
10. ДСТУ EN 1568-1:2018 (EN 1568-1:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 1. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною середньої кратності, що подається на поверхню.

11. ДСТУ EN 1568-2:2018 (EN 1568-2:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 2. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною високої кратності, що подається на поверхню.
12. Світова статистика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fire-suppression-system-market> (дата звернення 20.09.2023).
13. NFPA 921, Guide for fire and explosion investigations (2024). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nfpa.org/product/nfpa-921-guide/p0921code> (дата звернення 20.09.2023).
14. Бондаренко, Є. А. Пожежна безпека [Текст] : навчальний посібник / Є. А. Бондаренко ; ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 109 с.
15. ДСТУ EN 1568-4:2018 (EN 1568-4:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.
16. ДСТУ 8615:2016 Пожежна безпека. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Настанови щодо поводження з вогнегасними речовинами, використовуваними у стаціонарних системах пінного пожежогасіння.
17. Параска О.А. Технічна експертиза, стандартизація сировини та товарної продукції/ Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів III курсу напрямку підготовки 6.051301 хімічна технологія (галузь знань 16 Хімічна технологія та біоінженерія спеціальність 161 Хімічна технологія та інженерія). – 2016. – С.74 с.
18. Paraska O. Research of the foaming characteristics of surfactant solution // O. Paraska, S. Karvan, T. Rak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – № 3/6. – С. 36-41.
19. D. Langevin, "Influence of interfacial rheology on foam and emulsion properties", Adv. Colloid Interface Sci., 2000. – 88. – 209-222.

20. Schramm, L. Laurier. Surfactants and their applications [Text] / Laurier L. Schramm, Elaine N. Stasiuk and D. Gerrard Marangoni // Annu. Rep. Prog. Chem., Sect. – 2003. – № 99 – P. 3 – 48.

21. Bernard E. Obi. Polymeric Foams Structure-Property-Performance / Bernard E. – William Andrew, 2017. – 410 p.

22. Weaire D. L. The physics of foams : / D. L. Weaire, S. Hutzler. – Oxford University Press, 2001. – 246 p.

23. Weidema B. P. Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. / Weidema B.P, Bauer C., Hischer R., Mutel C., Nemecek T., Reinhard J., Vadenbo C. O., Wernet G. / Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre © Swiss Centre for Life Cycle Inventories / 2009-2013. – 169 P.

24. ISO 14044: 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.iso.org/standard> (дата звернення: 4.10.2023).

25. PCC Group [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.products.pcc.eu/> (дата звернення: 4.10.2023).

26. RSPO сертифікація [Електронний ресурс]. Режим доступу: [www.rspo.org](http://www.rspo.org) (дата звернення: 4.10.2023).

27. Абаржі І. І. Особливості процесів тепломасопереносу в полідисперсних пористих середовищах. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14. 06. – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, 2004.

28. S.C. Russev, N. Alexandrov, K.G. Marinova, K.D. Danov, N. D. Denkov, L. Lyutov, V. Vulchev, C. Bilke-Krause, "Instrument and methods for surface dilatational rheology measurements", Rev. Sci. Instr. 2008. – 79. P. 104102.

29. Дідух Я. П. Основи біоіндикації. – К.: Наук. думка, 2012. – 344 с.

30. Мусієнко М.М. Фітоіндикація та фітомоніторинг / М.М.Мусієнко // Екологія рослин: підручник / М.М.Мусієнко. – К., 2006. – С. 344-404.

31. Параска О.А. Розвиток наукових основ ресурсощадних технологій очищення текстильних виробів у водному середовищі. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.19 – технологія текстильних матеріалів, швейних і трикотажних виробів. – Хмельницький національний університет Міністерства освіти і науки України, Херсонський національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Херсон, 2021.

32. Івасишен С. Д. Диференціальні рівняння: методи та застосування: навч. посіб. / С.Д. Івасишен, В.П. Лавренчук, П.П. Настасієв, І.І. Дрінь. – Чернівці: Чернівецький нац.. ун-т, 2010. – 288 с.