

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**ВИКОРИСТАННЯ  
КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ  
ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А**

*Монографія*

**Харків 2023**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**ВИКОРИСТАННЯ  
КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ  
ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А**

*Монографія*

**Харків 2023**

Рекомендовано до друку  
вченою радою НУЦЗ України  
(протокол від 23.06.2022 № 8 )

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор **Р. Г. Мелещенко**  
доктор технічних наук, професор **О. О. Ларін**

УДК 614.8

**Використання** компресійної піни для гасіння пожеж класу А: монографія / С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. І. Кодрик, О. М. Тітенко. – Харків, вид-во "Друкарня Мадрид" 2023. – 160 с.

ISBN 978-617-8254-29-2

У монографії проведено аналіз використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А, аналіз існуючих систем і патентних джерел систем генерування та подавання компресійної піни та особливостей їх використання. Проведено аналіз існуючих способів змішування повітря та розчину піноутворювача у системах для генерування та подавання компресійної піни. Розглянуто статичні змішувачі з різними конструктивними особливостями, які можуть бути використані для генерування компресійної піни.

Розроблено та запропоновано математичну модель процесу генерування компресійної піни, яка дозволяє надалі виконувати проектування експериментального зразка системи для генерування та подавання компресійної піни. Проведено експериментальні дослідження впливу кратності та концентрації водного розчину піноутворювача «БАРС-S» у компресійній піні на її властивості. Отримано результати, що стосуються визначення вогнегасної ефективності компресійної піни, під час гасіння лабораторних (не стандартизованих) осередків класу А, за показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння, в залежності від кратності та концентрації водного розчину піноутворювача у компресійній піні. Надано рекомендації щодо застосування систем компресійної піни в підрозділах Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Запропоновано конструкцію переносної системи пожежогасіння компресійною піною, що може бути розроблена та впроваджена у роботу практичних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Монографія орієнтована на наукових і практичних працівників органів та підрозділів служби цивільного захисту, викладачів, ад'юнктів і здобувачів вищої освіти.

УДК 614.8

ISBN 978–617–8254–29–2

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов,  
А. І. Кодрик, О. М. Тітенко, 2023  
© Друкарня Мадрид, 2023

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	6
<b>Розділ 1. Аналіз методів гасіння пожеж класу А та використання компресійної піни</b> .....	9
1.1 Аналіз пожеж класу А та способів гасіння.....	9
1.2 Аналіз використання води для гасіння пожеж .....	12
1.3 Аналіз використання повітряно-механічної піни для гасіння пожеж.....	14
1.4 Аналіз використання компресійної піни для гасіння пожеж.....	17
<b>Розділ 2. Математичне обґрунтування та розробка технічного рішення для генерування і подавання компресійної піни</b> .....	33
2.1 Розробка математичної моделі процесу генерування і подавання компресійної піни.....	33
2.1.1 Блок подачі газу (згідно Блок-схеми ММ: «Air»).....	34
2.1.2 Блок подачі суміші води та піноутворювача (згідно Блок-схеми ММ: «Liquid») .....	35
2.1.3 Блок руху піни у шлангу (згідно Блок-схеми ММ: «Pipe»).....	36
2.1.4 Блок піногенератора (згідно Блок-схеми ММ: «Generator») .....	40
2.1.5 Розробка системи комунікації між блоками .....	45
2.1.6 Функціонування блок-схеми ММ процесу генерування КП.....	47
2.2 Розробка експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни .....	51
2.3 Перевірка теоретичних та практичних результатів математичної моделі процесу генерування та подавання КП.....	55
2.4 Висновки .....	56
<b>Розділ 3. Експериментальні дослідження властивостей компресійної піни та її вогнегасної ефективності</b> .....	58
3.1 Експериментальні дослідження впливу кратності компресійної піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни.....	59
3.2 Експериментальні дослідження впливу кратності та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для генерування компресійної піни, на її вогнегасну ефективність під час гасіння нестандартизованих осередків пожеж класу А.....	74
3.3 Визначення показників ефективності гасіння та вогнегасної здатності.....	88

3.4 Порівняння двох показників вогнегасної ефективності компресійної піни між собою.....	94
3.5 Експериментальні дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни, води та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандартизованих модельних осередків пожежі класу А.....	97
3.6 Висновки .....	105
<b>Розділ 4. Перспективи впровадження систем генерування і подавання компресійної піни для підрозділів ДСНС.....</b>	<b>107</b>
4.1 Рекомендації щодо застосування компресійної піни в підрозділах ДСНС .....	107
4.2 Переваги застосування КП у порівнянні з водою та гелеутворюючими системами.....	114
4.3 Висновки .....	115
<b>Висновки .....</b>	<b>116</b>
<b>Список використаних джерел.....</b>	<b>118</b>
<b>Додатки .....</b>	<b>130</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- АЗС – автозаправні станції
- ВР – вогнегасна речовина
- ГР – горючі рідини
- ГУС – гелеутворюючі системи
- ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій
- КП – компресійна піна
- ЛЗР – легкозаймісті рідини
- ММ – математична модель
- ОРС ЦЗ – Оперативно-рятувальна служба цивільного захисту
- ПТЗКП – переносні технічні засоби для генерування і подавання компресійної піни
- ПУ– піноутворювач
- ТГМ – тверді горючі матеріали
- AFFF – Aqueous Film-Forming Foam Concentrates (фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі)
- CAF – compressed air foam (компресійна піна)
- CAFS – compressed air foam system (система генерування і подавання компресійної піни)

## ВСТУП

Проблема, пов'язана з гасінням пожеж, є повсякчас актуальною й постійно потребує вивчення та пошуку вирішення. Щороку найбільша кількість пожеж відбувається в житловому секторі, де основним горючим навантаженням є тверді горючі речовини. Пожежі, під час яких відбувається горіння таких речовин, відносяться до пожеж класу А.

Як основну вогнегасну речовину для боротьби з такими пожежами використовують воду. Вона є найбільш поширеною вогнегасною речовиною, є зручною у використанні та має безумовну перевагу з економічної точки зору, в порівнянні з іншими вогнегасними речовинами. Але, незважаючи на це, вона має суттєвий недолік – під час гасіння твердих горючих речовин відбувається надлишкове її використання. Є інформація, що більшість сучасних технічних засобів використовують на гасіння пожежі лише 5–10 % води, а 90–95 % фактично залишається марно пролитою.

Одним із напрямів підвищення ефективності гасіння пожеж класу А є застосування компресійної піни. Компресійна піна має ряд переваг у порівнянні з іншими вогнегасними речовинами: за рахунок технології перемішування утворюється піна, яка є високодисперсною й однорідною, що робить її більш стійкою; за допомогою пристрою дозування можна регулювати відношення компонентів водного розчину піноутворювача, що надає можливість утворювати піну необхідної кратності, як «суху», так і «мокру»; стає можливим застосування компресійної піни для гасіння електрообладнання під напругою за рахунок утворення піни з низьким вмістом рідкої фази.

Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з вивченням вогнегасної піни, у тому числі компресійної, було проведено такими вченими, як Кодрик А.І., Ковалишин В.В., Боровиков В.О., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Грачулин А.В., Кректунов А.А., Федяєв В.Д., Carey W.M., Colletti D.J., Huiqing L., Liebson J.L.

В роботах згаданих авторів розглянуто застосування піни для гасіння пожеж ЛЗР. Ряд досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння ТГМ, але поза увагою залишилося дослідження впливу кратності і вмісту піноутворювача у водному розчині, що використовується для генерування компресійної піни, на її властивості та визначення, яка кратність та концентрація піноутворювача для піни забезпечує найбільшу вогнегасну ефективність під час гасіння пожеж класу А.

Отже, питання використання компресійної піни для гасіння твердих горючих матеріалів залишається недостатньо вивченим, потребує подальших досліджень і є актуальною науково-прикладною задачею.

Монографія присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі у галузі пожежної безпеки – підвищенню ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А за рахунок варіювання її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача.

В монографії викладено результати розв'язання комплексу задач фундаментального та прикладного характеру:

- проведено аналіз методів щодо гасіння пожеж класу А;
- розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни;
- розроблено експериментальний зразок системи генерування і подавання компресійної піни;
- визначено вплив кратності та концентрації водного розчину піноутворювача в компресійній піні на її властивості;
- експериментальним шляхом досліджено вплив кратності та концентрації водного розчину піноутворювача в компресійній піні на її вогнегасну ефективність під час гасіння лабораторних модельних осередків пожежі класу А;
- порівняно ефективність застосування компресійної піни для гасіння стандартизованих модельних осередків класу А з ефективністю застосування з цією метою водних вогнегасних речовин (води та гелеутворюючих систем);
- обґрунтовано положення і розроблено рекомендації щодо застосування систем пожежогасіння компресійною піною для підрозділів.

Отримані результати висвітлено у наступних наукових працях: у роботах [1, 2] проведено аналіз існуючих систем для генерування і подавання компресійної піни серед відомих виробників систем пожежогасіння, виділено та проаналізовано основні напрями застосування компресійної піни; в [3] на підставі проведеного аналізу виявлено, що на території України не ведуться роботи щодо розробки систем для генерування і подавання компресійної піни, запропоновано конструкцію переносної системи пожежогасіння компресійною піною, що може бути розроблена та впроваджена у діяльність практичних підрозділів ДСНС України; проведено оціночний розрахунок кількості повітря, необхідного для піноутворення, розроблено технічні вимоги до переносного модуля пожежогасіння компресійною піною для підрозділів ДСНС; в [4] проведено аналіз статичних змішувачів, які використовуються для процесу генерування піни в системах CAFS, виділено основні типи насадкових елементів для отримання більш однорідної піни; в [5] запропоновано функціонально-фізичну схему системи для генерування і подавання компресійної піни, що є підґрунтям для подальшої побудови математичної моделі процесу для генерування і подавання компресійної піни; у роботах [6–8] розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни за допомогою програмного забезпечення. Розроблена математична модель дозволяє проводити технічний розрахунок параметрів системи для генерування і подавання компресійної піни з урахуванням її вимог, здійснювати розрахунки параметрів системи залежно від кратності піни, яку необхідно отримати, дозволяє досліджувати вплив параметрів піногене-



руючої вставки на кратність компресійної піни; у [9, 10] запропоновано оригінальний пінозмішувач для генерування компресійної піни; у [11] на основі математичної моделі [6–8] спроектовано та розроблено експериментальну систему для генерування і подавання компресійної піни з використанням змішувача [9]; у роботах [12, 13] за допомогою дослідного зразка системи [11] проведено експериментальні дослідження щодо визначення впливу кратності піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни, встановлено ряд недосліджених залежностей, а саме: для піни більшої кратності має місце і більша її стійкість, зі збільшенням кратності відбувається зменшення розміру бульбашки, що приводить до збільшення тривалості її існування, наслідком чого є утворення високодисперсної стійкої піни, підтверджено, що отримана піна має рівномірну високоструктуровану будову з однаковими розмірами бульбашок; у [14, 15] проведено експериментальні дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею нестандартизованих (лабораторних) модельних осередків пожежі класу А. Встановлено вплив кратності піни та вмісту піноутворювача у водному розчині на вогнегасну ефективність компресійної піни, яка оцінювалася за показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння; в [16] проведено порівняння показників вогнегасної ефективності компресійної піни відповідно до результатів, отриманих у [14, 15]; у роботах [17, 18] виконано експериментальне дослідження щодо порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни, гелеутворюючих систем та води під час гасіння ними стандартизованих модельних осередків пожежі класу А. Встановлено, що компресійна піна має найбільшу вогнегасну здатність за показником ефективності гасіння.

Монографія може бути рекомендована для викладачів, ад'юнктів, аспірантів та здобувачів вищих навчальних закладів під час вивчення навчальних дисциплін за напрямками: «Пожежна безпека», «Цивільний захист», а також для науково-практичних працівників і фахівців зазначених напрямів.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

### 1.1 Аналіз пожеж класу А та способів гасіння

Згідно [19] пожежі класу А – це тип пожеж, що супроводжуються горінням твердих матеріалів, зазвичай органічного походження, під час горіння яких, як правило, утворюються тліючі вуглини. Твердими називаються матеріали, температура плавлення і розкладання яких перевищує 50 °С, а також речовини, які не мають температури плавлення [20].

Тверді речовини і матеріали є найбільш поширеними у виробництві, народному господарстві та побуті. В наш час, поряд із матеріалами природного походження, широке застосування знаходять тверді речовини, які одержують синтетично. Світове виробництво полімерів подвоюється через кожні п'ять років [21]. До таких речовин відносять матеріали, виготовлені на основі целюлози, деревини, бавовни, бавовняні тканини, папір; речовини на основі вуглеводнів та їх похідних – гуми, пластмаси, хімічних волокон і тканин із них. Великою проблемою в цей час є і пожежі природних матеріалів – таких як продукти харчування – зерна і зернопродуктів, жирів, цукру тощо. Незважаючи на велику роботу з вогнезахисту природних і особливо штучних матеріалів, основна їх маса належить до групи горючих. Ця обставина є однією з причин неухильного зростання кількості пожеж твердих горючих матеріалів і збільшення збитків від них.

Горіння ряду твердих горючих матеріалів супроводжується утворенням вуглистою шару. Це деревина, пластмаси, матеріали на основі целюлози, зшиті полімерні матеріали – реактопласти. Для них є характерними два види горіння – гомогенне (полум'яне) і гетерогенне (тління) [22]. Їх співвідношення залежить від інтенсивності тепло-та газообміну біля поверхні горіння. У процесі горіння вуглистий шар акумулює значну кількість теплоти. Температура його поверхні сягає 600–700 °С [19], що є достатнім для запалювання горючих газових сумішей. В результаті для твердих горючих матеріалів зниження температури горіння до температури загасання без охолодження прогрітого шару є умовою гасіння, необхідною, але недостатньою, оскільки прогрітий шар конденсованої фази (твердої речовини або розплаву) здатний протягом деякого часу виділяти нагріті продукти розкладання і випаровування в зону горіння і бути джерелом їх займання.

Виходячи з [22], за умови, достатні для припинення горіння пожеж твердих горючих матеріалів, з точки зору фізико-хімічних процесів горіння, приймаються умови зниження температури цих матеріалів нижче температури початку їх піролітичного розкладання.

Механізм припинення горіння під час пожежі значною мірою залежить від виду і режиму горіння, зовнішніх умов, вихідного стану горючої речовини та багатьох інших чинників. Від механізму і способу припинення горіння залежить вибір вогнегасної речовини, необхідна її кількість, інтенсивність подавання та інші чинники, що визначають, у кінцевому підсумку, ефективність і якість гасіння пожежі.

За агрегатним станом в умовах застосування вогнегасні речовини прийнято поділяти [22] на твердофазні, рідкофазні (іноді використовується термін «рідинні вогнегасні засоби» [23]), газофазні (газові) й аерозольні.

За [22, 23] вогнегасні речовини класифікують за двома ознаками:

- за агрегатним станом;
- за механізмом припинення горіння.

Згідно [22, 23] за агрегатним станом вогнегасні речовини поділяють на рідкі (вода та водні розчини), пінні засоби пожежогасіння (повітряно-механічна та хімічна піна), порошкові склади і сипучі матеріали (пісок, земля, спеціальні сполуки тощо).

За механізмом припинення горіння автори [22, 23] поділяють вогнегасні речовини на такі групи:

- речовини, які охолоджують зону реакції горіння;
- речовини, що розбавляють реагуючі речовини в зоні реакції горіння;
- речовини, що хімічно гальмують реакцію горіння речовини;
- речовини, що ізолюють реагуючі речовини від зони горіння.

На основі літературного аналізу авторами визначено механізми гасіння [22–24], основні переваги [25–27] та недоліки [28, 29] вогнегасних речовин, які використовують для гасіння пожеж класу А. Отримані результати аналізу наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Вогнегасні речовини для гасіння пожеж класу А

Вогнегасні речовини	Домінуючий механізм пожежогасіння	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Вода	охолодження	– доступність; – простота застосування; – низька вартість; – зручність зберігання та транспортування; – безпечність застосування	– великі витрати; – можливість повторного займання, що тягне за собою необхідність проливання конструкцій; – низький коефіцієнт використання; – значні побічні збитки від затоплення приміщень; – висока температура замерзання;

Продовження табл.1.1

1	2	3	4
			<ul style="list-style-type: none"> <li>– високі енерговитрати під час підйому на висоту;</li> <li>– збільшення ваги речовин під час контактування з водою внаслідок набухання і надалі ймовірність обвалення конструкцій;</li> <li>– неможливість гасіння електрообладнання під напругою</li> </ul>
Повітряно-механічна піна	охолодження; ізолювання	<ul style="list-style-type: none"> <li>– зниження ймовірності повторного займання;</li> <li>– зниження вторинного збитку від пожежі;</li> <li>– можливість гасіння великих площ;</li> <li>– зниження витрати вогнегасних речовин</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– необхідність прибирання залишків піни після завершення гасіння;</li> <li>– більша вартість гасіння через використання піноутворювача;</li> <li>– неможливість гасіння електрообладнання під напругою</li> </ul>
Порошкові склади	інгібування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– можливість гасіння електрообладнання під напругою;</li> <li>– можливість гасіння металів (спеціально призначеними для цього порошками)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– висока хімічна активність;</li> <li>– низька охолоджувальна здатність;</li> <li>– складність систем порошкового пожежогасіння;</li> <li>– необхідність прибирання залишків порошку після гасіння</li> </ul>
Газові вогнегасні речовини класу інертних розріджувачів	розведення	<ul style="list-style-type: none"> <li>– хімічна нейтральність;</li> <li>– відсутність вторинного збитку;</li> <li>– виключення корозії металів або окислення інших матеріалів;</li> <li>– можливість гасіння електрообладнання під напругою</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– неефективність на відкритих площах;</li> <li>– непридатність для гасіння речовин, яким для горіння не потрібен кисень;</li> <li>– зберігання газових модулів вимагає особливих запобіжних заходів</li> </ul>
Газові вогнегасні речовини класу інгібіторів горіння	інгібування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– можливість гасіння електрообладнання під напругою;</li> <li>– низька температура замерзання.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– токсичність самих вогнегасних речовин і продуктів їх термічного розкладання;</li> <li>– висока корозійна активність продуктів термічного розкладання.</li> </ul>

Під час гасіння пожеж, пов'язаних із горінням твердих горючих матеріалів, найбільш ефективними є охолоджувальні вогнегасні речовини, що діють за механізмом припинення горіння охолодженням горючих матеріалів, та ізолювальні вогнегасні речовини [20].

Виходячи з аналізу літературних даних [20–23], присвячених проблемі гасіння твердих горючих речовин, вивченню механізмів та вогнегасних засобів, встановлено, що найбільш поширеними вогнегасними засобами є вода і повітряно-механічна піна. Згідно із планом дослідження було проведено аналіз використання води і повітряно-механічної піни для гасіння пожеж.

## **1.2 Аналіз використання води для гасіння пожеж**

Вода – найбільш поширений засіб (вогнегасна речовина) для гасіння пожеж. Джерелами водопостачання можуть бути поверхневі (моря, озера, річки, ставки і т.д.) і підземні (грунтові, джерельні, артезіанські) води [24].

Найбільший внесок у дослідження проблеми застосування води для гасіння пожеж зробили Абрамов Ю.А. [30–34], Абдурагімов І.М. [35–37], Корольченко Д.А. [38–40], Шароварніков А.Ф. [41–43], Ross R.H. [44], Smith D.P. [45], Стась С.В. [46–48], Ольшанський В.П. [49–51], Виноградов А.Г. [52–54] та ін.

Так, ряд теоретичних і практичних досліджень спрямований на визначення найбільш ефективних розмірів краплин води [24]. Широке застосування знаходить вода аерозольного розпилення із середнім діаметром краплин близько 50 мкм [55]. В останні десятиліття досвід пожежогасіння тонкорозпиленою водою застосовують багато країн Європи, ефективність якого підтверджена в роботі [56]. У роботі [57] встановлено залежність випаровуваності краплин води від їх радіусів. Питання вогнегасної ефективності дії компактного струменя на горючий матеріал досліджено в роботі [58]. Свої дослідження вивченню питання ефективності застосування тонкорозпилених і розпилених струменів води під час гасіння пожеж твердих горючих речовин присвятили дослідники [59], з яких встановлено, що зміни в режимі гасіння пожеж розпиленими струменями приводять до значного (більш ніж в 10 разів) зменшення витрати. Залежність максимальної дальності польоту струменя від способу подавання до осередку пожежі експериментально вивчено у праці [60]. У дослідженнях [61–64] розглянуто один із напрямів вирішення проблеми підвищення ефективності використання води на пожежі шляхом застосування тонкорозпиленої та термоактивованої води. Дослідники [65] відзначають, що застосування тонкорозпиленої води є ефективним для гасіння майже усіх видів горючих матеріалів, окрім речовин, які активно реагують із водою. У роботі [66] експериментально підтверджено, що під час застосування тонкорозпиленої води витрата води на гасіння пожеж знижується у 2–3 рази, у порівнянні з нормативними витратами. Результати огляду застосування води в тонкорозпиленому стані за період із початку 90-х років наведено у праці [67]. Аналіз [68, 69] вказує на розширення використання методів гасіння тонкорозпиленою водою та іншими рідкими засобами.

Ліквідація горіння водою може бути досягнута за рахунок охолодження, ізоляції та розбавлення. Практично усі три чинники діють одночасно, але домінуючим у кожному конкретному випадку є один або два. Основною влас-

тивістю води, що забезпечує припинення горіння, є охолодження [70]. Під час гасіння водою пожеж, пов'язаних із горінням твердих горючих матеріалів, повного припинення процесів горіння можна досягти тільки охолодженням до певної температури самого горючого матеріалу. По-перше, тому, що припинення полум'яного дифузійного горіння ще не означає припинення горіння взагалі, оскільки тверді горючі матеріали здатні до гетерогенного горіння (тління). По-друге, поверхневий шар цих матеріалів у процесі горіння прогрівається до температури, що значно перевищує температуру самозаймання. Після припинення полум'яного горіння над їх поверхнею знову створюються умови, достатні для повторного займання і продовження горіння. Тому умовою повного і надійного припинення горіння цих матеріалів є не тільки припинення полум'яного горіння над їх поверхнею, але й охолодження поверхні цих матеріалів та їх прогрітих поверхневих шарів до температури, нижчої за температуру початку виходу горючих летких фракцій або початку їх піролізу.

Як правило, під час гасіння пожеж водою відбувається охолодження горючої речовини нижче температури займання, причому теплота, відібрана від осередку пожежі, поглинається водою і відводиться водяною парою. Виходячи з цього, спосіб охолодження водою застосовується в основному для гасіння твердих речовин [71].

Вода має високий поверхневий натяг, що значною мірою перешкоджає розподілу її по поверхні, проникненню увглиб палаючих твердих матеріалів і негативно позначається на швидкості охолодження.

Одним зі шляхів вдосконалення рідкофазових вогнегасних речовин є використання добавок до води. Використання водних розчинів дозволяє зберегти основні позитивні властивості води і поліпшити ряд її характеристик як вогнегасної речовини. Одним із суттєвих недоліків води як вогнегасної речовини є недостатньо висока змочувальна здатність по відношенню до гідрофобних матеріалів. Це призводить до погіршення контактування води з поверхнями твердих речовин і, відповідно, швидкого стікання води з них. Ця властивість води зумовлена високим значенням її поверхневого натягу. Для зниження величини поверхневого натягу застосовують поверхнево-активні речовини. В пожежній справі використовують змочувальні розчини піноутворювачів із концентраціями 0,2–2% (в деяких випадках – до 5 %). Для зменшення втрат за рахунок стікання води застосовують добавки до води різних загусників. Загусники – це речовини, додавання яких до води збільшує в'язкість розчинів. Ще одним способом підвищення вогнегасної ефективності води є додавання до неї неорганічних сполук. Розчини неорганічних сполук можуть справляти комплексну дію. По-перше, вони можуть виступати як антипірени, що насичують горючий матеріал і ускладнюють його горіння. По-друге, водні розчини деяких неорганічних речовин можуть пригнічувати полум'яну фазу горіння. По-третє, водні розчини після випаровування з них води часто утворюють на поверхнях тверді плівки, які мають ізолювальні й теплозахисні властивості. Ще одним ефектом застосування водних вогнегасних речовин із добавками неорганічних речовин є зниження температури замер-

зання водних розчинів, у порівнянні з температурою замерзання води. Але застосування усіх добавок пов'язане з високими матеріальними витратами.

Отже основна проблема полягає у підвищенні ефективності використання води під час гасіння пожеж. Авторами дослідження [72] відзначено, що під час гасіння твердих горючих матеріалів має місце надлишкове і марне використання води. Коефіцієнт використання води є дуже низьким та становить від 2 % до 20 %. Більшість сучасних технічних засобів використовують безпосередньо на гасіння осередку тільки 5–10 % поданої води, фактично 90–95 % води вважається надмірно пролитою [73]. Часто збиток від надмірно пролитої води більше, ніж від самої пожежі.

Актуальність проблеми великої втрати води під час її застосування, поряд із технологічним розвитком і появою сучасних вогнегасних речовин, змушує здійснювати пошук альтернативних і ефективних способів гасіння.

### **1.3 Аналіз використання повітряно-механічної піни для гасіння пожеж**

На сьогодні повітряно-механічна піна широко використовується у випадку гасіння пожеж на об'єктах хімічної та нафтопереробної промисловості, а також для гасіння твердих і рідких речовин [20].

Великий внесок у розвиток пожежогасіння повітряно-механічною піною зробили вчені: Шароварников А.Ф. [74–76], Казаков М.Б. [77, 78], Пешков В.В. [79–81], Розенфельд Л.М [29] та ін.

Основна кількість досліджень спрямована на вивчення питання використання повітряно-механічної піни під час гасіння рідких горючих речовин. Так, у роботі [82] описано вогневі досліди з гасіння автомобільного бензину в піддонах піною низької кратності з різними типами піноутворювачів. За експериментальними результатами [83] встановлено оптимальну площу пожежогасіння для нафтопродуктів, на якій слід перевіряти ефективність піни, для отримання надійних кількісних даних. У роботі [84] проаналізовано досліди з гасіння нафтопродуктів піною високої кратності, генерованою з робочих розчинів синтетичних піноутворювачів. Дослідниками [85] вивчено ефективність тактики подавання піни під час гасіння горючих рідин з низькою температурою замерзання. Аналізуючи дослідження [86] з гасіння нафтопродуктів на різних площах за допомогою піни, генерованої з робочих розчинів різних піноутворювачів, відзначається вплив умов розподілу піни на процес гасіння пожежі, оскільки час покриття вільної поверхні пального залежить від кількості пристроїв подавання піни. У праці [87] експериментально проведено порівняння піни середньої кратності, генерованої з робочих розчинів синтетичних піноутворювачів, з піною низької кратності, що отримується із фторпротеїнових і фторсинтетичних піноутворювачів, під час гасіння нафтопродуктів. Дослідники [88] вивчали ефективність піни низької кратності, генерованої з робочих розчинів плівкоутворювального і «спиртостійкого» піноутворювачів, а також ефективність піни високої кратності, генерованої з робочого розчину

синтетичного піноутворювача під час гасіння легкозаймистих рідин. Авторами [89] відзначено більшу ефективність піни середньої кратності у порівнянні з піною високої кратності під час гасіння бензину. Повідомляється про те, що для збивання «полум'я» в початковий момент більш ефективною є піна низької кратності.

Піна являє собою дисперсну двофазну систему, що складається з бульбашок газу, оточених плівками рідини [20, 22]. Піна – це дисперсна система, яка є нестійкою [28]. З моменту утворення піни в ній протікають процеси старіння, внаслідок яких піна змінює свої властивості. Найбільш інтенсивні зміни спостерігаються в початковий момент. Руйнування піни в нормальних умовах відбувається в результаті витікання рідини і розриву плівок всередині піни [90]. Наслідком цього є зміна структури. У процесі старіння сферична форма осередків перетворюється в багатогранну. Крім того, з моменту утворення в піні починається процес дифузійного переносу повітря з маленьких бульбашок у великі. Це призводить до зменшення загального числа бульбашок і збільшення їх середнього діаметра.

Чим меншим є середній діаметр бульбашки піни, тим більшою є її дисперсність. Якщо бульбашки мають однакові розміри, піна називається монодисперсною; якщо має місце різний розмір бульбашок – полідисперсною [77]. Згідно [22, 23] піна може бути високодисперсною і низькодисперсною.

Для пін, які застосовують у пожежогасінні, до основних її властивостей відносять кратність, стійкість, дисперсність і однорідність [27, 77].

Залежно від величини кратності піни поділяють на чотири групи [28, 91]: піноемульсії,  $K < 3$ ; піни низької кратності,  $3 < K < 20$ ; піни середньої кратності,  $20 < K < 200$ ; піни високої кратності,  $K > 200$ .

Згідно [22, 77] кратність піни  $K$  – це відношення об'єму піни  $V_{\text{п}}$  до об'єму рідини  $V_{\text{р}}$ , з якої вона отримана.

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{р}}} . \quad (1.1)$$

Наступна важлива властивість піни – це її стійкість. Під визначенням стійкості піни розуміють [64, 73] час існування елемента піни (окремої бульбашки) або певного об'єму піни.

Для отримання числового значення стійкості піни визначається час, протягом якого з піни виділяється 50 % об'єму рідини, з якої її отримано [92]. Стійкість залежить від дисперсності піни. Чим вище дисперсність утворених бульбашок піни, тим більше її стійкість [22, 23], а отже і вогнегасна ефективність.

Дисперсність  $D_{\text{п}}$  піни оцінюється або середнім розміром бульбашки, або розподілом бульбашок за розмірами [22, 23]. Найчастіше під дисперсністю розуміють величину, обернену до середнього розміру бульбашки піни:



$$D_{\Pi} = \frac{1}{d_{\text{cp}}}, \quad d_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} d_i N_i}{\sum N_i}, \quad (1.2)$$

де  $d_i$  – діаметр бульбашок фракції;  
 $\sum N_i$  – загальне число бульбашок у всіх фракціях;  
 $N_i$  – число бульбашок фракції  $i$  з діаметром  $d_i$ .

Дисперсність є однією з найважливіших вогнегасних властивостей піни [23]. Стверджується [27], що чим вище дисперсність (менше середній радіус бульбашки), тим більше стійкість піни і вище її вогнегасна ефективність.

Відомо [22], що у разі отримання піни повітряно-механічним способом за збільшення кратності зростає і середній діаметр бульбашок. При цьому за збільшення кратності піни товщина плівок між бульбашками зменшується. Отже, зі збільшенням кратності повітряно-механічна піна стає низькодисперсною й її стійкість зменшується, наслідком чого є зниження її вогнегасної здатності.

Однорідність піни характеризується низьким розбігом розмірів бульбашок, з яких вона утворена. У свою чергу на розміри бульбашок піни та їх однорідність [93, 94] впливають методи одержання піни, тип і концентрація піноутворювача, наявність стабілізуючих речовин та кратність.

Піну низької кратності використовують для гасіння пожеж на складах деревини, для гасіння технологічного обладнання, невеликих розливів пального. Її можна подати струменем значної довжини на відстань понад 20 м [95]; крім того, вона добре проникає крізь нещільності та утримується на поверхні, володіє високими ізолюючими й охолоджуючими властивостями [90].

Піна середньої кратності є основним засобом гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів у резервуарах і на розлитих поверхнях [95]. Дальність подавання струменів становить 10–13 м. Піною середньої кратності гасять за площею і за об'ємом [23]. Вона також використовується для витіснення диму у випадку пожежогасіння об'ємним способом, ізоляції розташованих поруч з осередками пожежі об'єктів від впливу теплових і газових потоків.

Піна високої кратності використовується в основному для гасіння різних об'ємних споруд шляхом їх заповнення [24]. Високократна піна ефективно застосовується для осадження радіоактивних забруднень з повітря, гасіння пожеж на суднах і в бібліотеках, архівах, шахтах і т.д. Вогнегасна дія високократної піни базується головним чином, на ефекті пригнічення і витіснення. Охолоджувальна дія є настільки малою, що її вплив на процес пожежогасіння є несуттєвим [77].

Більш сучасним засобом пінного гасіння є компресійна піна, яка набула широкого поширення в Європі та Америці та має ряд переваг, як у порівнянні з водою, так і в порівнянні з повітряно-механічною піною, за рахунок способу і технологічних параметрів її генерування. До останнього часу в Україні не проводили жодних розробок або досліджень, присвячених використанню компресійної піни.

Проведений нижче аналіз дозволяє упевнитись у перевагах компресійної піни, у порівнянні з іншими вогнегасними засобами, з точки зору ефективності гасіння пожеж.

#### **1.4 Аналіз використання компресійної піни для гасіння пожеж**

Компресійна піна (англійською – CAF – Compressed Air Foam) – однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, що отримана шляхом змішування води, піноутворювача та повітря, або азоту під тиском [96–97]. Також зустрічаються назви: «газонаповнена», «пневматична піна», «легка піна».

Технологія генерування компресійної піни вперше була застосована в 1932 році в Данії та використовувалася для гасіння пожеж на судах. Вогнегасні властивості цього типу піни отримали позитивну оцінку, та в 1944 році вона була поставлена на озброєння у ВМС США. А в 70-х роках ХХ сторіччя системи для генерування і подавання компресійної піни застосовувалися для гасіння будинків у сільських районах штату Техас (США) за допомогою модульних систем пожежогасіння [98]. Найбільшого розвитку піна отримала в 90-ті роки ХХ сторіччя. У 1990 році її було вперше застосовано для захисту багатопверхових будівель автоматичними системами пінного пожежогасіння. У 1996 році компанія «Ziegler» отримала контракт на розробку та виготовлення двох перших пожежних автомобілів, які реалізували технологію утворення компресійної піни. Після цього у Німеччині у 1997 році на державному рівні почали впроваджувати цю технологію для цілей пожежогасіння. На сьогодні пожежні автомобілі, які використовують компресійну піну для пожежогасіння, мають більшість провідних європейських країн. У США діє закон, згідно з яким у штатах, де місцева пожежна охорона використовує пожежні автомобілі з технологією CAFS, страхові внески жителів цього штату можуть бути зменшені [99].

Компресійна піна генерується у спеціальних системах – CAFS (з англійської – compressed air foam system). Основними складовими елементами системи CAFS є пожежний насос, компресор (або балони з повітрям) і система регулювання подавання піноутворювача [3,100,101]. Для отримання компресійної піни використовуються ті ж три складові (вода, піноутворювач і повітря), що і для генерування повітряно-механічної піни. Основною відмінністю системи CAFS є принцип змішування водного розчину піноутворювача, який у випадку створення компресійної піни відбувається не пасивно (ежекцією повітря струменем водного розчину піноутворювача), а активно – нагнітанням повітря у змішувальну камеру. На рис

1.1 наведено схему генерування компресійної піни. Після відкриття балона зі стисненим повітрям (1) повітря надходить в ємність із водою (2), а також в окремий картридж із піноутворювачем (3). Таким чином, створюється постійний робочий тиск. (Також у деяких системах передбачено попереднє приготування водного розчину піноутворювача та зберігання його в одній ємності). Під час приведення в дію ручного пожежного ствола (4) вода, що знаходиться в ємності (2), витісняється в сифонну трубу (5), а піноутворювач з окремого картриджа (3) послідовно змішується з нею в камері змішувача (6). Потім зазначений водний розчин піноутворювача, за рахунок примусового спінювання в камері з піногенеруючими вставками (7), за допомогою стисненого повітря з балона перетворюється в компресійну піну і подається через ручний ствол (4).

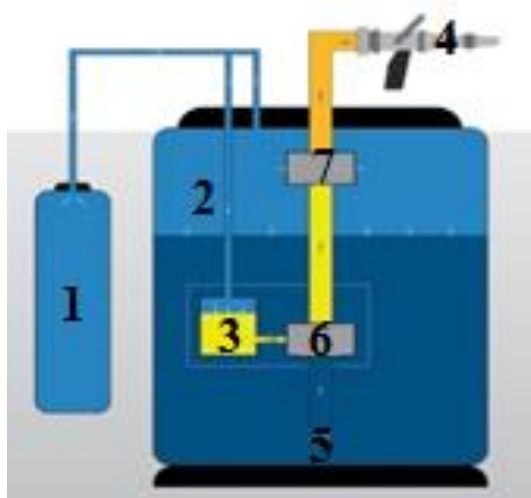


Рис. 1.1 – Схема [94] утворення компресійної піни:

1 – балон зі стисненим повітрям; 2 – ємність із водою; 3 – картридж із піноутворювачем; 4 – пожежний ствол; 5 – сифонна трубка; 6 – камера змішувача; 7 – камера з піногенеруючими вставками

В результаті такого активного змішування компресійна піна, на відміну від повітряно-механічної, виходить більш однорідною.

Під час активного генерування піни одна краплина води перетворюється на велику кількість бульбашок піни, тим самим збільшується площа корисного контакту для теплообміну. Крім цього, компресійна піна, за рахунок своєї однорідної структури, затримується на поверхнях і сприяє тривалому поглинанню теплоти. В результаті цього більша частина води, що міститься в компресійній піні, випаровується, максимально охолоджуючи осередок пожежі. За рахунок випаровування води перекривається доступ кисню до осередку. Крім цього, компресійна піна, завдяки високій адгезії, утворює тонкий захисний шар між палаючою поверхнею і джерелом кисню. Він найкращим чином ізолює надходження кисню до осередку пожежі. Завдяки високій кінетичній енергії компресійної піни

сійної піни і зниженню поверхневого натягу, завдяки використанню піноутворювача забезпечується глибоке проникнення води в пори і тріщини палаючої поверхні, що забезпечує змочування розташованих нижче шарів матеріалу.

Отримана за технологією CAFS компресійна піна (далі – КП) забезпечує гасіння пожежі одночасно за трьома механізмами [94]:

- КП накриває горючу речовину, тим самим припиняючи доступ кисню;
- КП надійно тримається на похилих та вертикальних поверхнях, тим самим знижуючи їх температуру;
- непрозора КП захищає горючі матеріали від впливу теплового випромінювання полум'я.

Основною перевагою технології CAFS є унікальна можливість отримання піни різних типів, що відрізняються за вогнегасними властивостями, що, у свою чергу, надає широких можливостей вибору типу піни для гасіння пожеж у кожній конкретній ситуації [96–98]. Піна, отримана за технологією CAFS, налипає на стіни і стелі [96], припиняє горіння та перешкоджає повторному займанню.

За фізичними параметрами (кратністю) компресійна піна буває трьох видів [102]: «мокра (wet)»  $K = 1-5$ , яка застосовується найчастіше для гасіння пожеж назовні приміщень; «рідка (fluid)»  $K = 5-10$ , яка застосовується для гасіння пожеж у приміщеннях, і «суха, або жорстка (dry or stiff)»  $K = 10-20$ , яку можна застосовувати для захисту поверхонь від теплового випромінювання (рис. 1.2).

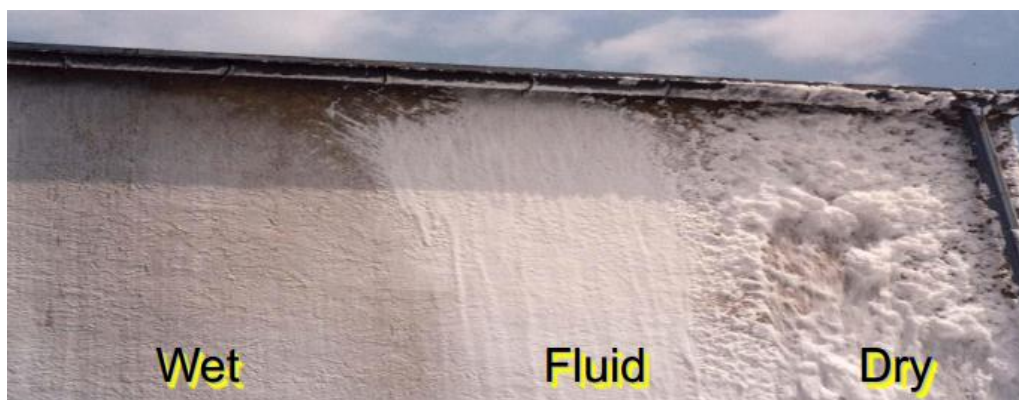


Рис 1.2 – Види компресійної піни [103]

Зовні компресійна піна виглядає як легка однорідна коміркова маса білого кольору. Адгезія у КП тримається на поверхні предметів після нанесення, в тому числі на вертикальних та гладких поверхнях. Проведені дослідження [104, 105] показали, що компресійна піна дозволяє ефективно створювати протипожежні бар'єри на шляху низових пожеж різної ширини.

Рядом авторів відзначено, що КП має наступні переваги, у порівнянні з ПМП та водою [98, 100, 101]:

- утворення піни відбувається безпосередньо біля насосної установки;

- на відміну від звичайної вогнегасної піни, КП утворюється вже в технічному засобі пожежогасіння, що дає змогу зменшити витрати енергії на її доставку до місця пожежі; піну можна подавати на значні відстані, навіть по вертикалі (до 400 м по рукаву);

- КП є високоструктурованою, компактною та складається з великої кількості однорідних одиничних бульбашок. Відношення маси до поверхні є сприятливим для інтенсивної теплопередачі, що приводить до значного ефекту охолодження;

- оскільки КП утворюється за допомогою повітря під тиском, то використання енергії цього тиску достатньо для її доставки безпосередньо в осередок пожежі. При цьому не відбувається випаровування малих крапель на етапі доставки струменя в осередок пожежі, що підвищує коефіцієнт використання вогнегасної речовини;

- для подавання КП не потрібно спеціальних пристроїв, для цього можуть бути використані звичайні насоси, рукава та пожежні стволи;

- пожежні рукави, що заповнені компресійною піною, є значно легшими, отже, підвищується маневреність працюючого зі стволом;

- КП може мати підвищений вміст рідкої фази, що підвищує ефект охолодження, а також може мати місце дуже низький вміст рідкої фази, що робить її більш в'язкою та дозволяє використовувати її для захисту вертикальних поверхонь від теплового випромінювання і запалювання;

- низький вміст рідкої фази знижує прямі збитки під час гасіння пожеж у багатопверхових будівлях та на горищах через відсутність затоплення поверхів, розташованих нижче;

- гасіння КП не потребує особливих навичок від особового складу;

- стиснене повітря, що використовується для генерування компресійної піни, може бути використане також для пневматичного аварійно-рятувального інструменту.

Разом з тим до недоліків такої піни можна віднести той факт, що у практичній діяльності було зафіксовано кілька випадків руйнування рукавів, що були наповнені компресійною піною, в умовах високої температури пожежі, через їх нагрівання та розширення повітря в піні [106]. Проте це питання ще потребує додаткового вивчення.

Технологія змішування повітря і розчину піноутворювача та складові камери змішування є ключовою точкою CAFS; ефект цього перемішування визначає вогнегасну ефективність піни.

Аналіз існуючих способів перемішування дозволив встановити, що ця технологія поділяється на два типи, відповідно до напрямку потоку повітря, що вводиться в розчин піноутворювача: вертикальне і коаксіальне перемішування [107–110]. Визначення, аналіз та відповідні пояснення вертикального і коаксіального перемішування наведені нижче.

CAFS у патентах США № 6357532 В1 і US 6276459 В1 [109, 110] передбачали використання Т-подібного пінозмішувача. Складники пінозмішувача зображено на рис. 1.3.

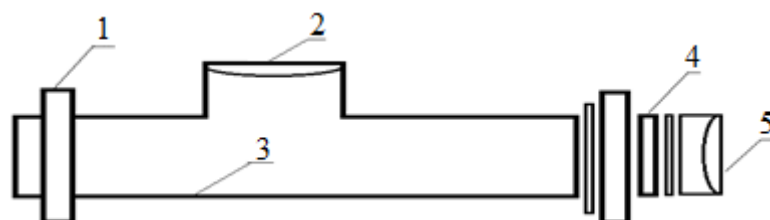


Рис. 1.3 – Т-подібний пінозмішувач:

1 – з'єднувальний пристрій з ємністю води і піноутворювача; 2 – отвори для подавання повітря; 3 – змішувальний трубопровід; 4 – сітчастий екран; 5 – з'єднувальний пристрій з рукавом

Структура Т-подібного пінозмішувача є дуже простою і легкою в обслуговуванні. Принципова схема перемішування розчину піноутворювача та повітря в пінозмішувачі такого типу зображена на рис. 1.4.

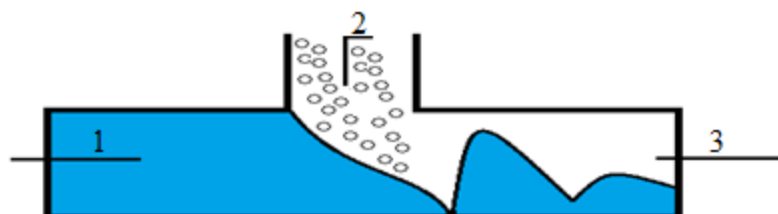


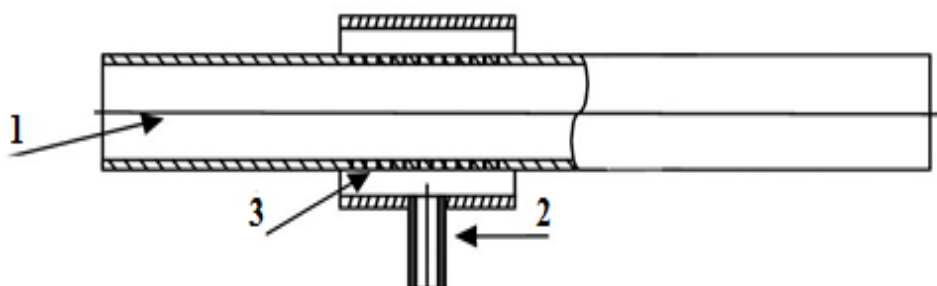
Рис. 1.4 – Схема перемішування в пінозмішувачі Т-подібного типу:

1 – потік розчину піноутворювача; 2– потік повітря; 3 – вихід готової компресійної піни

Процес перемішування в Т-подібному пінозмішувачі поділяється на декілька варіантів. В першому випадку [108] подавання повітря передбачається одним потоком крізь отвір, в якому процес перемішування відносять до типу «Повітря зовні, рідина всередині». На рис. 1.5 зображено таку схему.

Наступним варіантом [107, 108] Т-подібного змішування передбачається подавання стисненого повітря крізь отвір не одним потоком, як у першому випадку, а крізь маленькі отвори, тим самим забезпечується збільшення кількості місць, де повітря контактує з розчином піноутво-

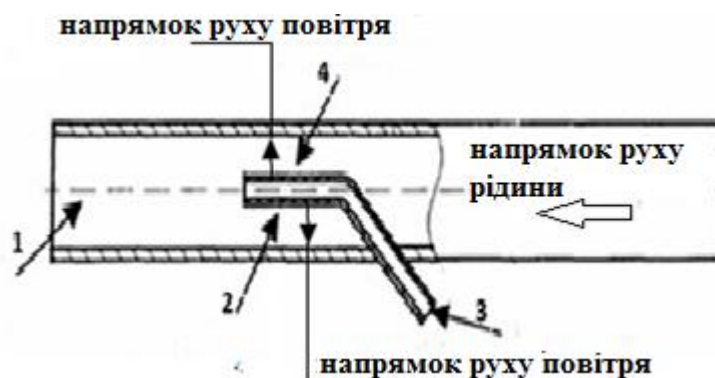
рювача. Ця технологія вводу повітря дозволяє ретельно перемішувати повітря з рідиною, тим самим покращуючи ефект змішування. У цьому випадку повітря вводиться вертикально через трубопровід, який безпосередньо введений в основу пінозмішувача, де здійснюється змішування розчину. Трубопровід зі стисненим повітрям закупорений, на ньому зроблено кілька маленьких отворів.



**Рис. 1.5 – Схема перемішування типу «Повітря зовні, рідина всередині»:**

1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – отвори для входу повітря у трубопровід із розчином ПУ

Схему процесу перемішування із введенням трубопроводу на центральній осі зображено на рис. 1.6. На рис. 1.7 зображено схему змішування, в якій трубопровід розміщено під кутом.



**Рис. 1.6 – Схема змішування на осі:**

1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 3 – трубопровід для стисненого повітря; 2, 4 – маленькі отвори для входу повітря у трубопровід із розчином ПУ

Також поширений коаксіальний метод змішування [111–114], у якому відбувається турбулентне співосне перемішування розчину піноутворювача і повітря. Варіанти виконання коаксіальної змішувальної камери показані на рис. 1.8 та 1.9. Подавання розчину піноутворювача здійснюється з тонкого трубопроводу, при цьому створюючи коаксіальний потік зі стисненим повітрям. Далі відбувається коаксіальне змішування.

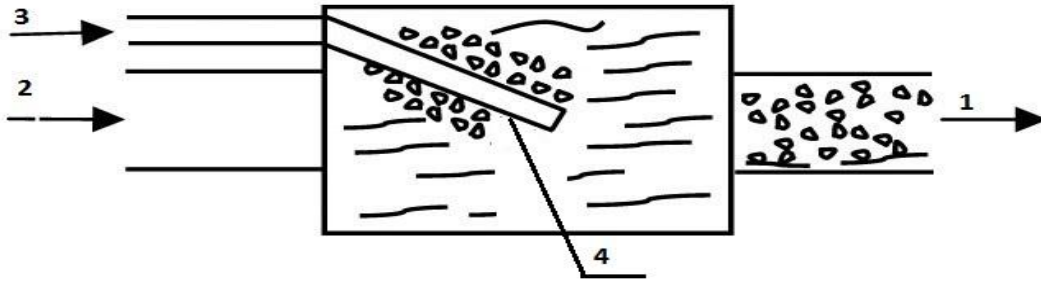


Рис. 1.7 – Схема змішування під кутом:

1 – вихід готової піни; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – трубопровід для розчину піноутворювача; 4 – отвори для контакту повітря з розчином ПУ

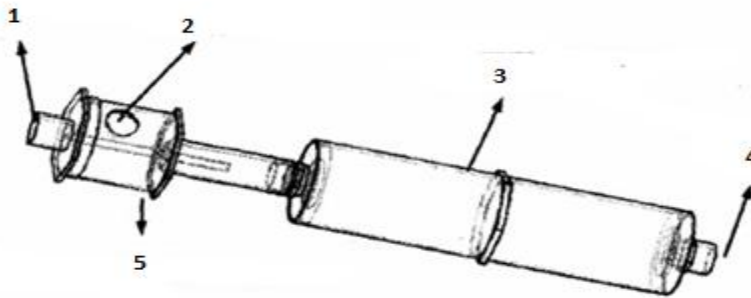


Рис. 1.8 – Просте коаксіальне змішування:

1 – вхід для розчину ПУ; 2 – вхід для подавання стисненого повітря; 3 – змішувальна частина; 4 – вихід готової піни; 5 – зовнішня будова коаксіальної камери

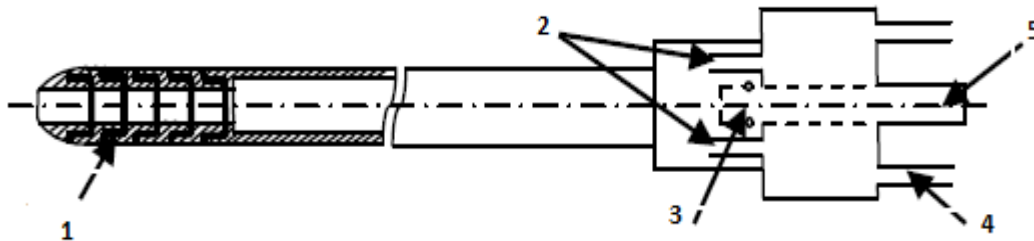


Рис. 1.9 – Коаксіальне змішування через сітки:

1 – багатошарові сітки; 2 – форсунки для вприскування повітря; 3 – форсунки для вприскування розчину піноутворювача; 4 – вхід для подавання стисненого повітря; 5 – вхід для розчину піноутворювача

Наступним етапом є генерування піни, яке здійснюється під час проходження суміші повітря і розчину піноутворювача через пористі тіла або інші елементи, які розташовані у статичних змішувачах [4].

На рис. 1.10–1.13 наведено приклади статичних змішувачів із різними конструктивними особливостями, які можуть бути використані для генерування компресійної піни [115–117].



Застосування компресійної піни є відносно новим та маловивченим способом пожежогасіння. Тому кількість наукових робіт, які присвячено цій тематиці менша, у порівнянні з кількістю праць, у яких досліджуються інші методи пожежогасіння.



Рис. 1.10 – . Змішувач із гвинтовими насадковими елементами [118]



Рис. 1.11 – Змішувач із нерегулярними елементами [116]

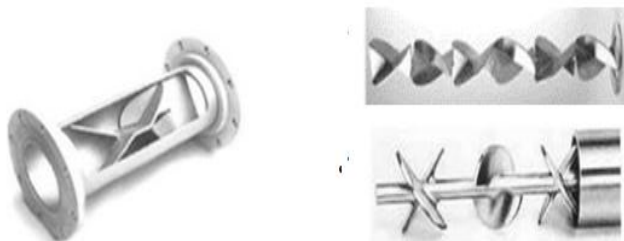


Рис. 1.12. Тип конструкцій з лезами [119]

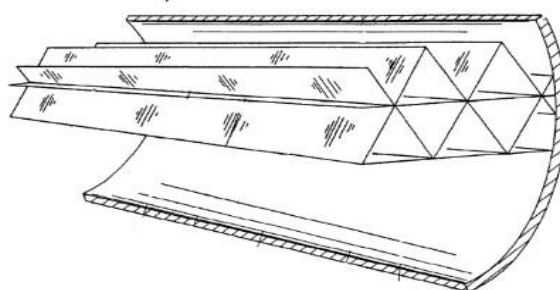


Рис. 1.13. Змішувач з елементами гофрованих пластин [120]

На рис. 1.14 наведено процес утворення піни за допомогою такого статичного змішувача.

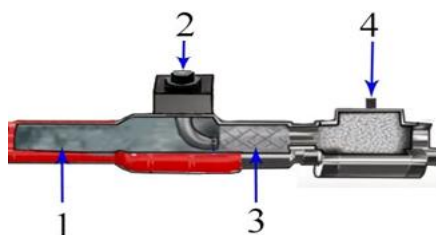


Рис. 1.14 – Процес утворення піни за допомогою статичного змішувача:

1- розчин піноутворювача; 2 - отвір для подавання повітря; 3 - статичний змішувач; 4 - готова компресійна піна [4]

Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних із вивченням вогнегасних пін, у тому числі й компресійних, було проведено такими вченими, як Ковалишин В.В. [121–123], Кодрик А.І. [124,

125], Боровиков В.О. [126–128], Тітенко О.М. [129, 130], Виноградов С.А. [131, 132], Colletti J.L. [98, 101, 106], Carey W.M. [133], Liebson J.L. [134], Грачулин А.В. [135], Федяев В.Д. [136], Grampton G. [137], Dong Ho. [138], Wang X. [139].

Найбільшу кількість відомих досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин. У роботі [138] оцінювалася вогнегасна ефективність системи генерування і подавання компресійної піни за різних співвідношень кількості стисненого повітря і водного розчину піноутворювача для гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням плівкоутворювального піноутворювача (AFFF) з концентрацією робочого розчину 3 %. Експериментально визначено, що співвідношення 1:7 за однакових умов є найбільш ефективним. У дослідженні [137] порівнювали ефективність гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням піноутворювачів класу А (змочувачів) і AFFF (плівкоутворювальний). Застосовувалися системи генерування і подавання компресійної та повітряно-механічної піни. Концентрація піноутворювачів класу А у розчині з водою складала 0,6 %, а AFFF – 1,5 %, 2 %, 3 %. Дослідження показали, що тривалість гасіння модельного осередку пожежі із застосуванням CAFS у 1,7–2,4 рази менша за тривалість гасіння повітряно-механічною піною. У роботі [140] вивчено вплив типу пінних бульбашок КП на тривалість гасіння пожежі. Як джерело запалювання використовували бензин. Концентрація піноутворювача змінювалася від 0,4 % до 1 %, витрата розчину піноутворювача – від 0,35 м<sup>3</sup>/год. до 1,7 м<sup>3</sup>/год., а витрата стисненого повітря – від 2,2 г/с до 2,7 г/с. Виділено три типи пінних бульбашок: мокрі, середні та сухі. При цьому менша тривалість гасіння спостерігалася у випадку застосування «сухої» піни.

В роботі [141] дослідники визначили, що втрати тиску в рукавній лінії, у разі подавання піни на висоту, залежать від кратності піни і тиску в рукавній лінії, що було підтверджено дослідженням [142], яке показало, що за кратності піни 8,5 втрати тиску складають 0,05 МПа на кожні 10 м висоти, за висоти підйому піни до 250 м і тиску на насосі в 1,23 МПа. Таким чином, у порівнянні з повітряно-механічною піною, втрати тиску в рукаві зменшуються удвічі. У праці [143] авторами проведено дослідження з вивчення формування піни під час пропускання водного розчину піноутворювача через пористе тіло. Було відзначено, що зі збільшенням швидкості потоку зменшується діаметр пінної бульбашки. Встановлено, що розміри пор відіграють велику роль у формуванні розміру бульбашки. Промодельовано залежності розмірів діаметрів бульбашки від конструкційного виконання пористого тіла.

Щодо застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин, можна зазначити, що в роботі [135] проведено порівняння ефективності гасіння таких пожеж компресійною та повітряно-механічною піною низької кратності. Результати показали, що на гасіння осередку пожежі компресійною піною необхідно удвічі менше води та удвічі менше часу. Але

у роботі поза увагою залишилося вивчення впливу кратності у компресійній піні на її вогнегасну ефективність. У роботі [139] досліджувався вплив концентрації піноутворювача на ефективність гасіння модельних осередків пожеж твердих та рідких горючих речовин компресійною піною, де концентрації змінювалися від 1,2 % до 12 %. Випробування показали, що зниження концентрації піноутворювача з 12 % до 2,2 % зменшувало тривалість гасіння більш ніж у 2 рази. У разі подальшого зниження концентрації піна втрачала свої вогнегасні властивості і тривалість гасіння зростала.

Серед провідних світових виробників засобів протипожежного призначення системи компресійної піни CAFS набули значного поширення [1–2].

Можна виділити три основних напрями застосування CAFS:

- стаціонарні автоматичні системи пожежогасіння;
- пересувні системи пожежогасіння;
- системи, вбудовані в пожежні автомобілі.

Розглянемо основних виробників систем компресійної піни.

Одним з найбільш відомих виробників систем CAFS є німецька фірма «One seven» [144, 145], яка володіє патентом на цю технологію та виготовляє стаціонарні та мобільні системи пожежогасіння, та австрійська фірма «Rosenbauer Osterriech GmbH», яка в 2000 році створила перший промисловий зразок системи CAFS (рис. 1.15), одночасно із сучасним зразком пересувної системи пожежогасіння ONE SEVEN.

Окрім наведеної продукції, фірма виробляє обладнання для системи CAFS POLY BIKE SL35–50 – для установки на мотоциклах, POLY SKID MODUL SL50–100 – для універсального використання, POLY EPH SL50 – на рукавній катушці, POLY ATV SL100 – на автомобілі підвищеної прохідності.

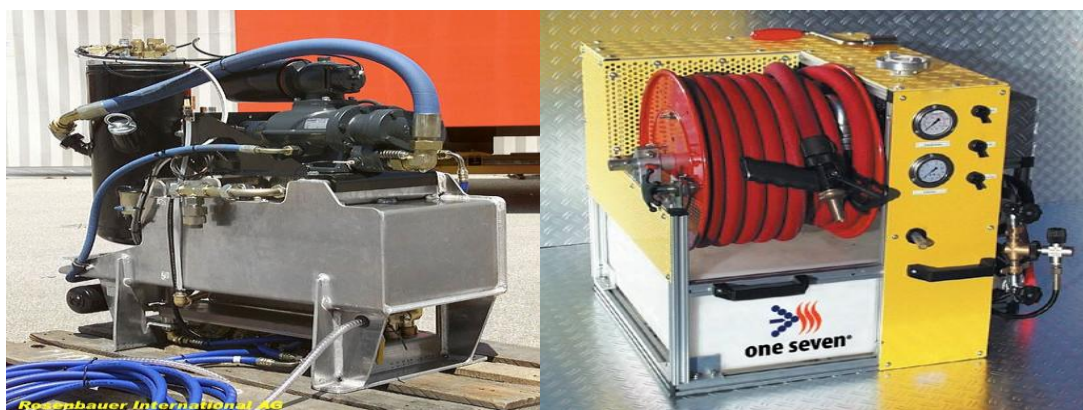


Рис. 1.15 – Система CAFS, 2000 р., та сучасна мобільна система ONE SEVEN

На цей час фірма випускає пожежні автомобілі, пінозмішувачі, переносні та стаціонарні системи пожежогасіння із використанням системи CAFS: переносний ранцевий вогнегасник із компресійною піною POLY PORTEX SL10; пересувний вогнегасник із компресійною піною POLY

TROLLEY SL35–50; пересувний вогнегасник з компресійною піною, виконаний на транспортній рамі POLY MOBILE SL50; систему пожежогасіння спеціальними розчинами POLY EXTINGUISHING SYSTEM. На рис 1.16 наведено один зі зразків продукції фірми.

Системи «One seven» генерують компресійну піну із вмістом піноутворювача в розчині у діапазоні від 0,3 % до 1 %. У цьому разі відношення об'єму розчину піноутворювача до об'єму повітря у готовій піні складає 1:7, що й набуло відображення у назві технології. На рис. 1.17 наведено зображення стаціонарної системи пожежогасіння «One seven» [144].



**Рис. 1.16 – Переносний ранцевий вогнегасник із компресійною піною POLY PORTEX SL10**



**Рис. 1.17 – Загальний вигляд стаціонарної системи пожежогасіння «One seven»**

Окрім наведеної вище системи, компанія «One seven» виготовляє також такі системи пожежогасіння [145]:

- Stored–Energy–Systeme – замкнена система із запасом води, піноутворювача та повітря – дозволяє працювати до 10 хвилин під час гасіння пожежі;
- Maxi–Xtinguisher – мала стаціонарна система із заздалегідь підготовленим водним розчином піноутворювача, що знаходиться під тиском, – має дуже малу тривалість приведення в дію;
- Wandhydranten WXS – стаціонарна настінна система пожежогасіння, що може бути використана як альтернатива звичайним пожежним кран-комплектам; має рукав довжиною до 60 м та дальність подавання струменя піни до 15 м, протягом 20 хв.

Фірма «Rosenbauer» має запатентовану технологію CAFS [146]. Перелік продукції наведено нижче:

- CONTI & FLASH CAFS 400–2400 – система для пожежних автомобілів, дозволяє отримувати компресійну піну із кратністю від 4 до 15 та витратою готової піни від 1600 до 9600 л/хв., залежно від продуктивності насоса та кратності піни;

- SKY CAFS – система для протипожежного захисту висотних будівель подаванням компресійної піни на висоту до 400 м, що досягається за рахунок малої питомої ваги піни;
- FLASH CAFS AR 30–400 – високопродуктивна потужна система генерування і подавання компресійної піни для аеродромних автомобілів; дозволяє отримати до 64000 л/хв. піни кратністю 8. Повітря у камеру змішування надходить із повітряних балонів;
- CAFS MOBILE – мобільна система генерування і подавання компресійної піни; дозволяє отримувати піну кратністю від 4 до 20 включенням її в рукавну лінію, що йде від відцентрового насоса (рис. 1.18). Дозволяє отримувати від 400 до 1600 л/хв. готової піни введенням у потік водного розчину піноутворювача повітря у визначеній кількості, що надходить із підготовлених повітряних балонів.



Рис. 1.18 – CAFS MOBILE

Американська компанія «Waterous» має запатентовану технологію пінозмішування ONE STEP CAFSystem [147]. Вона використовує автономну, запатентовану систему регулювання тиску, яка тримає постійний тиск змішування в камері змішувача системи. Перелік продукції:

- Eclipse CAFSystem – безмоторна система пожежогасіння в комплексі з насосом та компресором, що дозволяє отримати до 9000 л/хв. піни, в залежності від моделі, за умов тиску 15 бар [147];
- автомобільний насос із вбудованою системою КП CAFSystem ONE STEP 150 – OS (рис. 1.19); дозволяє отримувати суху або мокру піну із вмістом піноутворювача в розчині з водою у кількості 0,1–1,3 % та 6 % в залежності від потреб. Повітря нагнітається від вбудованого компресора продуктивністю до 4,25 м<sup>3</sup>/хв., за умов тиску 8,6 бар;
- модулі пожежогасіння 70–35–GP, 100–50–DS, 200–100–DS, 100–50–OS, 200–100–OS (рис. 1.20), що включають у себе насос із приводним двигуном, компресор та систему дозування піноутворювача. Вони працюють у

широкому діапазоні значень витрати піни (до 800 л/хв.) та з максимальним напором 35, 50 та 100 м вод. ст., залежно від моделі [147].



**Рис. 1.19. CAFSystem ONE STEP 150– OS**



**Рис. 1.20. Waterous 200–100–OS**

Французький виробник протипожежної техніки «Gimaex», яку компанія «One seven» оснащує автомобільними модулями пожежогасіння, виготовляє лінійку пожежних автомобілів із вбудованими системами генерування і подавання компресійної піни (рис. 1.21), автоцистерни, аеродромні автомобілі, лісові пожежні автомобілі, автомобілі для промислових підприємств [148].

Американська компанія «Hale Products Inc» встановлює на свої пожежні автомобілі системи CAFS90/CAFS200 з технологією дозування піноутворюю-

вача Hale Foam Master [149]. Система працює з пожежними насосами, що дозволяють отримати напір водяного струменя до 10 бар з можливістю генерування «мокрої» або «сухої» піни.



Рис. 1.21 – Пожежний автомобіль GPlus «HLF 20 OS»

У Російській Федерації з 2012 року компанією «СпецАвтоТехника» розроблено та впроваджено у виробництво систему гасіння пожеж компресійною піною «NATISK» [150]. Основними перевагами запропонованої системи виробники називають скорочення тривалості гасіння у 5–7 разів та зниження витрати води у 5–15 разів за рахунок скорочення тривалості роботи ствола. Кратність готової піни – 5–15. Повітря нагнітається від балонів під тиском. Із систем NATISK слід виділити мобільні системи пожежогасіння «NATISK–50M BL» (рис. 1.22, а), «NATISK–100M BL» та «NATISK–300M BL» (рис. 1.22, б) [150].



а)

б)

**Рис. 1.22 – Мобільні установки пожежогасіння «NATISK»**

Також «СпецАвтоТехника» виготовляє пожежні автомобілі, що реалізують систему NATISK [150]. Це пожежні автоцистерни та автомобілі першої допомоги, які можуть бути виготовлені на базі автомобілів Урал, КамАЗ, ГАЗ, УАЗ, SILANT (рис. 1.23).



**Рис. 1.23 – АПП-0,6-2,0 NATISK(2868 SILANT)**

Санкт-Петербурзькою фірмою «Сталт» розроблено та впроваджено технологію компресійної піни STALT-fireflex (рис. 1.24), що реалізована в системах автоматичного пожежогасіння [151]. У цих системах використовується 2%-й розчин піноутворювача, кратність готової піни – 10.



**Рис. 1.24 – Автоматична система пожежогасіння STALT-fireflex**



Серед відомих виробників систем пожежогасіння, що реалізують технологію генерування і подавання компресійної піни, слід виділити «WellCrown International Resources Ltd» (Гонконг), «KSSIELER Feuerwehr und Rettungssysteme» (Німеччина), «Firematic Supply Co.» (США), «W.S. Darley», «СпецАвтоТехника» (Росія) та інші. У США, Німеччині, Італії, Японії, Китаї, Франції практично в кожній пожежній частині є щонайменше один пожежний автомобіль, оснащений системою пожежогасіння, що передбачає генерування і подавання компресійної піни.

В табл. 1.2 наведено порівняльну характеристику продукції виробників систем генерування і подавання компресійної піни.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика продукції виробників систем для генерування і подавання компресійної піни

Виробник	Технологія	Концентрація водного розчину ПУ, %	Кратність піни
One seven	One seven	0,1–6,0	4–20
Rosenbauer	CAFS	0,3–0,6	7–20
Waterous	One Step	0,1–1, 3, 6	«Wet» або «dry»
Hale	CAFS S90 / CAFS 200	0,1–9,9	3–20
Сталт	STALT–fireflex	2–6	10
СпецАвто Техника	NATISK	1	5–20

Як зрозуміло з табл. 1.2, кожен з виробників пропонує різну кратність піни та вміст піноутворювача. Відсутні рекомендації щодо використання визначеної кратності та концентрації піноутворювача для гасіння пожеж твердих горючих речовин. Також незрозуміло, чим саме зумовлено вказані діапазони концентрації водних розчинів піноутворювачів і кратності генерованої піни: маркою піноутворювача, класом пожежі, видами горючих матеріалів чи іншими міркуваннями.

Проведений огляд дозволив визначити мету і задачі дослідження, які наведено у Вступі.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

#### 2.1 Розробка математичної моделі процесу генерування і подавання компресійної піни

Загальна тенденція під час проектування різноманітних конструкцій, особливо складних, побудованих на внутрішній взаємодії окремих структурних одиниць, – розробка математичної моделі (ММ), що передує конструктивним рішенням та часто є розрахунковою основою для них. Досить часто такою ММ є багатовимірна система рівнянь алгебраїчних, диференційних, яку можна вирішувати, як правило, тільки чисельними методами. Сучасні програмні продукти, такі як графічне середовище імітаційного моделювання Simulink (інтегроване у програмне середовище MatLab), що дозволяє за допомогою окремих блоків у вигляді направлених графів будувати динамічні моделі, є досить зручним інструментом для вирішення таких проблем у випадку описання стаціонарних та перехідних процесів під час проектування конструкцій. Структура такої моделі побудована на основі окремих, самостійних блоків, що самі по собі є окремими ММ. Кількість таких блоків може змінюватися, самі блоки можуть модернізуватися, вдосконалюватися.

Схема фізичних процесів [5], що мають місце в системі генерування і подавання компресійної піни, представлена на рис. 2.1 [5]. Водний розчин піноутворювача (заданої концентрації) знаходиться в ємності 1, тиск  $p_{\text{comp}}$  робочого газу (повітря), що є енергетичним джерелом роботи установки, подається до отвору 2. Необхідна кількість повітря та водного розчину піноутворювача регулюються відповідно дроселями: газовим 3, що має регульовану площу вихідного перерізу  $F_{\text{air}}$ , та витратою газу  $G_{\text{air}}$ , та рідинним 4, що має регульовану площу вихідного перерізу  $F_w$ , та витратою суміші (водний розчин піноутворювача)  $G_w$ . Далі повітря змішується з водним розчином піноутворювача в камері змішування 5 під тиском  $p_{\text{mix}}$ , маючи витрату  $G_{\text{mix}}$ , та проходить через вставку 6, де відбувається генерування КП, що надходить у передкамеру 8, яка має площу перерізу  $F_{\text{ex}}$  вихідного сопла та знаходиться під тиском  $p_{\text{ex}}$ . Готова піна виходить крізь сопло 7, що має площу вихідного перерізу  $F_{\text{atm}}$ .

ММ процесу генерування КП створено таким чином, що вона є об'єднанням окремих блоків, кожний з яких являє собою автономну ММ зі своїми входом та виходом, за допомогою яких здійснюється взаємодія між блоками у процесі виконання загальної задачі ММ.

Ці окремі блоки можна змінювати відповідно до змін конструкції системи, залишаючи сталою тільки зовнішню оболонку (кількість входів, виходів, розмірність) окремого блока. В математичному сенсі ця ММ є еволюційною системою диференційно-алгебраїчних рівнянь, що виконує задачу опису перехідного процесу (для певних заданих параметрів) у разі подавання тиску на вхідний отвір 2 системи.

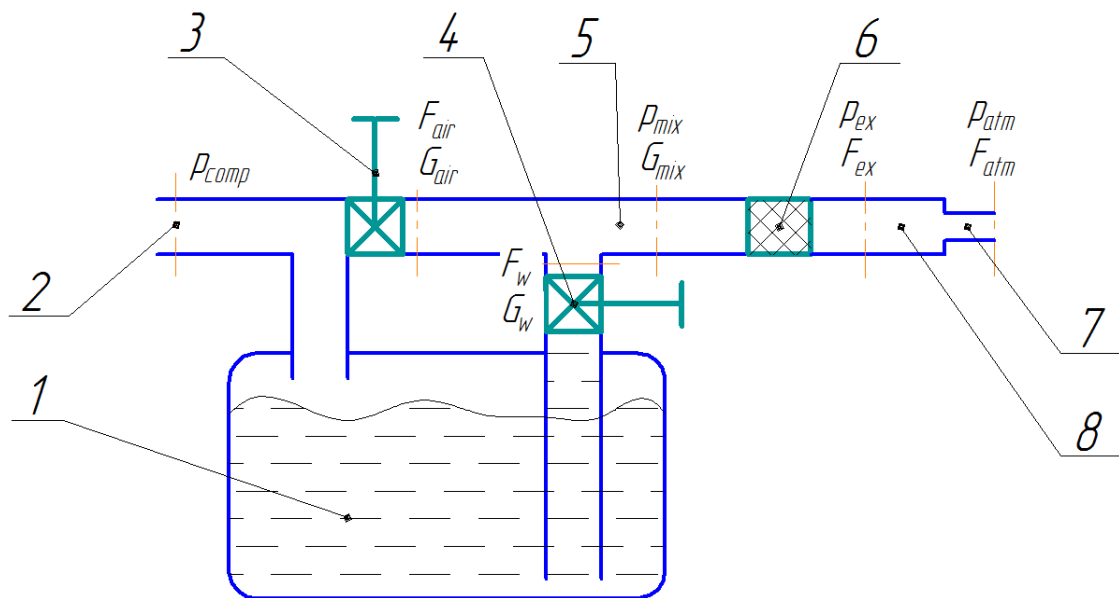


Рис. 2.1 – Фізична модель системи генерування і подавання КП:

1 – ємність із водним розчином піноутворювача; 2 – вхід для високого тиску; 3 – дросель газовий; 4 – дросель рідинний; 5 – камера змішування; 6 – піногенеруюча вставка; 7 – вихідне сопло; 8 – передкамера

Блок-схема ММ процесу генерації КП включає в себе [7] п'ять створених спеціальних блоків: Блок подачі газу («Air»), Блок подачі суміші води з піноутворювачем («Liquid»), Блок піногенеруючої вставки («Generator»), Блок руху піни у шлангу («Pipe»), Блок руху піни у каналі пістолета-розпилювача («Pistol») та систему комунікацій між блоками.

### 2.1.1 Блок подачі газу (згідно Блок-схеми ММ: «Air»)

Блок подачі газу розраховує параметри потоку газу на основі прийнятих даних про тиск на вході та на виході й установлених для нього параметрів.

Вхідними даними є:

- $p_{comp}$  – тиск на вході 2 в систему, Па;
- $p_{mix}$  – тиск у камері змішування 5, Па;
- $d_a$  – критичний діаметр газового сопла, м;
- $T$  – температура навколишнього середовища, К.

Вихідними даними є:

- $G_a$  – потік газу (масової витрати) через отвір сопла подачі газу, кг/с.

Для розрахунку параметрів потоку газу на основі прийнятих даних про тиск на вході та на виході й установлених для нього параметрів використаний метод гідродинамічних функцій (гл. 5, [152]). Згідно формул 127 та 128 [152] отримано величину приведеної швидкості:

$$\lambda = \sqrt{\left(1 - \frac{p_{\text{mix}}}{p_{\text{comp}}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot \frac{k+1}{k-1}}, \quad (2.1)$$

де  $p_{\text{comp}}$  – тиск, що діє на вході 2 в системі, Па;  
 $p_{\text{mix}}$  – тиск, що діє у змішувальній камері 5, Па;  
 $k$  – показник адіабати для робочого газу.

Тоді потік газу (масова витрата) через сопло, що утворюється при дроселюванні, обчислюється на основі формул 107 та 109, с. 237 [152], за такою формулою:

$$G_a = \frac{\pi \cdot d_{\text{air}}^2 \cdot m_{\text{const}} \cdot p_{\text{comp}} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}}{4 \cdot \sqrt{T}}, \text{ кг/с}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – приведена швидкість газу згідно з формулою (2.1);  
 $T$  – температура гальмування газу, К;  
 $m_{\text{const}}$  – характерна стала для газу, що обчислюється за формулою (згідно з формулою 109, розділ. 5, [152]):

$$m_{\text{const}} = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \frac{1}{R_{\text{air}}}}, \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}, \quad (2.3)$$

де  $R_{\text{air}}$  – універсальна газова стала для газу, Дж/(кг·К).  
Отримано алгоритм обчислення потоку газу  $G_a$  [6] (масової витрати) від наступних параметрів:

- $p_{\text{comp}}$  – тиск на вході в систему, Па;
- $p_{\text{mix}}$  – тиск у камері змішування, Па;
- $d_a$  – критичний діаметр газового сопла, м;
- $T$  – температура навколишнього середовища, К;
- $R_{\text{air}}$  – універсальна газова стала для газу, Дж/(кг·К).
- $k$  – показник адіабати для робочого газу.

### 2.1.2 Блок подачі суміші води та піноутворювача (згідно Блок-схеми ММ: «Liquid»)

Блок подачі суміші води та піноутворювача вирішує подібну задачу, як і блок подачі газу, але для рідинної фази на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході й установлених для нього параметрів.

Вхідними даними є:

- $p_{\text{comp}}$  – тиск в ємності суміші 1, Па;
- $p_{\text{mix}}$  – тиск у камері змішування 5, Па;

- $d_w$  – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.

Вихідними даними є:

- $G_w$  – потік суміші (масова витрата) крізь отвір сопла подачі, кг/с.

Виходячи з рівності потенційної енергії тиску в ємності суміші 1 та кінетичної енергії струменя води, що виходить з рідинного дроселя 4, використавши формулу 59, с. 28 [152] – рівняння Бернуллі для ідеальної нестисливої рідини, отримаємо [6] величину швидкості  $v_w$  цього струменя:

$$v_w = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_{\text{comp}} - p_{\text{mix}})}{\rho_w}}, \text{ м/с}, \quad (2.4)$$

де  $\rho_w$  – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м<sup>3</sup>.

Тоді потік суміші води з піноутворювачем можна обчислити за формулою:

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot d_w^2, \text{ кг/с}. \quad (2.5)$$

Отримано алгоритм обчислення потоку суміші води з піноутворювачем, що реалізує роботу блока подачі суміші води та піноутворювача  $G_w$  [6] від наступних параметрів:

- $p_{\text{comp}}$  – тиск в ємності суміші 1, Па;
- $p_{\text{mix}}$  – тиск у камері змішування 5, Па;
- $d_w$  – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.
- $\rho_w$  – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м<sup>3</sup>.

### 2.1.3 Блок руху піни у шлангу (згідно Блок-схеми ММ: «Pipe»)

Блок руху піни у шлангу вирішує задачу розрахунку параметрів потоку вже згенерованої піни через рукав на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході цього блока і установлених параметрів цього блока.

Вхідними даними блоку математичної моделі руху газорідинної суміші у шлангу («Pipe») є:

- $p_2$  – тиск на вході шланга, Па;
- $p_1$  – тиск на виході шланга, Па;
- $D$  – внутрішній діаметр шланга, м;
- $L$  – довжина шланга, м.

Вихідними даними є:

- $Q_w$  – потік рідинної фази газорідинного потоку (об'ємної витрати), м<sup>3</sup>/с;
- $Q_a$  – потік газової фази газорідинного потоку (об'ємної витрати), м<sup>3</sup>/с.

Зроблено припущення, виходячи з фізики процесів, при якому піногенеруюча вставка розглядається як осесиметричне пористе тіло з од-

новимірною течією газорідного потоку. Простішою моделлю газорідного потоку, згідно зі с. 141 [153], є квазігомогенна модель, що введена Г. Лоренцем. Тоді, згідно з формулою (6–4) [153], величина падіння тиску по довжині каналу піногенеруючої вставки для газорідної суміші дорівнюватиме:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{2 \cdot D} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w}\right) \cdot \frac{\omega''}{\omega'}\right), \quad \text{Па/м}, \quad (2.6)$$

де  $\psi$  – приведений коефіцієнт опору для прийнятих режимів руху газорідної суміші, її газовмісту та інших конструктивних особливостей, що уточнюються експериментальним шляхом;

$\lambda(p)$  – коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку, в нашому випадку – рідинної фази, що рухається із приведеною швидкістю рідинної фази;

$\rho_w$  – густина рідинної фази, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  – внутрішній діаметр шланга, м;

$\rho_{air}(p)$  – густина газової фази, що знаходиться під тиском  $p$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\omega'$  – приведена швидкість рідинної фази, м/с;

$\omega''$  – приведена швидкість газової фази, м/с.

На основі визначення поняття кратності (1.1) отримаємо величину  $Q_{a\_NC}$  – об'ємної витрати повітря:

$$Q_{a\_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (2.7)$$

де  $Q_{a\_NC}$  – об'ємна витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;

$Q_w$  – об'ємна витрата суміші води з піноутворювачем, м<sup>3</sup>/с.

$Q_a(p)$  – процес об'ємної витрати повітря, яке знаходиться в умовах тиску  $p$ ; вважаємо [6] ізотермічним термодинамічним процесом, тому формула буде мати вигляд:

$$Q_a(p) = Q_{a\_NC} \cdot \frac{p_{NC}}{p}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (2.8)$$

де  $Q_a(p)$  – об'ємна витрата газової фази, м<sup>3</sup>/с;

$p_{NC}$  – атмосферний тиск, Па;

$p$  – тиск, під яким знаходиться піна у розрахунковий момент часу, Па.

Об'ємний потік газорідної суміші, що знаходиться в умовах тиску  $p$ , обчислюємо [6] за формулою:

$$Q_f(p) = Q_a(p) + Q_w, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.9)$$

Масова витрата газу, з урахуванням формули (2.7), визначається [6] за формулою:

$$G_a = Q_{a\_NC} \cdot \rho_{a\_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_{a\_NC}, \text{ кг/с}, \quad (2.10)$$

де  $\rho_{air\_NC}$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Знаходимо [6] формулу густини газової фази, яка знаходиться в умовах тиску, підставивши значення величин, згідно з формулами (2.7), (2.8), (2.10), та зробивши алгебраїчні спрощення:

$$\rho_{air}(p) = \frac{G_a}{Q_a(p)} = \frac{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_w \cdot \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w}}{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{p_{NC}}{p}} = \frac{\rho_{a\_NC}}{p_{NC}} \cdot p, \text{ кг/м}^3. \quad (2.11)$$

Величини приведених швидкостей рідинної  $\omega'$  та газової фази  $\omega''$  згідно формули (1-23), [153]:

$$\omega' = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2}, \quad \omega'' = \frac{4 \cdot Q_a(p)}{\pi \cdot D^2}, \quad \text{м/с}. \quad (2.12)$$

Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda(p)$ , що входить до формули (2.8), згідно з методикою с. 143 [153], треба знайти витратну швидкість двофазного потоку (формула (1-27), [153]):

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w} \cdot \omega'', \quad \text{м/с}. \quad (2.13)$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda(p)$  обчислюється як коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку у випадку рідинної фази, для чого необхідно знайти число Рейнольдса для рідинної фази як функцію тиску:

$$\text{Re}(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{equ} \cdot \rho_w}{\mu_w}, \quad (2.14)$$

де  $\mu_w$  – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

Підставивши числові значення змінних та значення функції при типових режимах потоку, отримуємо [6], що число  $Re < 4000$ . Цей режим течії, згідно з формулою (2-3) [154], відповідає закону Гагена-Пуазейля; при цьому коефіцієнт гідродинамічного опору цієї течії обчислюється за формулою:

$$\lambda(p) = \frac{64}{Re(p)}. \quad (2.15)$$

Підставивши у формулу (2.6) значення  $\lambda(p)$  – згідно з формулою (2.15),  $\rho_{air}(p)$  – згідно з формулою (2.11),  $\dot{\omega}$ ,  $\ddot{\omega}$  – згідно з формулою (2.12), виконавши спрощення та перетворення, отримуємо [6]:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dL} = & \frac{\psi \cdot \frac{128 \cdot \mu_w \cdot \rho_w}{\pi \cdot D^4}}{(\rho_w + (k_m - 1) \cdot \rho_{a\_NC})^2} \cdot Q_w \cdot \\ & \cdot (\rho_w + \rho_{a\_NC} + \frac{p_{NC}^2 \cdot \rho_w \cdot (k_m - 1)^2}{p^2} + \text{Па/м.} \quad (2.16) \\ & + \frac{p_{NC} \cdot (k_m - 1) \cdot (2 \cdot \rho_w - \rho_{a\_NC} \cdot (k_m - 1))}{p}) \end{aligned}$$

Вирішуючи це рівняння методом розділення змінних та для зменшення громіздкості виразу, вводячи проміжні змінні  $a, b, c, d$ , отримуємо [6] величину об'ємної витрати рідинної фази  $Q_w$  в залежності від вхідного  $p_2$  та вихідного  $p_1$  тиску:

$$\begin{aligned} a = & \frac{\psi \cdot \frac{128 \cdot \mu_w \cdot \rho_w}{\pi \cdot D^4}}{(\rho_w + (k_m - 1) \cdot \rho_{a\_NC})^2}, \\ b = & \rho_w + \rho_{a\_NC}, c = p_{NC}^2 \cdot \rho_w \cdot (k_m - 1)^2, \\ d = & p_{NC} \cdot (k_m - 1) \cdot (2 \cdot \rho_w - \rho_{a\_NC} \cdot (k_m - 1)), \quad \text{м}^3/\text{с.} \quad (2.17) \\ Q_w = & \frac{\frac{1}{a} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{(b + \frac{c}{p^2} + \frac{d}{p})} dp}{L} \end{aligned}$$

Обчисливши інтеграл у цій формулі та зробивши алгебраїчні перетворення, отримуємо [6] величину об'ємної витрати рідинної фази  $Q_w$  в залежності від вхідного  $p_2$  та вихідного  $p_1$  тиску в аналітичному вигляді:



$$Q_w = \frac{p_2 - p_1}{a \cdot b \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot (d \cdot \ln(\frac{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c}{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}) + \frac{(2 \cdot b \cdot c - d^2) \cdot (p_1 - p_2)}{\sqrt{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c} \cdot \sqrt{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}}), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.18)$$

де проміжні змінні  $a, b, c, d$  обчислюються згідно (2.17).

Для обчислення об'ємної витрати газової фази, скориставшись рівнянням (2.7), отримаємо [6]:

$$Q_{a\_NC} = \frac{k_m - 1}{a \cdot b \cdot c} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{k_m - 1}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot (d \cdot \ln(\frac{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c}{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}) + \frac{(k_m - 1) \cdot (2 \cdot b \cdot c - d^2) \cdot (p_1 - p_2)}{\sqrt{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c} \cdot \sqrt{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}}), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.19)$$

Отримано [6] алгоритм обчислення об'ємних витрат газової  $Q_{a\_NC}$  та рідинної фази  $Q_w$  газорідинної суміші, що моделює роботу блока руху піни у шлангу («Pipe») від наступних параметрів:

- $p_2$  – тиск на вході шланга, Па;
- $p_1$  – тиск на виході шланга, Па;
- $D$  – внутрішній діаметр шланга, м;
- $L$  – довжина шланга, м;
- $k_m$  – кратність піни;
- $\mu_w$  – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

#### 2.1.4 Блок піногенератора (згідно Блок-схеми ММ: «Generator»)

Блок піногенератора обчислює параметри потоку газорідинної суміші та кратність піни, що утворюється на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході цього блока  $Q$  установлених параметрів цього блока.

Вхідними даними блоку піногенератора, де реалізується математична модель проходження газорідинної суміші («Generator») через піногенератор, є:

- $p_2$  – тиск на вході піногенеруючої вставки, Па;
- $p_1$  – тиск на виході піногенеруючої вставки, Па;
- $\varepsilon$  – порозність пористого тіла;
- $D$  – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- $L$  – довжина піногенеруючої вставки, м;
- $h_s$  – товщина піногенеруючих елементів, м;
- $b_s$  – ширина піногенеруючих елементів, м;

Вихідними даними є:

- потік рідинної фази газорідинного потоку  $Q_w$  (об'ємна витрата) у передкамеру 8, м<sup>3</sup>/с;

– потік газової фази газорідинного потоку  $Q_a$  (об'ємна витрата) у передкамеру 8, м<sup>3</sup>/с.

Зроблено [7] припущення, виходячи з фізики процесів, згідно з яким піногенеруюча вставка розглядається як осесиметричне пористе тіло з одновимірною течією газорідинного потоку. Моделлю газорідинного потоку, згідно зі с. 141 [153], є квазігомогенна модель, що введена Г. Лоренцем. Тоді, згідно з формулою (6–4) [153], величина падіння тиску по довжині каналу піногенеруючої вставки для газорідинної суміші:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{d_{\text{equ}}} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{\text{air}}(p)}{\rho_w}\right) \cdot \frac{\omega''}{\omega'}\right), \text{ Па/м}, \quad (2.20)$$

де  $\psi$  – приведений коефіцієнт опору для прийнятих режимів газовмісту, що уточнюються експериментальним шляхом;

$\lambda(p)$  – коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку, в нашому випадку – рідинної фази, що рухається із приведеною швидкістю рідинної фази;

$\rho_w$  – густина рідинної фази, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{\text{equ}}$  – еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки, м;

$\rho_{\text{air}}(p)$  – густина газової фази, що знаходиться під тиском  $p$ , кг/м<sup>3</sup>;

$\omega'$  – приведена швидкість рідинної фази, м/с;

$\omega''$  – приведена швидкість газової фази, м/с;

При визначенні  $Q_a(p)$  – об'ємної витрати повітря, яке знаходиться в умовах тиску  $p$ , важливо зауважити [7], що під час проходження потоку через цей блок має місце дуже активне перемішування та контактування обох фаз, що формують газорідинну суміш. Внаслідок більш значної масової витрати води (за типових значень кратності) встигає відбутися обмін тепла між окремими фазами, тому зазначений процес вважаємо [7] ізотермічним термодинамічним процесом, тому значення цієї величини будемо обчислювати за формулою (2.8).

Для обчислення об'ємного потоку газорідинної суміші  $Q_f$ , що знаходиться в умовах тиску  $p$ , скористаємося [7] формулою (2.9).

Для обчислення масової витрати газу скористаємося [7] формулою (2.10).

Знаходимо [7] формулу густини газової фази, яка знаходиться в умовах тиску, згідно з формулою (2.11).

Оскільки піногенеруюча вставка має пористу структуру, то для опису фізичних процесів, що мають місце в пористій структурі, згідно з методикою с. 176 [155], необхідно знайти:

- фіктивну швидкість газорідинного потоку;
- дійсну швидкість газорідинного потоку;
- порозність піногенеруючої вставки;

- сумарну площу поверхні елементів піногенеруючої вставки;
- питому поверхню елементів піногенеруючої вставки;
- еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки.

Величини фіктивних приведених швидкостей рідинної  $\omega'_{im}$  та газової фаз  $\omega''_{im}$ , віднесених до всієї площі поперечного перерізу піногенеруючої вставки, знаходимо згідно з формулою (1-23) [128]:

$$\omega'_{im} = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2}, \quad \omega''_{im} = \frac{4 \cdot Q_a(p)}{\pi \cdot D^2}, \quad \text{м/с}, \quad (2.21)$$

де  $Q_a(p)$  – об'ємна витрата газової фази газорідинного потоку, який знаходиться в умовах тиску  $p$  та визначається за формулою (2.8), м<sup>3</sup>/с;

$Q_w$  – об'ємна витрата рідинної фази газорідинного потоку, м<sup>3</sup>/с;

$D$  – внутрішній діаметр порожнини піногенератора, м.

Тоді, згідно з формулою 6–99 [155], отримуємо [7] дійсні швидкості рідинної  $\omega$  та газової фаз  $\omega$  газорідинного потоку:

$$\omega' = \frac{\omega'_{im}}{\varepsilon}, \quad \omega'' = \frac{\omega''_{im}}{\varepsilon}, \quad \text{м/с}. \quad (2.22)$$

Порозність  $\varepsilon$ , згідно с. 176 [155], визначаємо [7] за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V_G \cdot \rho_{Fe} - m}{V_G \cdot \rho_{Fe}}, \quad (2.23)$$

де  $m$  – маса елементів, з яких складається пористе тіло піногенеруючої вставки, кг;

$V_G$  – внутрішній об'єм порожнини піногенератора, м<sup>3</sup>;

$\rho_{Fe} = 7,8$  – густина матеріалу елементів, з яких складається пористе тіло піногенеруючої вставки, кг/м<sup>3</sup>.

Об'єм цих елементів обчислюємо [7] за формулою:

$$V_{wire} = V_G \cdot (1 - \varepsilon), \quad \text{м}^3. \quad (2.24)$$

Тоді їх сумарну довжину розраховуємо [7] за формулою:

$$L_s = \frac{V_{wire}}{h_s \cdot b_s}, \quad \text{м}. \quad (2.25)$$

Об'єм порожнини піногенератора, в якій поміщаються елементи піногенеруючої вставки, який має у нашому випадку форму циліндра, отримуємо [7] за формулою:

$$V_G = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L, \quad \text{м}^3. \quad (2.26)$$

Тоді сумарну площу поверхні елементів піногенеруючої вставки з підстановкою значень за формулами:  $V_{\text{wire}}$  – (2.24),  $L_s$  – (2.25),  $V_g$  – (2.26) визначаємо [7] за формулою:

$$S_{\text{wire}} = 2 \cdot (h_s + b_s) \cdot L_s = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(h_s + b_s)}{h_s \cdot b_s} \cdot D^2 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon), \quad \text{м}^2. \quad (2.27)$$

Питому поверхню елементів піногенеруючої вставки, згідно с. 176 [155], визначаємо [7] за формулою:

$$\Pi = \frac{S_{\text{wire}}}{V_G}, \quad \text{м}^2/\text{м}^3. \quad (2.28)$$

Еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки, згідно з формулою (6–100) [155], визначаємо [7] за формулою:

$$d_{\text{equ}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{\Pi}, \quad \text{м}. \quad (2.29)$$

Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору  $\lambda(p)$ , що входить до формули (2.6), згідно з методикою с. 143 [153], треба знайти витратну швидкість двофазного потоку (формула (1–27), [153]):

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{\text{air}}(p)}{\rho_w} \cdot \omega'', \quad \text{м/с}. \quad (2.30)$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda(p)$  обчислюється як коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку, в нашому випадку – рідинної фази, для чого необхідно знайти число Рейнольдса для рідинної фази як функцію тиску:

$$\text{Re}(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{\text{equ}} \cdot \rho_w}{\mu_w}, \quad (2.31)$$

де  $\mu_w$  – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

Підставивши числові значення змінних та значення функції при типових режимах піногенерації, отримаємо [7], що число  $\text{Re} < 4000$ . Цей режим течії, згідно з формулою (2–3) [154], відповідає закону Гагена–

Пуазейля. Тоді величина гідродинамічного опору  $\lambda(p)$  обчислюється [7] за формулою (2.15).

Для обчислення об'ємного газовмісту газорідного потоку, що розглядається як функція тиску, скористаємося [7] формулою (1-24) [153] та, зробивши підстановки:  $Q_a(p)$  – згідно (2.8),  $Q_f(p)$  – згідно (2.9),  $Q_{a\_NC}$  – згідно (2.7) та алгебраїчні перетворення, отримаємо:

$$\varphi(p) = \frac{Q_a(p)}{Q_f(p)} = \frac{Q_{a\_NC} \cdot \frac{P_{NC}}{p}}{Q_{a\_NC} \cdot \frac{P_{NC}}{p} + Q_w} = \frac{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{P_{NC}}{p}}{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{P_{NC}}{p} + Q_w} = \frac{(k_m - 1) \cdot P_{NC}}{k_m \cdot P_{NC} + p - P_{NC}}. \quad (2.32)$$

Підставивши у формулу (2.20) результати обчислень величин:  $\lambda(p)$  – згідно (2.15),  $\omega'$  та  $\omega''$  – згідно (2.12),  $d_{equ}$  – згідно (2.29),  $\rho_{air}(p)$  – згідно (2.11) та зробивши алгебраїчні перетворення, отримаємо [7] диференціальне рівняння для градієнта тиску вздовж осі піногенератора:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{128 \cdot \mu_w \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2} \cdot \frac{\left( \frac{P_{NC} \cdot (k_m - 1)}{p} - \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1) + 1 \right)}{\left( \frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{(h_s + b_s)} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \left( 1 + \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1) \right)}, \text{ Па/м.} \quad (2.33)$$

Розв'язуючи це рівняння методом розділення змінних, отримаємо [7] інтеграл величини об'ємної витрати рідинної фази в залежності від вхідного  $p_2$  та вихідного  $p_1$  тиску:

$$Q_w = \frac{\pi}{128 \cdot \mu_w \cdot \psi} \cdot \frac{D^2}{L} \cdot \left( \frac{2 \cdot h_s \cdot b_s}{(h_s + b_s)} \right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \times \\ \times \int_{p_1}^{p_2} \frac{\left( 1 + \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1) \right)}{\frac{P_{NC} \cdot (k_m - 1)}{p} - \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1) + 1} \quad , \text{ м}^3/\text{с.} \quad (2.34)$$

Обчисливши цей інтеграл, зробивши алгебраїчні спрощення та для зменшення громіздкості ввівши допоміжні змінні  $a$ ,  $b$ , отримаємо [7] сукупність формул для обчислення об'ємної величини витрати рідкої фази:

$$\begin{aligned}
a &= \frac{(k_m - 1) \cdot \rho_{a\_NC}}{\rho_w} - 1, \\
b &= (k_m - 1) \cdot p_{NC}, \\
Q_w &= \frac{\pi \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1)\right)}{32 \cdot \psi \cdot \mu_w} \cdot \left(\frac{h_s \cdot b_s}{(h_s + b_s)}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{D^2}{L} \times, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.35) \\
&\times \frac{b \cdot \ln\left(\frac{b - p_1 \cdot a}{b - p_2 \cdot a}\right) + p_1 \cdot a - p_2 \cdot a}{a^2}
\end{aligned}$$

Використавши рівняння (2.7), отримаємо [7] формулу для об'ємної витрати газової фази:

$$\begin{aligned}
Q_{a\_NC} &= \frac{\pi \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a\_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1)\right)}{32 \cdot \psi \cdot \mu_w} \cdot \left(\frac{h_s \cdot b_s}{(h_s + b_s)}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3 \cdot (k_m - 1)}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{D^2}{L} \times, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.36) \\
&\times \frac{b \cdot \ln\left(\frac{b - p_1 \cdot a}{b - p_2 \cdot a}\right) + p_1 \cdot a - p_2 \cdot a}{a^2}
\end{aligned}$$

Отримано [7] алгоритм обчислення об'ємних витрат газової  $Q_a$  та рідинної фази  $Q_w$  газорідинної суміші, що моделює роботу піногенератора (згідно Головної блок-схеми ММ: «Pre Camera & Porous Body») від наступних параметрів:

- $p_2$  – тиск на вході піногенеруючої вставки, Па;
- $p_1$  – тиск на виході піногенеруючої вставки, Па;
- $\varepsilon$  – порозність пористого тіла;
- $D$  – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- $L$  – довжина піногенеруючої вставки, м;
- $h_s$  – товщина піногенеруючих елементів, м;
- $b_s$  – ширина піногенеруючих елементів, м;
- $\mu_w$  – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с;
- $k_m$  – кратність піни.

### 2.1.5 Розробка системи комунікації між блоками

Основними блоками блок-схеми ММ процесу генерації КП є:

- два блоки, що комунікують паралельно, – це блоки «Liquid» та «Air»;
- три блоки, що комунікують послідовно, – це блоки «Generator» та «Pipe», «Pistol».

Якщо для симуляції двох блоків з паралельною комунікацією труднощів не виникає, то для забезпечення симуляції блоків, що комунікують послідовно, необхідна розробка системи комунікації між ними. Завдання цієї системи полягає в тому, щоб забезпечити під час симуляції та в її результаті вирівнювання величин потоків обох блоків, тим самим забезпечуючи закон збереження маси по всьому тракту Установки.

Принцип побудови такої системи використовує допоміжні елементарні блоки із «Simulink Library», а саме: «Math Operations», «Gain», «Integrator», «Sum» та зображений на рис. 2.2 [7].

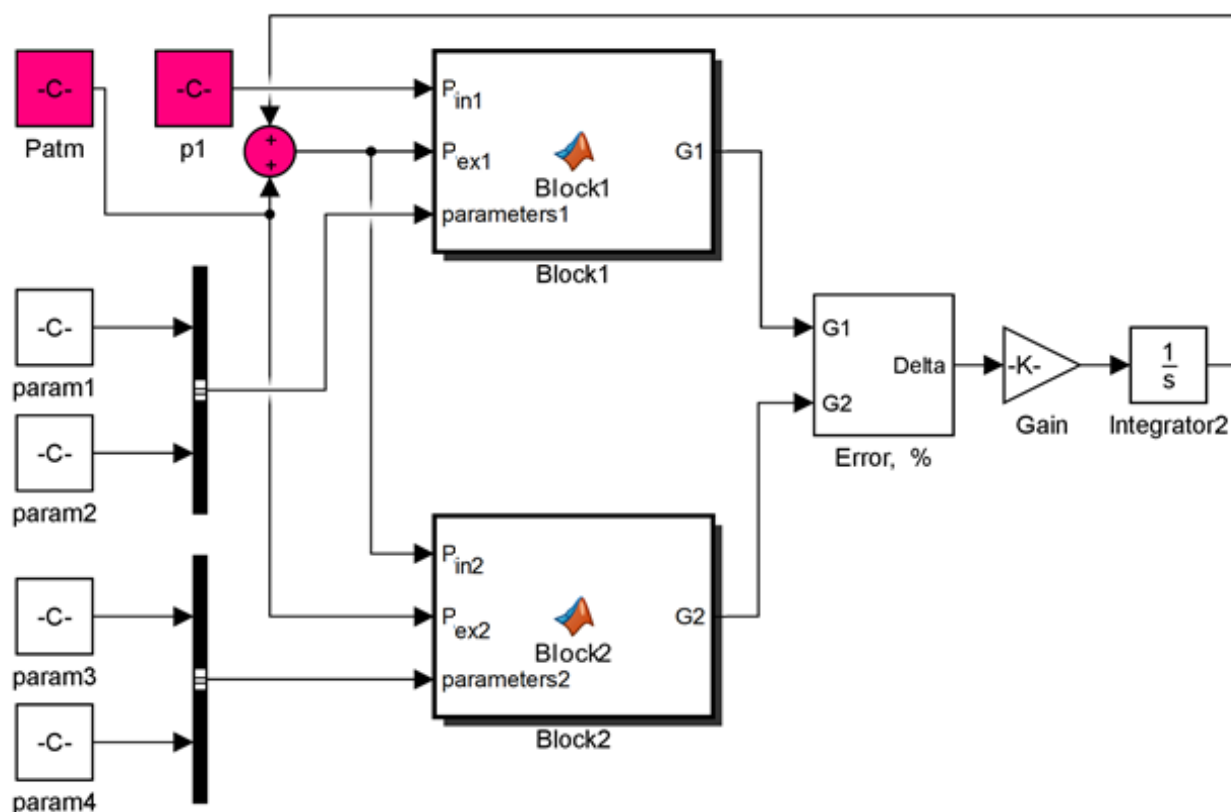


Рис. 2.2 – Структура системи комунікації блоків, що мають послідовне сполучення [7]

На цьому рисунку зображено два блоки, що комунікують послідовно: «Block1» та «Block2». Структура обох блоків є ідентичною та відповідає структурі блоків «Generator», «Pipe» та «Pistol» блок-схеми (рис. 2.3):  
Вхідні параметри:

- $p_{in1}$  ( $p_{in2}$ ) – вхідний тиск, Па, – величина, що не змінюється під час симуляції;
- $p_{ex1}$  ( $p_{ex2}$ ) – вихідний тиск, Па, – величина, що змінюється під час симуляції;
- parameters1 (parameters2) – величини, що не змінюються під час симуляції.

Вихідні параметри:

- $G_1$  ( $G_2$ ) – потік газорідинної суміші, кг/с, – величина, що обчислюється в цьому блоці.

Така структура під час симуляції повинна мінімізувати абсолютну величину різниці між потоками обох блоків. Для підтвердження цього напишемо [7] рівняння:

$$\delta(t) = G_1 \cdot \left( p_{in1}, \int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm} \right) - G_2 \cdot \left( \int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm}, p_{atm} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.37)$$

де  $\delta(t)$  – цільова функція, що обирається для оцінки величини різниці між потоками обох блоків, див. формулу (2.38);

$G_1, G_2$  – функції, що виражають залежність потоку  $i$ -го блока від його вхідних даних,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$p_{in1}$  – вхідний тиск першого блока «Block1», Па;

$\int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt$  – вихідний тиск першого блока «Block1» та, згідно зі схемою, див. (2.6), вхідний тиск другого блока «Block2», Па;

$k$  – стала, що обирається виходячи з оптимізації машинного часу комп'ютера;

$0 \dots T$  – часовий інтервал моделювання, що обирається виходячи з оптимізації машинного часу комп'ютера, с;

$p_{atm}$  – атмосферний тиск.

В якості цільової функції  $\delta(t)$  обрано [7] наступну:

$$\delta(t) = \frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2}) - G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{\frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2})}{2} + \frac{G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{2}} \quad (2.38)$$

Для забезпечення взаємодії між блоками розроблено систему комунікації, яка під час обчислювального процесу мінімізує різницю між масовими потоками кожного з послідовно з'єднаних блоків, що відповідає стаціонарному режиму роботи установки.

### 2.1.6 Функціонування блок-схеми ММ процесу генерування КП

Блок-схема ММ процесу генерування КП представлена на рис. 2.3.

Вхідні дані:

- «p\_somp» – тиск на виході компресора, Па;
- «d\_liq» – критичний діаметр рідинного сопла, м;
- «d\_air» – критичний діаметр газового сопла, м;
- «T» – температура навколишнього середовища, К;
- «D\_g» – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- «L\_g» – довжина піногенеруючої вставки, м;
- «epsilon» – порозність пористого тіла;
- «h\_s» – товщина піногенеруючих елементів, м;
- «b\_s» – ширина піногенеруючих елементів, м;



- «D\_pipe» – внутрішній діаметр шланга, м;
- «L\_Pipe» – довжина шланга, м;
- «D\_pistol» – внутрішній діаметр каналу пістолета-перемикача, м;
- «L\_pistol» – довжина каналу пістолета-перемикача, м;
- «p\_atm» – нормальний атмосферний тиск, Па.

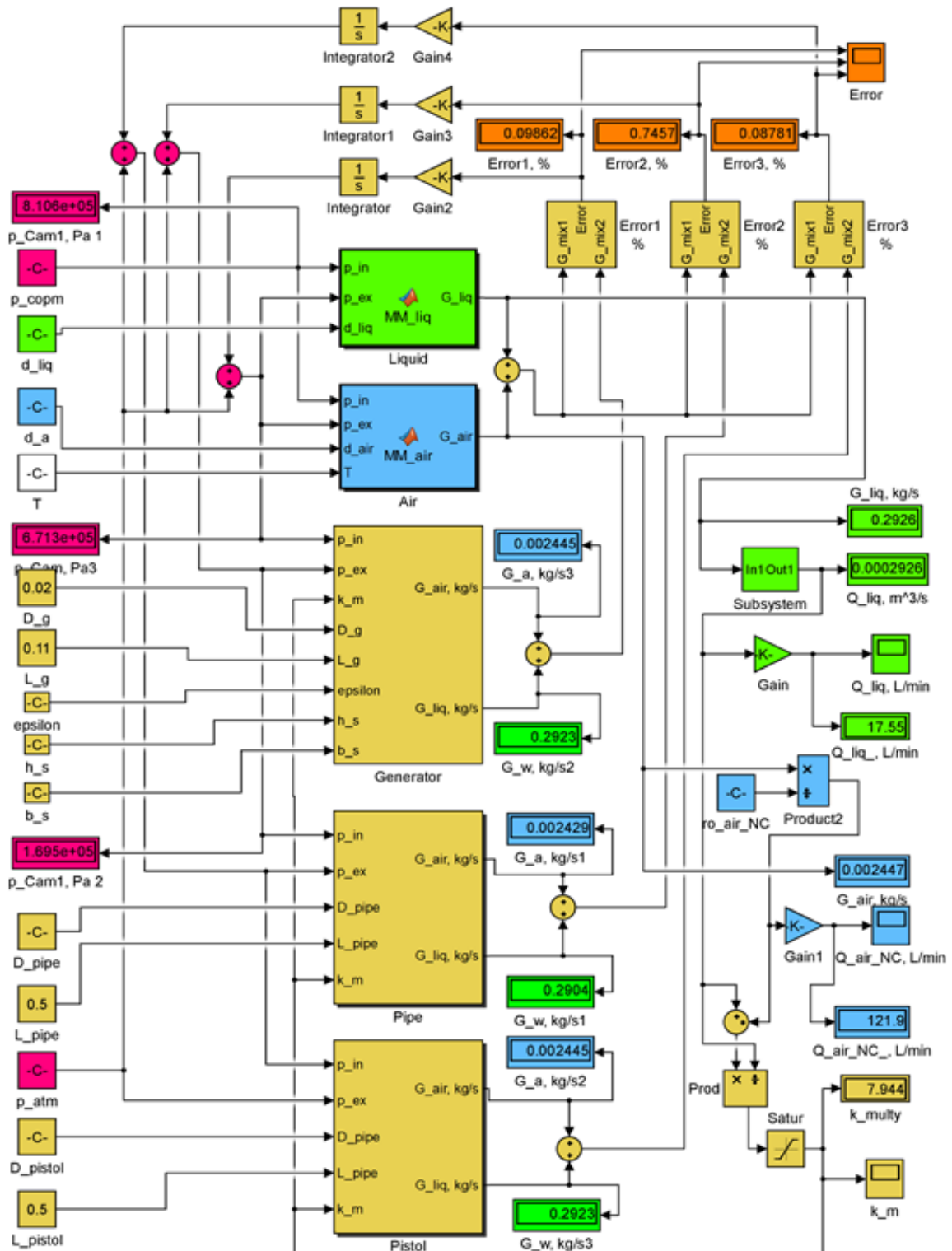


Рис. 2.3 – Блок-схема ММ [7]

Вихідними даними є:

- «Q\_liq» – потік рідинної фази газорідинного потоку (об’ємна витрата), м<sup>3</sup>/с;
- «Q\_air» – потік газової фази газорідинного потоку (об’ємна витрата), м<sup>3</sup>/с;
- «k\_m» – кратність піни;
- «Error1», «Error2», «Error3» – відносні помилки розрахунку для трьох блоків: «Generator», «Pipe», «Pistol».

Початкові умови для змінних величин:

- $p_{in} = 0,1$  МПа, вхідний тиск блоків «Generator», «Pipe», «Pistol»;
- $p_{ex} = 0,1$  МПа, вихідний тиск блоків «Generator», «Pipe», «Pistol».

В результаті симуляції відбувається асимптотичне наближення вихідних даних («Q\_liq», «Q\_air», «k\_m», «Error1», «Error2», «Error3») та змінних величин вхідних та вихідних тисків («p\_in», «p\_ex») блоків: «Generator», «Pipe», «Pistol» до параметрів стаціонарного режиму функціонування математичної моделі генерування КП.

Принцип використання створеної ММ процесу генерування КП полягає у підборі величин вхідних параметрів, що задовольняють заданим вихідним параметрам.

Для потреб проєктування системи для подавання компресійної піни за допомогою створеної ММ було проведено [2] числове моделювання за різних початкових параметрів системи, результати якого наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати чисельного моделювання роботи ММ процесу генерування КП

$P_{comp}$ , МПа	$P_{mix}$ , МПа	$P_{ex}$ , МПа	$d_w$ , 10 <sup>-3</sup> м	$d_a$ , 10 <sup>-3</sup> м	$d_j$ , 10 <sup>-3</sup> м	$k_m$	Витрата водного розчину ПУ $Q_w$ , л/с	Витрата повітря, $Q_a$ , л/с	Тривалість спороження газового балона 7 л $\tau_a$ , хв	Необхідна ємність для водного розчину ПУ $V_w$ , л
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25-D25-L80										
0,8	0,8	2,4	8	9	10	104	0,17	18	1,3	10,2
0,8	0,8	2,4	9	9	10	82	0,2	16	1,5	11,4
0,8	0,8	2,4	12	9	10	47	0,26	12	2	17
0,8	0,8	2,4	15	9	10	30	0,33	10	2,4	18,3
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25-D25-L60										
0,6	0,58	2,3	4,6	5	8	82	0,12	9,95	2,2	7,2
0,6	0,58	2,3	5	5	8	82	0,13	9,1	2,4	7,8
0,8	0,78	2,9	5	5	8	81	0,15	12,4	1,7	9
0,8	0,76	2,9	5	4	8	51	0,19	9,7	2,35	11,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25-D25-L120										
0,8	0,8	1,7	20	7	10	11	0,4	4,1	5,7	99,1
0,8	0,8	1,7	15	7	10	19	0,3	5,4	4,3	65
0,8	0,8	1,7	12	7	10	29	0,25	6,7	3,5	52
0,8	0,8	1,8	8	7	10	63	0,16	10	2,4	18,3
0,8	0,8	1,8	6	7	10	111	0,12	13	1,8	11,9
0,8	0,8	1,7	18	6	10	10	0,43	3,9	6	155
0,8	0,8	1,7	12	5	10	15,1	0,34	4,85	4,85	98,9
0,8	0,8	1,7	12	4	10	10	0,43	3,4	6	155
0,8	0,8	1,7	12	6	10	21	0,28	5,7	4	67,2
0,8	0,8	1,8	8	6	10	47	0,19	8,5	2,7	30,8
0,8	0,8	1,8	6	6	10	82	0,14	11	2,1	17,6
0,8	0,8	1,8	5	6	10	117	0,11	13	1,8	11,9

На рис. 2.4 зображено залежність кратності компресійної піни  $K$  від зміни діаметрів водяного  $d_w$  та повітряного  $d_a$  сопел.

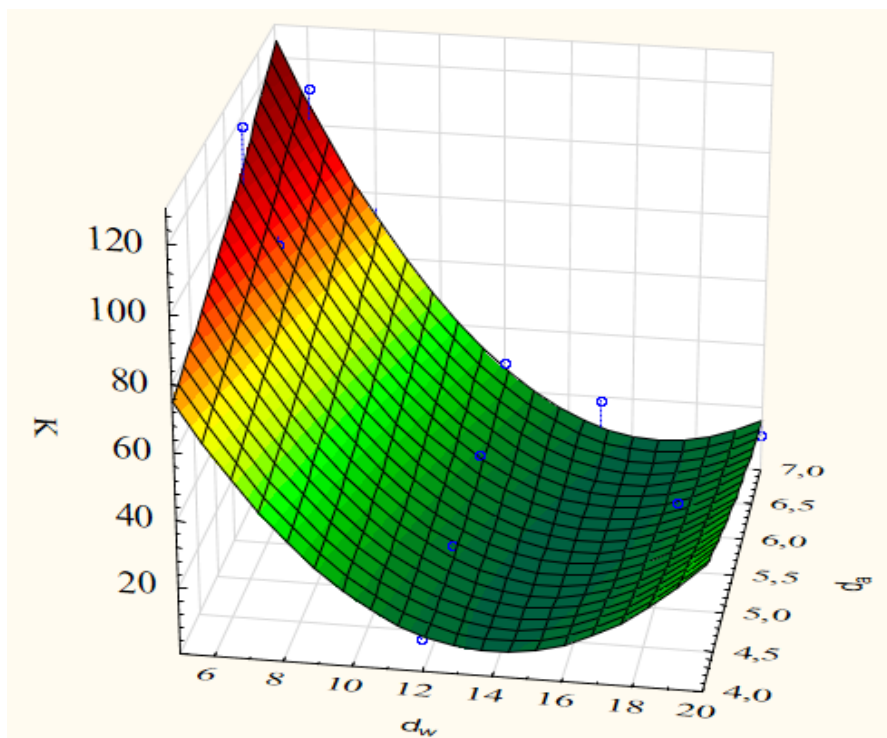


Рис. 2.4 – Залежність кратності компресійної піни  $K$  від зміни діаметрів водяного  $d_w$  та повітряного  $d_a$  сопел

$$K = 116,34 - 16,9 \cdot d_w + 7,3642 \cdot d_a + 0,83 \cdot d_w^2 - 1,608 \cdot d_w \cdot d_a + 1,58 \cdot d_a^2. \quad (2.39)$$

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 2.4, за сталого діаметра повітряного сопла  $d_a = 6$  мм та зменшення діаметра водяного сопла  $d_w$  від 12 мм до 6 мм (на 50 %), спостерігається суттєва зміна кратності  $K$ , яка

зменшується на 75 %, відповідно з 117 до 21. Це зумовлено сталою пропускною здатністю отвору повітряного сопла  $d_a$  та зменшенням пропускної здатності отвору водяного сопла  $d_w$ . Також за незмінного діаметра водяного сопла  $d_w=12$  мм і збільшення діаметра повітряного сопла  $d_a$  від 4 мм до 6 мм спостерігається збільшення кратності на 47 %, відповідно з 10 до 21. Отже, виходячи з аналізу графіка, встановлено, що на кратність піни  $K$  впливає пропускна здатність водяного  $d_w$  і повітряного  $d_a$  сопел. У разі збільшення або зменшення водяного сопла  $d_w$  відповідно зменшується або зростає кратність піни  $K$ . Зміна кратності  $K$  від зміни діаметра повітряного сопла  $d_a$  має обернено пропорційний характер відносно водяного сопла  $d_w$ , а саме за збільшення або зменшення діаметра повітряного сопла  $d_a$  кратність  $K$  відповідно зростає або зменшується.

## **2.2 Розробка експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни**

Для створення експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни, окрім отриманих розрахунків технічних параметрів системи, за допомогою математичної моделі процесу генерування компресійної піни необхідно провести аналіз існуючих технологій перемішування повітря і розчину піноутворювача та елементів спінювання, які можуть бути використані в камерах змішування.

Дослідження [139, 156] було спрямоване на пошук оптимальних способів перемішування повітря та розчину піноутворювача в системах для генерування і подавання компресійної піни. Експериментально визначено більш ефективний спосіб [139]. Результати показали, що піна, яка утворена за допомогою коаксіального (співосного) способу перемішування, володіє більш ефективними вогнегасними властивостями, ніж піна, утворена шляхом вертикального введення повітря, а саме утворюється більш однорідна піна.

З урахуванням аналізу та результатів дослідів [139, 156] розроблено оригінальний пінозмішувач коаксіального типу [9].

Спроектований пінозмішувач складається з циліндричного корпусу, каналу для подавання розчину піноутворювача, каналу для подавання повітря під тиском, камери змішування та камери піноутворення. Новим є те, що камера змішування виготовлена у вигляді знімного реактора з циліндричним каналом для подавання водного розчину піноутворювача всередині та радіально розташованими отворами для подавання повітря під тиском, що мають форму сопел Лавалю, а в камері піноутворення встановлено пакет сіток. Використання знімного реактора запропонованої конструкції для піноутворення дозволяє інтенсифікувати процес піноутворення, що покращить якість та однорідність компресійної піни, а встановлення пакета сіток у камері піноутворення дозволить отримувати бульбашки в піні необхідного діаметра, що будуть за розміром дорів-

нювати розміру комірок сіток. Загальний вигляд пінозмішувача наведено на рис. 2.5.

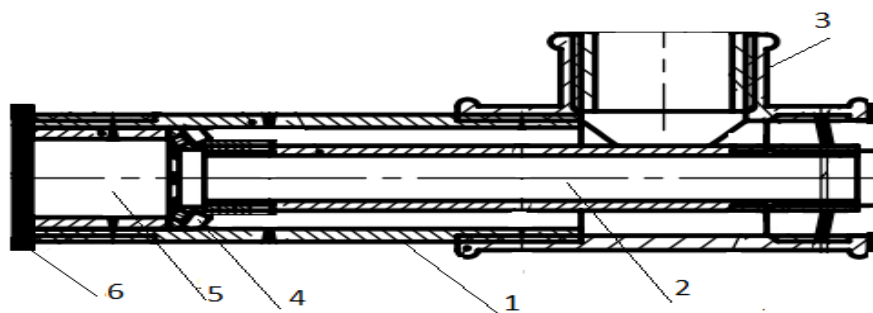


Рис. 2.5 – Загальний вигляд розробленого пінозмішувача:

1 – циліндричний корпус; 2 – канал для подавання водного розчину піноутворювача; 3 – канал для подавання повітря під тиском; 4 – знімний реактор; 5 – камера піноутворення; 6 – пакети сіток

На рис. 2.6 наведено оригінальний знімний реактор власної розробки.

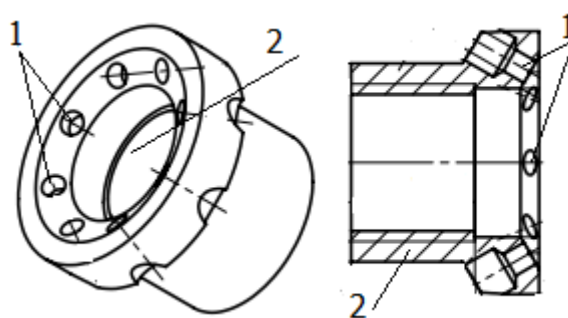


Рис. 2.6 – Оригінальний реактор для перемішування власної розробки:

1 – отвори для подавання повітря; 2 – трубопровід для подавання водного розчину піноутворювача

Після проведення аналізу конструкційних елементів, які використовують у статичних змішувачах [4], в якості пористого тіла нами обрано тип нерегулярних насадкових елементів. До основних характеристик пористого тіла слід віднести такі характеристики, як його довжина  $H_{gr}$ , середня товщина стінок  $d_{gr}$  і порозність  $\epsilon_{gr}$ . Вибір зазначених нерегулярних насадкових елементів зумовлений з економічної та конструктивної точок зору. Зі сторони конструктивного виконання вказані елементи є дуже простими у користуванні. Економічність обраного типу зумовлена широким поширенням та низькою вартістю, у порівнянні з іншими елементами, які можуть бути використані як елементи спінювання у статичних змішувачах.

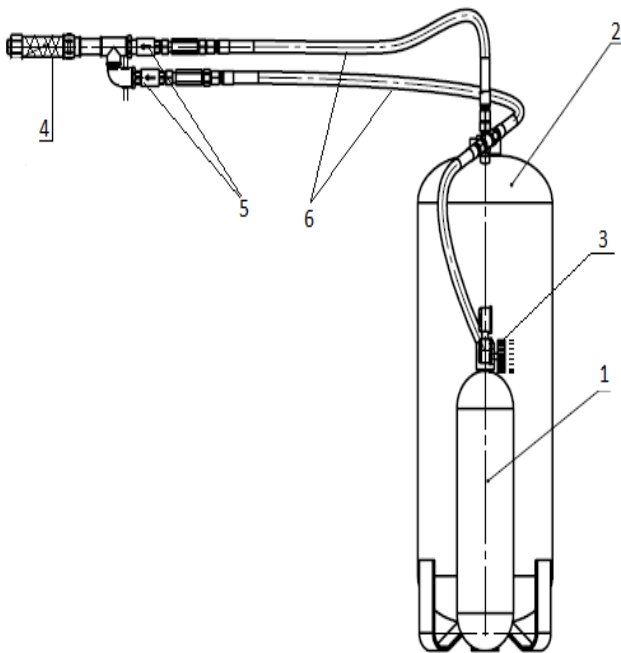
Тип нерегулярних насадкових елементів, застосованих в експериментальному зразку генерування і подавання компресійної піни [11], наведено на рис. 2.7.

З урахуванням вищевикладеного та розрахунків, одержаних під час математичного моделювання [2], виготовлено експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни. Зразок системи складається з таких основних елементів: компресор (або балон зі стисненим повітрям), ємність для водного розчину ПУ, пінозмішувач оригінальної конструкції для змішування водного розчину ПУ з повітрям та генерування піни. Виготовлена система забезпечує зміну тиску в інтервалі від 1 до 10 бар, витрати води – до 3,5 л/с. Максимальний тиск у компресорі 14 – бар, він може регулюватися через редуктор від 1 до 10 бар із похибкою 0,2 бара. Ємність для води – 20 л.

На рис. 2.8 наведено схему (а) та фото (б) розробленого експериментального зразка.



Рис. 2.7 – Нерегулярні насадкові елементи



(а)



(б)

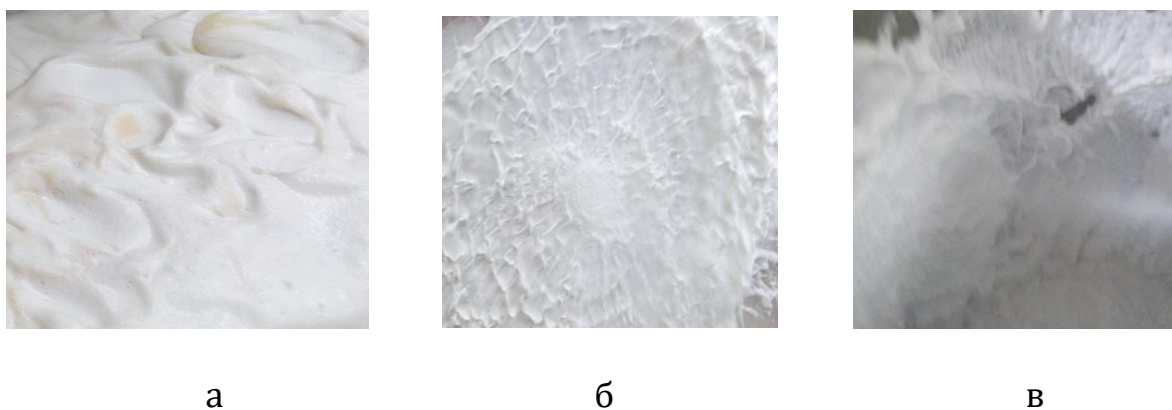
Рис. 2.8 – Схема «а» та фото «б» експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни:

1 – ємність для водного розчину піноутворювача; 2 – балон зі стисненим повітрям, або компресор; 3 – редуктор для регулювання тиску та витрат повітря; 4 – оригінальний пінозмішувач; 5 – крани для регулювання витрат водного розчину піноутворювача та повітря; 6 – трубопроводи для подавання водного розчину піноутворювача та стисненого повітря [11]

В якості основи для системи був використаний вогнегасник ОП-20. Подавання повітря передбачено як від компресора мод. К-22 УХЛ4.2 (робочий тиск – 16 МПа, об'єм ресивера – 220 м<sup>3</sup>), так і від балонів зі стисненим повітрям (робочий тиск – 25 МПа, об'єм – 19 л). Витрати розчину та повітря регулюються окремо за допомогою кранів. Максимальний тиск повітря, що використовувався, – 10 МПа. Витрати води передбачені до 80 л/хв.

Водний розчин піноутворювача готується окремо, а потім заливається до ємності ОП-20. Для подавання рідини в реактор використовується стиснене повітря, яке подається компресором за регульованого тиску в діапазоні від 0 до 0,6 МПа.

Вигляд компресійної піни, отриманої на розробленому зразку за зміни співвідношення «водний розчин піноутворювача–повітря» подано на рис. 2.9.



**Рис. 2.9 – Загальний вигляд отриманої піни за зміни співвідношення «водний розчин піноутворювача–повітря»:**

а) 1 до 5; б) 1 до 12; в) 1 до 20

На рис. 2.10 наведено загальний вигляд компресійної піни, нанесеної на вертикальні поверхні за зміни співвідношення «водний розчин піноутворювача – повітря».



**Рис. 2.10 – Вигляд компресійної піни, нанесеної на вертикальну дерев'яну (а) та пластикову (б) поверхню після 240 с витримки. Співвідношення «водний розчин піноутворювача–повітря» складало від 1 до 12 (а) та 1 до 6 (б)**

За результатами проведених досліджень за допомогою розробленого експериментального зразка системи CAFS підтверджено можливість генерування КП із застосуванням піноутворювачів вітчизняного виробництва на прикладі «БАРС-S».

Одержана КП має ряд особливостей, а саме:

- низький вміст рідкої фази (практично весь водний розчин ПУ перетворюється на піну);
- одержана піна має рівномірну дисперсність і товщину стінок пінних бульбашок, що уповільнює її руйнування;
- одержана піна має високу адгезію до вертикальних поверхонь.

### **2.3 Перевірка теоретичних та практичних результатів математичної моделі процесу генерування та подавання КП**

Перевірка адекватності математичної моделі (2.2), (2.5), (2.35), (2.36), (2.38) здійснювалась експериментально. Експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни проектувався відповідно до вимог, завдяки яким можливе генерування компресійної піни, де її кратність  $K$  знаходиться в діапазоні від 5 до 25.

Перед початком проектування та прийняття технічних рішень щодо розроблення конструкторської документації у програмному забезпеченні було проведено [2] відповідні розрахунки щодо отримання необхідних діаметрів рідинного  $d_w$  та повітряного  $d_a$  сопел, завдяки яким забезпечується генерування піни кратністю відповідно від  $K=5$  до  $K=25$ .

При цьому незмінними параметрами було взято робочий тиск у системі  $p_{\text{comp}}$ , довжину піногенеруючої вставки  $L$ , порозність пористого тіла  $\epsilon$  (2.23) та діаметр вихідного сопла  $d_j$ . Діаметри вхідного водяного та повітряного сопел планувалось змінювати завдяки вентелям, встановленим на металевих трубопроводах ствола, де відбувається проходження потоків повітря та рідини перед їх потраплянням до камери змішування та проходження через пористі тіла. Розрахункові дані, отримані за допомогою розробленої ММ (2.2), (2.5), (2.35), (2.36) у програмному забезпеченні, та експериментальні дані, отримані на розробленому зразку системи для генерування і подавання компресійної піни щодо відповідності кратності одержаної піни, в залежності від зміни діаметрів рідинного  $d_w$  та повітряного  $d_a$  сопел, наведені в табл. 2.2.



Таблиця 2.2 – Результати перевірки адекватності математичної моделі

№ досліду	$d_w$ , мм	$d_{air}$ , мм	Кратність піни, $K$		
			Експериментальна		Розрахункова
			$K$	$\bar{K}$	
1	8	2	5,8	5,3	5
2			5,1		
3			5		
4	4	6	15,1	15,8	15
5			15,9		
6			16,4		
7	2	8	24,7	23,3	25
8			22,5		
9			22,7		

Таким чином, встановлено, що різниця між розрахунковими та експериментальними даними стосовно отриманої кратності піни  $K$  не перевищує 7 %.

## 2.4 Висновки

1. Розроблено математичну модель процесу генерування КП, яка дозволяє розв'язувати такі прикладні та наукові задачі:

- проводити розрахунки параметрів систем генерування і подавання КП залежно від кратності компресійної піни, яку необхідно отримати;

- досліджувати вплив параметрів піногенерувальної вставки на кратність компресійної піни;

- проводити проектування систем генерування і подавання компресійної піни для гасіння пожеж різних класів.

2. Проведено аналіз існуючих способів змішування повітря та розчину піноутворювача у системах для генерування і подавання компресійної піни, а також конструкційні особливості статичних змішувачів, які можуть бути використані для генерування компресійної піни. Розроблено оригінальний пінозмішувач коаксіального типу перемішування, в якому передбачені сопла Лавалю для інтенсифікації процесу піноутворення, а в якості пористого тіла використано нерегулярні насадкові елементи.

3. На основі розрахункових даних, отриманих за допомогою математичної моделі й аналізу існуючих систем генерування та подавання компресійної піни, спроектовано та розроблено експериментальний зразок такої системи, який дозволяє отримувати компресійну піну з діапазоном кратності від 5 до 25.

4. Проведено перевірку адекватності розробленої математичної моделі порівнянням розрахункових та експериментальних даних і встановлено, що розбіжність між отриманими результатами не перевищує 7 %.

5. За допомогою математичної моделі проведено чисельний експеримент та визначено, що на кратність піни впливає пропускна здатність повітряного та водяного сопел. Зокрема встановлено що, за сталого діаметра повітряного сопла  $d_a = 6$  мм та зменшення діаметра водяного сопла від 12 мм до 6 мм (на 50 %), спостерігається суттєва зміна кратності, яка зменшується на 75 %, відповідно з 117 до 21. Також за незмінного діаметра водяного сопла 12 мм і збільшення діаметра повітряного сопла від 4 мм до 6 мм спостерігається збільшення кратності на 47 %, відповідно з 10 до 21.

### РОЗДІЛ 3

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ТА ЇЇ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Компресійна піна – це піна низької кратності, оскільки співвідношення «вода–повітря» знаходиться у межах  $1/5$ – $1/20$ , але, на відміну від звичайної повітряно-механічної піни, має дрібнодисперсну однорідну структуру. Вона має особливості, не характерні для звичайної повітряно-механічної піни, а саме: підвищену стійкість, посилену адгезію та високу вогнегасну здатність при одночасному зменшенні витрат води і піноутворювача [97–99]. Це пов'язують зі зменшенням діаметрів бульбашок компресійної піни, в порівнянні з повітряно-механічною піною, та підвищенням однорідності. Проте на шляху впровадження компресійної піни як ефективного засобу пожежогасіння постає проблема, що полягає в отриманні науково обґрунтованих результатів щодо впливу кратності піни та концентрації водного розчину піноутворювача, з якого її генерують, на властивості та вогнегасну ефективність піни.

Технологія систем для генерування і подавання компресійної піни дозволяє регулювати співвідношення кількості повітря та рідини, тобто кратність отриманої піни. Також у системах CAFS відбувається регулювання концентрації піноутворювача.

Першим етапом дослідження стало [12, 13] визначення впливу кратності та концентрації піноутворювача у компресійній піні на наступні властивості піни: стійкість, дисперсність та однорідність.

Другим етапом дослідження, з урахуванням отриманих на першому етапі експериментальних даних, стало вивчення впливу кратності та концентрації піноутворювача у водному розчині на вогнегасну ефективність. У [14, 15] експериментальним шляхом досліджено, яка кратність та концентрація піноутворювача відповідають найбільшій вогнегасній ефективності для компресійної піни під час гасіння нестандартизованих (лабораторних) модельних осередків пожежі класу А за оцінкою двох показників вогнегасної ефективності.

Третій етап дослідження полягав [17] у порівнянні між собою води, компресійної піни та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандартизованих модельних осередків пожежі класу А, та визначенні найбільш ефективного вогнегасного засобу для твердих горючих речовин.

### 3.1 Експериментальні дослідження впливу кратності компресійної піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни

1. Вивчення впливу кратності піни  $K$  і концентрації водного розчину піноутворювача  $P$  на стійкість  $S$  і діаметр бульбашки  $D$ .

2. Визначення впливу кратності компресійної піни  $K$  на її однорідність  $\Phi$ .

1. Для проведення дослідів використовувався [12] піноутворювач загального призначення «Барс S-1» із забезпеченням концентрації водного розчину від 4 % до 6 %. Під час дослідів підтримувався сталий тиск в установці 0,6 МПа. Для змінювання кратності піни  $K$  змінювалися такі вхідні параметри, як витрата розчину піноутворювача та витрата повітря. Концентрацію піноутворювача  $P$  у водному розчині змінювали шляхом змішування піноутворювача та води у певних пропорціях.

Стійкість компресійної піни  $S$  вимірювали згідно з [92]. Дисперсність піни визначали візуально за допомогою мікроскопа МБС-9 (рис 3.1), з ціною поділки 10 мкм [157]. Далі для визначення реальних розмірів бульбашок компресійної піни проводили калібрування мікроскопа в залежності від кратності збільшення. Для калібрування використовували об'єкт – мікромметр, який являє собою прозоре скло, на якому нанесена шкала 1 мм (1000 мкм), з ціною поділки 0,01 мм.

Для уточнення розміру бульбашки проводили уточнювальні дослідження згідно з рекомендаціями методики визначення розмірів краплин води, викладеної в [158].

Згідно [159] на 1-му етапі проведення досліджень для реалізації мети був спланований ПФЕ типу  $2^k$  з допустимою точністю моделі 5 %, в якому як чинники було обрано кратність компресійної піни  $K$  ( $x_1$ ) і концентрація піноутворювача у водному розчині  $P$  ( $x_2$ ), а як функцію відгуку – діаметр бульбашки  $D$  ( $z$ ) компресійної піни.

На основі аналізу інформації було здійснено вибирання експериментальної області чинникового простору. Згідно [160] в якості нульового рівня чинника був обраний центр інтервалу, в якому проводили дослідження. Так само було вибрано інтервал варіювання, значення верхнього та нижнього рівнів чинників у натуральному і кодованому вираженні. Значення рівнів чинників та інтервали варіювання наведені в табл. 3.1.



Рис. 3.1. Мікроскоп МБС-9

Таблиця 3.1 – Значення рівнів чинників та інтервали варіювання

Найменування чинника	Рівень та значення чинника у досліді			Інтервал варіювання
	+1	0	-1	
Кратність компресійної піни, $K$	20	12,5	5	7,5
Концентрація піноутворювача у водному розчині, $P\%$	6	5	4	1

Під час складання плану-матриці ПФЕ типу  $2^k$  використовувався ортогональний план першого порядку [160], із введенням стовпця  $x_1x_2$ , який дозволяє оцінювати коефіцієнт регресії під час взаємодії факторів. ПФЕ в кодованому вираженні факторів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – План ПФЕ в кодованому виразі

№ досліду	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$Z$
1	+	-	-	+	$Z_1$
2	+	+	-	-	$Z_2$
3	+	-	+	-	$Z_3$
4	+	+	+	+	$Z_4$

Далі на підставі плану ПФЕ було складено робочу матрицю і проведено експеримент із визначення діаметрів бульбашок  $D$  піни різної кратності. Робоча матриця планування і результати експерименту, виконані у двократній повторності, представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Робоча матриця планування та результати дослідження

№ досліду	$K$	$P\%$	Діаметр бульбашки $D$ , мм					
			$x_1$	$x_2$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	Середнє значення, $z$
					$z_1$	$z_2$	$z_3$	$\bar{z}$
1	5	4	0,118	0,124	0,121	0,121		
2	20	4	0,114	0,112	0,107	0,111		
3	5	6	0,11	0,119	0,116	0,115		
4	20	6	0,098	0,105	0,097	0,100		

Після проведення дослідів статистичне оброблення результатів виконували згідно з методикою [160, 161].

Перевірку відтворюваності дослідів проводили за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{s_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^k s_u^2} \leq G_{(0,05;f_b;f_u)}, \quad (3.1)$$

де  $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - y_u^-)^2}{m-1}$  – дисперсія, яка характеризує розсіювання результатів дослідів на  $u$ -му рівні чинників;

$p=1,2,\dots, m$  – кількість паралельних дослідів;

$S_{\text{umax}}^2$  – найбільша з дисперсій в рядках плану;

$G$  – табличне значення критерію Кохрена при 5% - му рівні значення;

$f_n = n$  – кількість незалежних оцінок дисперсії;

$f_u = m-1$  – кількість ступенів свободи кожної оцінки.

Дані для перевірки відтворюваності дослідів наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Дані для перевірки відтворюваності дослідів

№ дослідів	№ паралельно-го дослідів	Відхилення результату дослідів від середнього	Квадрат відхилення результату дослідів від середнього	Дисперсія кожного дослідів в кожній точці плану
		$(z_{up} - \bar{z}_u)$	$(z_{up} - \bar{z}_u)^2$	$S_z^2$
1	1	-0,003	0,000009	0,000009
	2	0,003	0,000009	
	3	0	0	
2	1	0,003	0,000009	0,000013
	2	0,001	0,000001	
	3	-0,004	0,000016	
3	1	-0,005	0,000025	0,000021
	2	0,004	0,000016	
	3	0,001	0,000001	
4	1	-0,002	0,000004	0,000019
	2	0,005	0,000025	
	3	-0,003	0,000009	

Перевірка процесу відтворення за рівнянням (3.1), згідно з критерієм Кохрена:

$$G_z = 0,146 < G_{(0,05;4;2)} = 0,7679. \quad (3.2)$$

Дисперсію відтворення розраховували згідно з формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n}. \quad (3.3)$$

$$S_z^2 = 0,00003575.$$

Як модель об'єкта дослідження на 1-му етапі, згідно [153], було використано поліном 1-го ступеня:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (3.4)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводився за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}, \quad (3.5)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n}, \quad (3.6)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{iu} \bar{y}_u}{n}, \quad (3.7)$$

де  $i$  – номер стовпця в матриці планування;

$x_{iu}$  – елементи  $i$ -го стовпця;

$y_u$  – результат експерименту за відповідних параметрів.

Отримано такі значення:

$$b_{z0} = 0,11175;$$

$$b_{z1} = -0,00625;$$

$$b_{z2} = -0,00425;$$

$$b_{z12} = -0,005.$$

Виконавши розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінили їх значущість за критерієм Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{N}}, \quad (3.8)$$

де  $t_{(0,05;f_y)}$  – 5 % -ва точка розподілу Стьюдента з  $f_y$  ступенями свободи.

Дисперсії коефіцієнтів регресії для стійкості пini  $S$  і діаметра бульбашки  $D$ :

$$\Delta b_z = 0,004.$$

Всі отримані за розрахунком коефіцієнти регресії, крім  $b_{z12} = -0,005$ , є значущими. Рівняння функцій відгуку набуває такого вигляду:

$$D = 0,11175 - 0,00625 \cdot K - 0,00425 \cdot P. \quad (3.9)$$

За рівнянням (3.12) було розраховано значення діаметра бульбашки  $D_{\text{розр}}$ . Порівняння отриманих розрахункових та експериментальних даних наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння розрахункових та експериментальних даних стійкості компресійної піни  $S$  та діаметра бульбашки  $D$

№ дослідю	$D_{\text{експ.}}$ , мм	$D_{\text{рознр.}}$ , мм	Відмінність між результатами, %
	$Z_{\text{експ.}}$	$Z_{\text{рознр.}}$	% z
1	0,121	0,122	1 %
2	0,111	0,109	2 %
3	0,115	0,113	2 %
4	0,100	0,101	1 %

Для перевірки на адекватність отриманих рівнянь було розраховано дисперсію адекватності:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n-k-1}, \quad (3.10)$$

де  $y_u$  – розрахункове значення відгуку в  $u$ -му досліді;  
 $F_{(0,05;f_{\text{ад}};f_y)}$  – критерій Фішера за 5 % -го рівня значущості;  
 $f_{\text{ад}}=n-k-1$  – число ступенів свободи дисперсії адекватності;  
 $f_y$  – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

$$\sum_{u=1}^m (z_u^- - z_u)^2 = 0,000004 .$$

Розрахунок дисперсії адекватності за формулою (3.10):

$$S_{\text{ад}}^2 Z = 0,000004.$$

Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05;f_{\text{ад}};f_y)}; \quad (3.11)$$

$$F_z = 0,111 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7. \quad (3.12)$$

Отримане розрахункове значення критерію Фішера (рівняння (3.12)) менше табличного, отже модель адекватно описує процес, але, згідно [161], оцінка адекватності за критерієм Фішера не завжди є ефективною, виходячи з цього, для достовірності адекватності моделі було використано підхід Закгейма [162].



Адекватність моделі визначається допустимим відхиленням. Якщо у всіх точках плану відхилення розрахункового значення від експериментального не перевищує допустимого, то вважають, що модель адекватно описує процес.

Було задано допустиму точність моделі 5 %. Аналізуючи результати табл. 3.5 для регресійної моделі діаметра бульбашки  $D$ , можна побачити, що відхилення не перевищують заданих значень, тобто модель є адекватною.

Графічне зображення залежності середнього діаметра бульбашки  $D$  в компресійній піні від її кратності  $K$  та концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$  наведено на рис. 3.2.

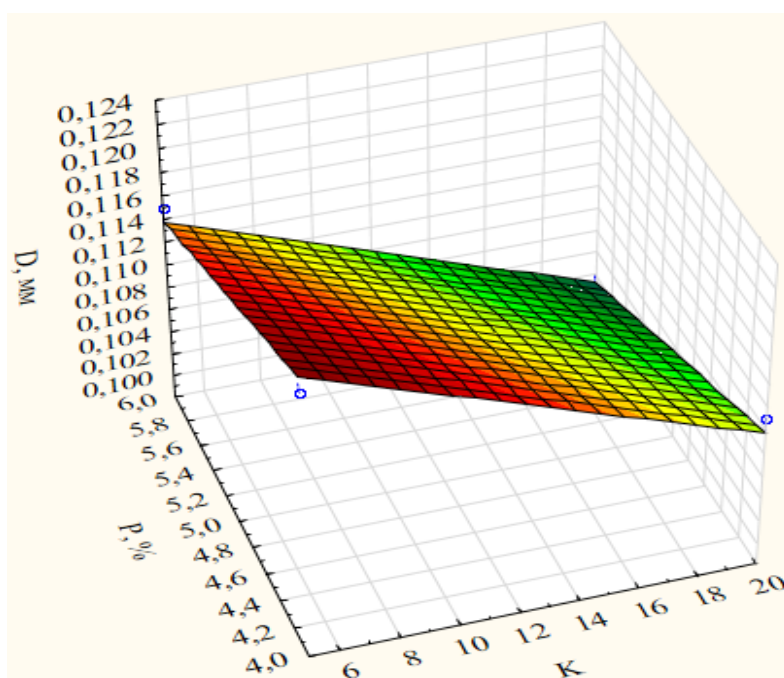


Рис. 3.2 – Залежність діаметра бульбашки  $D$  від кратності компресійної піни  $K$  та концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 3.2, зрозуміло, що підвищення кратності піни  $K$  від 5 до 20 супроводжується зменшенням діаметра бульбашки  $D$  піни на 14 %. Зменшення розміру бульбашки  $D$  в піні має позитивний вплив на її ефективність в цілому: вона буде більш стійкою, тобто, ймовірно матиме більшу вогнегасну ефективність за рахунок бульбашок малого розміру, з яких вона складається. Також позитивний вплив на отримання бульбашок малого розміру справляє збільшення концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$ . Підвищення концентрації піноутворювача  $P$  від 4 % до 6 % супроводжується зменшенням середнього розміру бульбашки  $D$  на 10 %. Отже, використання піноутворювача  $P$  з концентрацією 6 % (згідно з рекомендаціями виробника) та збільшення кратності

сті компресійної піни  $K$  приводить до отримання високодисперсної піни, що теоретично добре впливає на її вогнегасну ефективність.

На рис. 3.3 наведено залежність зміни діаметра бульбашки  $D$  від кратності піни  $K$  з концентрацією піноутворювача у водному розчині 6 %.

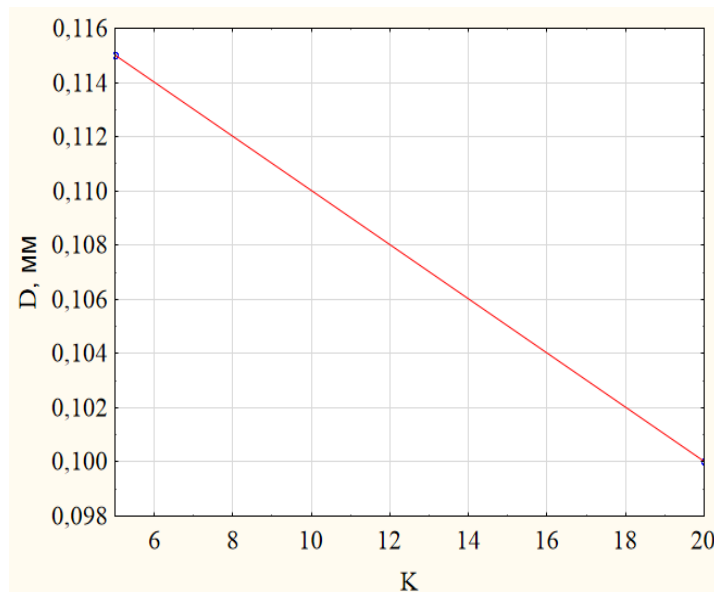


Рис. 3.3 – Залежність діаметра бульбашки  $D$  від кратності компресійної піни  $K$

Аналізуючи графік на рис. 3.3, встановлено, що залежність діаметра бульбашки  $D$  від кратності піни  $K$  має лінійний характер. Підвищення кратності піни  $K$  від 5 до 20 приводить до зменшення діаметра бульбашки  $D$  на 15 %, що добре впливає на вогнегасну ефективність піни.

На рис. 3.4 наведено залежність діаметра бульбашки  $D$  від зміни концентрації піноутворювача  $P$  в разі кратності піни  $K=20$ .

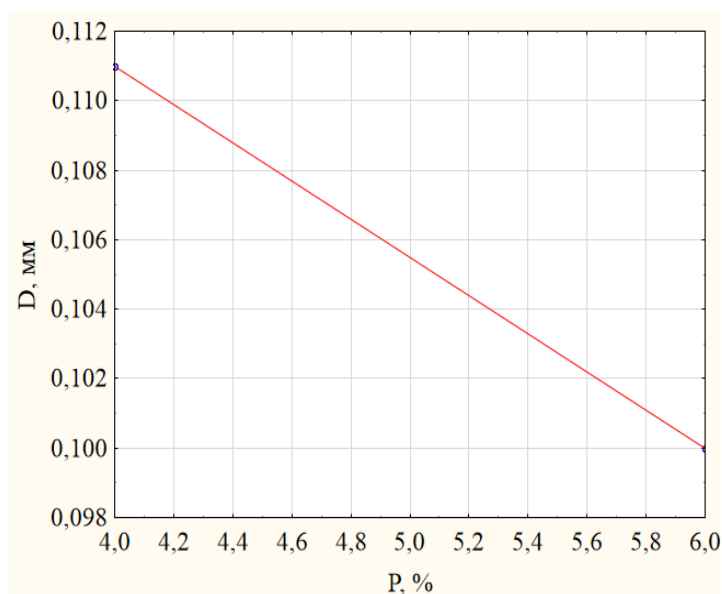


Рис. 3.4 – Залежність діаметра бульбашки  $D$  від концентрації піноутворювача  $P$

Аналізуючи графік на рис. 3.4, встановлено, що підвищення концентрації піноутворювача  $P$  від 4% до 6% супроводжується зменшенням розміру бульбашки на 10%. Це підкреслює, що слід дотримуватись рекомендацій концентрації виробника щодо застосування піноутворювачів загального призначення.

Отримано наступні рівняння регресії з довірчим інтервалом *імовірності* 0,95, які описують залежність зміни діаметра бульбашки  $D$  від концентрації водного розчину піноутворювача  $P$  за умов кратності піни  $K = 20$  (рівняння 3.13) та від зміни кратності компресійної піни  $K$  при концентрації піноутворювача  $P$  6% (рівняння 3.14):

$$D = 0,133 - 0,0055 \cdot P; \quad (3.13)$$

$$D = 0,12 - 0,001 \cdot K. \quad (3.14)$$

Так само за допомогою програмного забезпечення було отримано математичну модель для опису залежності зміни діаметра бульбашки  $D$  від кратності піни  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$ :

$$D = 0,1434 - 0,0008 \cdot K - 0,0042 \cdot P. \quad (3.15)$$

Згідно з методикою [152] також було проведено планування експерименту з визначення впливу кратності  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$  на стійкість піни  $S$ . Було отримано наступне лінійне рівняння:

$$S = 12,58 + 6,915 \cdot K + 1,75 \cdot P. \quad (3.16)$$

Розрахункове значення критерію Фішера для рівняння 3.16 є меншим за табличне, тобто модель адекватно описує процес, але, згідно з [161], оцінку адекватності також було перевірено завдяки використанню підходу Закгейма [162]. Результати перевірки показали, що для отриманого лінійного рівняння спостерігалися відхилення експериментальних значень від розрахункових у двох точках плану, що свідчить про те, що лінійне рівняння (3.16) неадекватно описує процес.

Згідно з [161], якщо математична модель, отримана за допомогою плану першого порядку, є неадекватною, то необхідно переходити до планів другого порядку. До таких планів відносяться ортогональні [163] і рототабельні плани [164].

Для побудови полінома другого порядку нами було використано метод, запропонований Г.Е. Боксом і К.Б. Вільсоном [165], згідно з яким використовували ортогональні плани першого порядку в якості ядра, на якому потім добудовували конструкцію плану другого порядку. Користуючись таблични-

ми даними [160], було побудовано ортогональний план другого порядку для двох факторів, відображений у табл. 3.6. Як ядро було використано ортогональний план першого порядку, наведений в табл. 3.2.

Таблиця 3.6 – Ортогональний план другого порядку для двох чинників

Дослід	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1 x_2$	$y$
Планування типу $2^k$	+1	-1	-1	1/3	1/3	+1	$y_1$
	+1	+1	-1	1/3	1/3	-1	$y_2$
	+1	-1	+1	1/3	1/3	-1	$y_3$
	+1	+1	+1	1/3	1/3	+1	$y_4$
Зоряні Точки	+1	-1	0	1/3	-2/3	0	$y_5$
	+1	+1	0	1/3	-2/3	0	$y_6$
	+1	0	-1	-2/3	1/3	0	$y_7$
	+1	0	+1	-2/3	1/3	0	$y_8$
Нульова точка	+1	0	0	-2/3	-2/3	0	$y_9$

Робоча матриця планування і результати експерименту, виконані у триразовій повторності, наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Робоча матриця планування та результати досліджень

№ дослід	$K$	$P, \%$	$S, \text{хв}$			$\bar{S}, \text{хв}$
	$x_1$	$x_2$	Паралельний дослід 1	Паралельний дослід 2	Паралельний дослід 3	$\bar{y}$
			$y_1$	$y_2$	$y_3$	
1	5	4	4,5	3,5	5,5	4,5
2	20	4	17	18,5	16	17,16
3	5	6	6	7,5	7	6,83
4	20	6	20,5	23	22	21,83
5	5	5	7	5	6	6
6	20	5	19,5	18	20	19,16
7	12,5	4	12	14	13,5	13,16
8	12,5	6	16,5	16,5	15,5	16,16
9	12,5	5	15,5	14,5	15	15

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводили за наступною формулою:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad (3.17)$$

Значення  $\sum_{u=1}^n x_{iu}^2$  для типу ядра  $2^2$ :  $x_0=9$ ,  $x_1=6$ ,  $x_{ij}=4$ ,  $x_i^{2-\varphi} = 2$ :

$$b_0 = 13,311; \quad b_1 = 6,803; \quad b_2 = 1,666;$$

$$b_1^2 = -2,193; \quad b_2^2 = -0,139; \quad b_{12} = 0,585.$$

В результаті проведення експерименту [4] і обробки експериментальних даних було отримано математичну модель для опису залежності стійкості піни  $S$  від її кратності  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$ :

$$S = 13,311 + 6,803 \cdot K + 1,666 \cdot P - 2,193 \cdot K^2 - 0,139 \cdot P^2 + 0,585 \cdot K \cdot P. \quad (3.18)$$

Перевіримо адекватність отриманої моделі (3.18), для цього розрахуємо дисперсію адекватності за формулою:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}}; \quad (3.19)$$

$$s_{ад}^2 = 0,095.$$

Перевірку адекватності здійснювали за критерієм Фішера:

$$F = 0,08 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59 \quad . \quad (3.20)$$

Таким чином, модель є адекватною експериментальним даним за критерієм Фішера (рівняння (3.20)). Результати перевірки адекватності, відповідно до підходу Закгейма, наведено в табл. 3.8. Виходячи з результатів, видно, що в жодній з точок плану відхилення не перевищують заданих значень за допустимою точністю моделі 5 % і рівняння (3.18) адекватно описує процес.

Таблиця 3.8 – Порівняння розрахункових та експериментальних даних стійкості піни  $S$

№ дослідю	$K$	$P, \%$	$S_{експ., хв}$	$S_{розн., хв}$	Похибка, %
	$x_1$	$x_2$	$\bar{y}$	Урозр	
1	5	4	4,5	4,65	4
2	20	4	17,16	17,08	0,2
3	5	6	6,83	6,81	0,2
4	20	6	21,83	21,58	1,1
5	5	5	6	5,86	2,5
6	20	5	19,16	19,47	1,5
7	12,5	4	13,16	13,06	0,7
8	12,5	6	16,16	16,39	1,5
9	12,5	5	15	14,86	1

За допомогою програмного забезпечення було отримано наступну математичну модель для опису залежності стійкості піни  $S$  від її кратності  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$ :

$$S = -8,8743 + 1,4919 \cdot K + 1,825 \cdot P - 0,039 \cdot K^2 + 0,078 \cdot K \cdot P - 0,1133 \cdot P^2. \quad (3.21)$$

Поверхню відгуку залежності стійкості компресійної піни  $S$  від її кратності  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$  наведено на рис. 3.5.

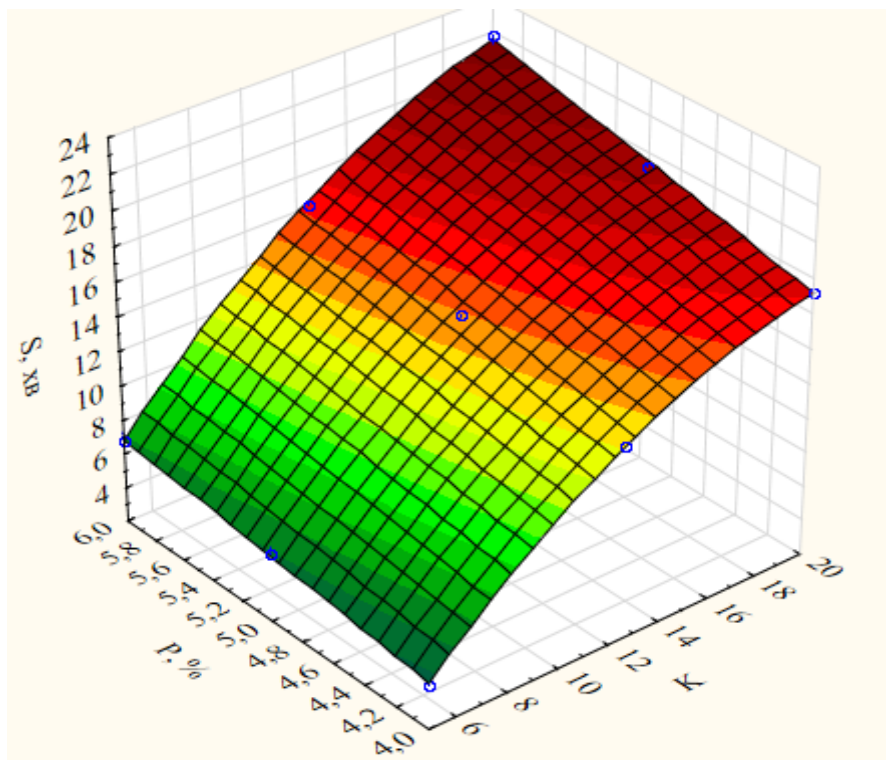


Рис. 3.5 – Залежність стійкості піни  $S$  від її кратності  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 3.5, зрозуміло, що підвищення кратності піни  $K$  та збільшення концентрації піноутворювача  $P$  суттєво підвищують стійкість піни  $S$ . Найменша стійкість піни  $S$  спостерігається за умов кратності піни  $K=5$  та концентрації піноутворювача  $P=4\%$  й дорівнює  $S=4,5$  хв. Подальше збільшення кратності піни  $K$  до 12,5 та підвищення концентрації піноутворювача  $P$  до 5% супроводжується збільшенням стійкості  $S$  на у 2,9 рази та становить 13,2 хв. Під час збільшення кратності  $K$  від 5 на 75% та підвищення концентрації піноутворювача до паспортної рекомендації виробника, яка дорівнює  $P=6\%$ , має місце найбільша стійкість піни  $S$ , яка дорівнює 21,8 хв., що збільшилася від найменшого значення  $S=4,5$  хв., тобто в 4,8 рази. Отже збільшення кратності дозволяє отримати більш стійку піну, яка, ймовірно, має більшу вогнегасну ефективність, за рахунок стійкості бульбашок.

На рис. 3.6 наведено залежність стійкості компресійної  $S$  піни від її кратності  $K$  з концентрацією піноутворювача  $P=6\%$ .

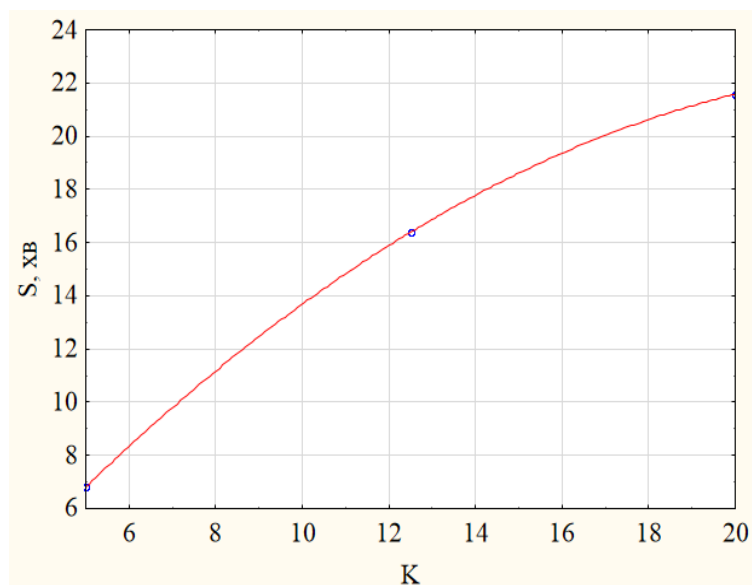


Рис. 3.6 – Залежність стійкості компресійної піни  $S$  від її кратності  $K$  з концентрацією піноутворювача  $6\%$

Проаналізувавши залежність стійкості піни  $S$  від її кратності  $K$  на рис. 3.6, встановлено, що з підвищенням кратності піни  $K$  від 5 до 20, за концентрації водного розчину піноутворювача  $P=6\%$ , відбувається збільшення стійкості піни  $S$  від 6,83 хв., до 21,83 хв., тобто в 3,2 рази.

На рис. 3.7 наведено залежність стійкості піни  $S$  від концентрації піноутворювача  $P$  для кратності піни  $K=20$ .

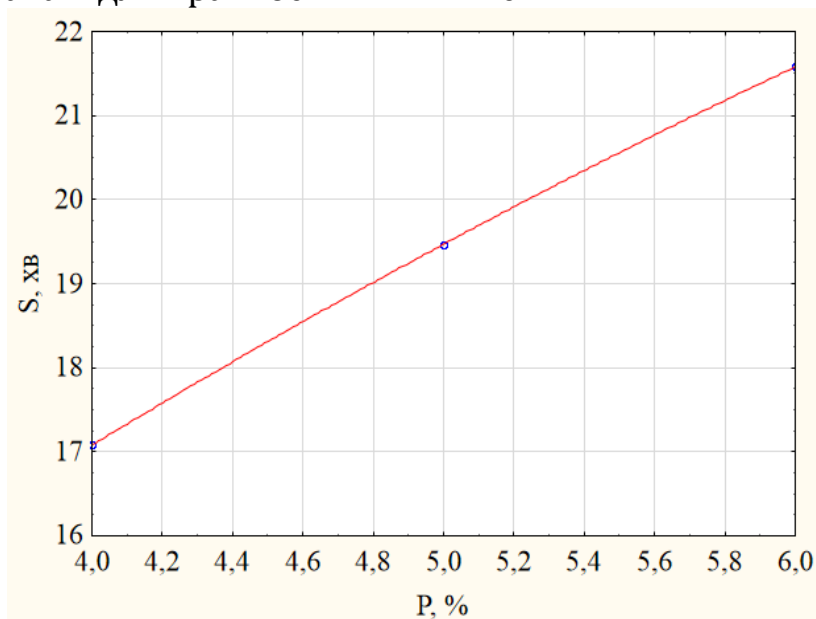


Рис. 3.7 – Залежність стійкості компресійної піни  $S$  від концентрації піноутворювача  $P$  із кратністю піни  $K=20$

Аналізуючи графік на рис. 3.7, зрозуміло, що зі збільшенням концентрації піноутворювача  $P$  підвищується її стійкість  $S$ ; у цьому разі залежність має поліноміальний характер. Найнижча стійкість піни  $S$  спостерігається у піни з концентрацією водного розчину піноутворювача  $P=4\%$  і дорівнює  $S=17,2$  хв. Подальше підвищення концентрації піноутворювача  $P$  до  $6\%$  супроводжується збільшенням стійкості піни  $S$  до  $21,8$  хв, тобто на  $26\%$ .

Отримано наступні рівняння регресії за довірчої ймовірності  $0,95$ , які описують залежність стійкості піни  $S$  від концентрації піноутворювача  $P$  за умов кратності піни  $K=20$  (рівняння 3.22) і від зміни кратності піни  $K$  за концентрації піноутворювача  $P=6\%$  (рівняння 3.23):

$$S = 4,72 + 3,65 \cdot P - 0,14 \cdot P^2 ; \quad (3.22)$$

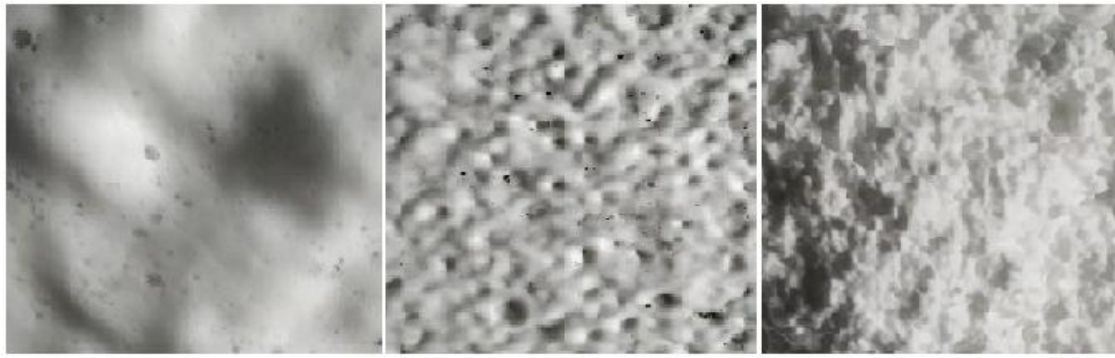
$$S = -2,0333 + 1,9647 \cdot K - 0,0392 \cdot K^2 . \quad (3.23)$$

2. Однорідність піни  $\Phi$ , тобто малий розкид розмірів бульбашок, що її утворюють, є важливою властивістю піни, що забезпечує її високу вогнегасну ефективність. Відповідно до рівняння Юнга–Лапласа [94] величина тиску повітря всередині бульбашки є обернено пропорційною до її діаметра, тому під час контакту бульбашок різного розміру має місце перетікання повітря з малої бульбашки у більшу з утворенням нової збільшеної бульбашки, яка, внаслідок збільшення діаметра, має меншу стійкість. Отже, підвищення стійкості пов'язане з особливістю фізичних процесів самої технології генерування піни і в основному пояснюється двома причинами: зміною розмірів бульбашок та їх однорідністю. Дослідники [166] стверджують, що «піна доброї якості є однорідною, складається з дуже маленьких бульбашок, які, наприклад, мають середній еквівалентний діаметр в інтервалі від  $0,5$  до  $1$  мм».

Методика досліджень впливу кратності піни  $K$  на однорідність  $\Phi$  полягала у наступному [13]. В якості змінного параметра використовували кратність піни  $K$ . Було проведено три серії дослідів для піни різної кратності: серія № 1 – кратність піни  $K=20$ , серія № 2 – кратність піни  $K=12,5$ , серія № 3 – кратність піни  $K=5$ . Після отримання піни її частиною заповнювали чашку Петрі та поміщали під мікроскоп МСБ–9. Використовуючи координатну сітку мікроскопа, проводили підрахунок кількості бульбашок, які перетнули координатну вісь у будь-якому напрямку на відстані  $1$  мм. Фотографії отриманих піни різної кратності подано на рис. 3.8.

На рис. 3.9 наведено реальні фотографії бульбашок компресійної (а) та повітряно-механічної піни (б) кратністю  $K=20$ . З фотографій зрозуміло, що розкид розмірів бульбашок, з яких утворена компресійна піна, нижче, ніж розкид між бульбашками повітряно-механічної піни. Тобто компресійна піна є більш однорідною.



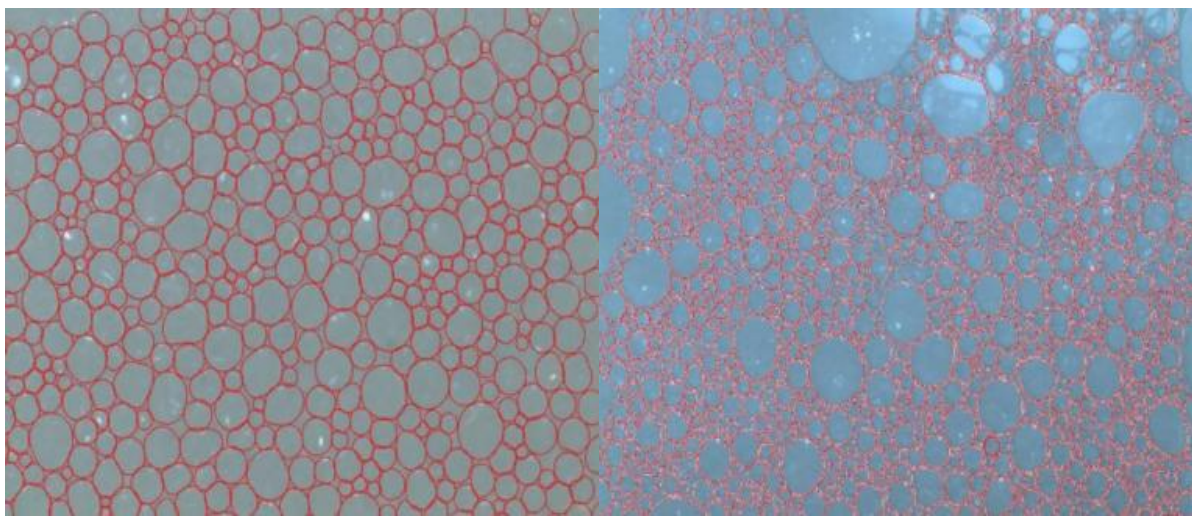


кратність 5

кратність 12,5

кратність 20

Рис. 3.8 – Фотографії піни різної кратності



(а)

(б)

Рис. 3.9 – Фото бульбашок компресійної (а) та повітряно-механічної (б) піни кратністю  $K=20$

Результати вимірювання розмірів бульбашок наведено у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати вимірювання розмірів бульбашок компресійної піни

№	Серія № 1			Серія № 2			Серія № 3		
	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці
	min	max		min	max		min	max	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
1	0,089	0,091	3	0,09	0,094	5	0,045	0,06	1
2	0,091	0,093	1	0,094	0,099	4	0,06	0,075	5
3	0,093	0,095	9	0,099	0,103	12	0,075	0,09	13
4	0,095	0,097	11	0,103	0,108	15	0,09	0,105	24

Продовження табл. 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5	0,097	0,1	23	0,108	0,112	29	0,105	0,12	26	
6	0,1	0,102	20	0,112	0,116	15	0,12	0,135	13	
7	0,102	0,104	21	0,116	0,121	7	0,135	0,15	9	
8	0,104	0,106	7	0,121	0,125	10	0,15	0,165	11	
9	0,106	0,108	10	0,125	0,13	4	0,165	0,18	5	
10	0,108	0,111	2	0,13	0,134	1	0,18	0,196	1	
Всього бульбашок у мм <sup>2</sup> для серії №1			110	Всього бульбашок у мм <sup>2</sup> для серії №2			102	Всього бульбашок у мм <sup>2</sup> для серії №3		108

Результати обробки даних табл. 3.9 щодо розподілу бульбашок за діаметрами у піні різної кратності подано на рис. 3.10.

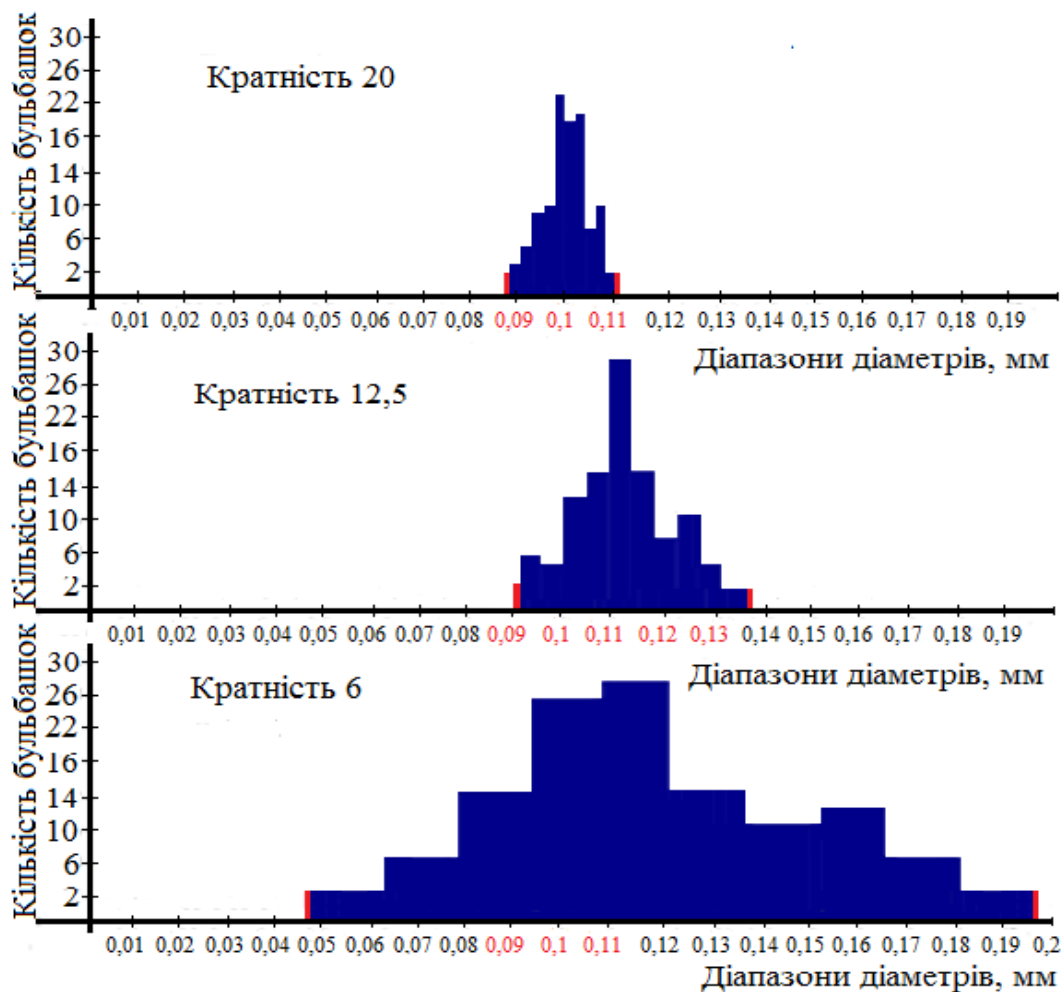


Рис. 3.10 – Гістограми розподілу бульбашок за діаметрами під час генерування компресійної піни різної кратності

Аналізуючи дані табл. 3.9 та гістограми на рис. 3.10, видно, що загалом діапазон діаметрів бульбашок відповідає нормальному закону розподілу. Водночас, найбільша кількість різних розмірів бульбашок спостерігалась за умов кратності піни  $K=5$ , де діапазон діаметрів склав від 0,05 мм до 0,19 мм. Під час

визначення діапазону розмірів бульбашок для піни кратністю  $K=12,5$  діаметри бульбашок знаходилися в межах від 0,09 мм до 0,13 мм, що на 66 % менше, у порівнянні з діапазоном діаметрів для піни кратністю  $K=5$ . Найбільша однорідність бульбашок спостерігалась для піни кратністю  $K=20$ , де діапазон діаметрів перебував у межах від 0,09 мм до 0,11 мм. Під час зіставлення з розбіжністю розмірів бульбашок піни кратністю  $K=5$  зменшення відбулося на 80 %. Виходячи з аналізу даних, зрозуміло, що з підвищенням кратності компресійної піни відбувається зменшення розбіжностей розмірів бульбашок. Це свідчить про те, що зі збільшенням кратності піни її однорідність зростає.

### **3.2 Експериментальні дослідження впливу кратності та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для генерування компресійної піни, на її вогнегасну ефективність під час гасіння нестандартизованих осередків пожеж класу А**

Під час гасіння піною твердих горючих речовин головним механізмом припинення процесу горіння є охолодження. У цьому разі шар піни, нанесений на поверхню матеріалу, екранує зовнішній променистий тепловий потік, який падає від непогашених ділянок, сусідніх поверхонь, що горять тощо. Поступово руйнуючись, піна виділяє розчин піноутворювача, який просочується у горючий матеріал і знижує його температуру. Оскільки розчин піноутворювача має нижчий поверхневий натяг, ніж вода, він має більшу просочувальну здатність [23].

З експериментальних досліджень [12–13] встановлено, що від кратності піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, залежать такі властивості піни: стійкість  $S$ , дисперсність  $D$  і однорідність  $\Phi$ . Отже від вищеперерахованих параметрів залежить і її вогнегасна ефективність. Технологія генерування компресійної піни дозволяє чітко регулювати її кратність та концентрацію піноутворювача. З проведеного аналізу [1] з'ясовано, що кожен із відомих світових виробників систем пожежогасіння компресійною піною пропонує різні співвідношення рідкої та повітряної фаз і концентрацію піноутворювача. На шляху ефективного застосування компресійної піни постає проблема, що полягає у відсутності теоретичного підходу та практичних досліджень, які науково обґрунтовують вплив зміни кратності  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$  на її вогнегасну ефективність. Це зумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення впливу цих параметрів на її вогнегасну ефективність та визначення, за якої кратності та концентрації піноутворювача компресійна піна має найбільшу вогнегасну здатність під час гасіння твердих горючих речовин.

Аналіз дозволив встановити, що для визначення вогнегасної ефективності речовин використовують наступні показники:

1) показник вогнегасної здатності  $P_{в.з.}$  [167, 168]. Під час гасіння твердих горючих речовин цей показник визначається масою вогнегасної

речовини  $m$ , що припадає на одиницю площі модельного осередку пожежі  $S$ , достатньої для впевненого гасіння в ньому в умовах стандартного експерименту. Підвищенню ефективності пожежогасіння відповідає зменшення чисельного значення показника вогнегасної здатності.

2) Показник ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  [20, 23].

Показник ефективності гасіння розраховується за формулою:

$$\Pi_{e.g} = \frac{S_{\Pi}}{G_{в.р}\tau}, \quad (3.24)$$

де  $S_{\Pi}$  – площа пожежі;  $G_{в.р}$  – сумарна кількість вогнегасної речовини, використаної за час  $\tau$ .

Кількість вогнегасної речовини визначається через інтенсивність подавання та проміжок часу за формулою:

$$G_{в.р} = IS_{\Pi}\tau. \quad (3.25)$$

Підставивши вираз (3.25) у формулу (3.24), отримуємо більш зручний для аналізу і розрахунків вираз:

$$\Pi_{e.g} = \frac{1}{I\tau^2}. \quad (3.26)$$

Виходячи з [20], одним із параметрів, що характеризують процес гасіння піною, є інтенсивність її подавання  $I_{\Pi}$  – об'єм водного розчину піноутворювача або піни, який подається на одиницю площі пожежі в секунду.

$$I_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{S_{\Pi}\tau}, \quad (3.27)$$

де  $V_{\Pi}$  – об'єм піни;  $S_{\Pi}$  – площа пожежі;  $\tau$  – тривалість гасіння.

Використовуючи формулу (3.27) і підставивши її у формулу (3.26), отримуємо вираз для проведення розрахунків показника ефективності гасіння:

$$\Pi_{e.g} = \frac{S_{\Pi}}{V_{\Pi}\tau}. \quad (3.28)$$

У зв'язку з тим, що така величина як об'єм піни  $V_{\Pi}$  не є стійкою і змінюється з часом, вирішено перетворити [14] формулу (3.28), для розрахунків, використовуючи такий параметр як кратність піни  $K$ . Зазначений параметр дослідник може задавати самостійно, в залежності від типу піни, яку необхідно отримати. Кратність піни визначається за формулою (1.1).

Використовуючи формулу (1.1), перетворивши її й підставивши у формулу (3.28), отримуємо остаточний вираз для проведення експериментальних розрахунків показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  :

$$P_{e.g} = \frac{S_{п}}{K_{п} V_{р} \tau}, \quad (3.29)$$

де  $S_{п}$  – площа пожежі;  $K_{п}$  – кратність піни;  $V_{р}$  – об'єм рідини, з якого отримана піна;  $\tau$  – час, використаний на гасіння осередку.

**Гасіння нестандартизованого (лабораторного) модельного осередку пожежі класу А.** Як лабораторний осередок пожежі класу А був обраний [14] штабель з 32 брусків розміром (20× 20× 150) мм, покладених у 8 шарів по 4 бруски в кожному. Відстань між брусками в ряду – 20 мм. Загальна площа брусків становить 0,41 м<sup>2</sup>. Відкрита поверхня горіння осередку (після віднімання площ перекриття брусків) становить 0,32 м<sup>2</sup>. Цей лабораторний осередок пожежі класу А широко використовується у процесі лабораторних визначень показника вогнегасної здатності різних вогнегасних засобів [169–171]. Як горючий матеріал було обрано деревину. На рис. 3.11 наведено фото лабораторного осередку та процес його розпалювання.



а)

б)

**Рис. 3.11 – Лабораторний модельний осередок пожежі:**

а) загальний вигляд лабораторного модельного осередку; б) горіння лабораторного модельного осередку

Процедура розпалювання лабораторного модельного осередку пожежі полягала у наступному. На металеву підставку встановили та закріпили лабораторний модельний осередок пожежі. Після чого під підставку встановили деку діаметром 12 см, в яке на шар води наливали 30 мл бензину А-92. Бензин підпалювали. Після його повного вигорання (~ 3 хвилини) ємність із бензином прибирали з-під осередку. Тривалість вільного горіння штабеля було обрано так, щоб зниження маси штабеля за рахунок горіння становив нормативне значення – 45 % [172]. Загальний проміжок часу вільного горіння модельного осередку становило ~ 7 хв. На рис 3.12 наведено фото лабораторного модельного осередку після 5 хвилин вільного горіння.

Згідно [160] для реалізації мети був спланований ПФЕ типу  $2^k$  з допустимою точністю моделі 5 відсотків, як чинники були обрано кратність компресійної піни  $K(x_1)$  і концентрація піноутворювача  $P(x_2)$  у водному розчині.

Метою експерименту було вивчення впливу кратності піни  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині на вогнегасну ефективність компресійної піни, яка оцінювалася за двома показниками:

- показником вогнегасної здатності  $P_{в.з}$ ;
- показником ефективності гасіння  $P_{е.г}$ .



Рис. 3.12 – Вигляд лабораторного осередку після 7 хвилин вільного горіння

Як функцію відгуку для розрахунку показника вогнегасної здатності  $P_{в,з}$ , було взято масу водного розчину піноутворювача  $m_p$ , витрачену на гасіння осередку.

Як відгуки функцій для показника ефективності гасіння було взято:

- об'єм водного розчину піноутворювача  $V_p$ , витраченого на гасіння;
- тривалість гасіння  $\tau$  компресійною піною.

Оскільки густина води та водного розчину піноутворювача у піни відрізняються несуттєво, а масою повітря в піні можна знехтувати, у плані прийнято рішення використовувати як функцію відгуку  $m_p$  також і для показника ефективності гасіння.

Для проведення дослідів використовували експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни [11]. Масу розчину піноутворювача визначали шляхом зважування ємності, заповненої до початку гасіння осередку і після повного припинення горіння. Проміжок часу фіксували за допомогою секундоміра. Кратність піни регулювали за допомогою вентиля подавання повітря на стволі.

Проведений аналіз [1–2] дозволив встановити, що компресійна піна є піною низької кратності. У роботах [12, 13] встановлено, що з підвищенням кратності піни  $K$  відбувається збільшення її однорідності  $\Phi$  і стійкості  $S$ . Найменша стійкість та однорідність піни спостерігались для піни кратністю  $K=10$ , тому, з урахуванням отриманих у розділі 3.1 результатів, перед проведенням експерименту положення вентиля ствола регулювали для отримання робочої кратності піни  $K = (15; 20; 25)$ .

Був використаний піноутворювач загального призначення «БАРС – S». Робочий діапазон концентрації піноутворювача  $P$  у воді становив від 4 % до 6 %. Змішування піноутворювача і води в певній пропорції відбувалося у робочому балоні системи для генерування і подавання компресійної піни заздалегідь перед гасінням. Далі за допомогою відрегульованого ствола здійснювали гасіння осередку пожежі. Струмінь компресійної піни спочатку спрямовували на фронтальну поверхню лабораторного осередку. Далі, згідно порядку проведення випробувань [172], продовжували гасіння, спрямовуючи струмінь на верхню, нижню й бічну поверхні (за винятком тильної поверхні).

На рис. 3.13 представлено фото процесу гасіння лабораторного осередку пожежі.

На рис. 3.14 подано фото лабораторного модельного осередку пожежі після гасіння компресійною піною.

Згідно [172] вичікували 10 хвилин після ліквідації полум'я у лабораторному модельному осередку пожежі, і вважали його погашеним, якщо протягом цього часу видиме полум'я у ньому було відсутнє. Поява короточасних спалахів протягом зазначеного часу після закінчення гасіння не брала до уваги.



**Рис. 3.13 – Процес гасіння модельного осередку пожежі компресійною піною**



**Рис 3.14 – Лабораторний модельний осередок пожежі, погашений компресійною піною кратністю 20**

На основі аналізу апріорної інформації був зроблений вибір експериментальної області чинникового простору. Згідно [160] як нульовий рівень чинників був обраний центр інтервалу, в якому планувалося проводити дослідження. Так само було обрано інтервали варіювання, значення верхнього і нижнього рівнів чинників у натуральному і кодованому вираженні. Значення рівнів чинників та інтервали варіювання наведено в табл. 3.10.



## Значення рівнів чинників та інтервали варіювання

Найменування чинника	Рівень та значення чинника у досліді			Інтервал варіювання
	+1	0	1	
$K$ Кратність компресійної піни	25	2	1	5
Концентрація піноутворювача у розчині $P$ , %	6	5	4	1

У випадку складання плану-матриці ПФЕ типу  $2^k$  використовувався ортогональний план першого порядку [160]. До плану було введено стовпець  $x_1x_2$ , який дозволяв оцінити коефіцієнт регресії під час взаємодії чинників  $K$  та  $P$ .

Після проведення дослідів було виконано статистичну обробку результатів згідно з методикою [160]. Відтворюваність процесу перевіряли за критерієм Кохрена за формулою (3.1). Дисперсію відтворюваності (помилку досліду) визначали за формулою (3.3). Під час реалізації експерименту було виконано три визначення величин  $u$  та  $z$ . Тому значення оцінок дисперсії в кожній точці плану розраховували за формулою (3.1).

Це дозволило отримати наступні моделі:

$$m_p = 0,795 - 0,105 \cdot K - 0,0675 \cdot P, \quad (3.30)$$

$$\tau = 11,7775 - 2,875 \cdot K. \quad (3.31)$$

Перевірка адекватності лінійних моделей виконувалась за отриманим рівнянням регресії (3.30) та (3.31) за допомогою критерію Фішера, за нерівністю (3.11). За критерієм Фішера лінійна модель є адекватною.

Але під час оцінки значущості коефіцієнтів рівнянь за критерієм Стюдента у моделі, яка описує вплив чинників  $K$  та  $P$  на тривалість гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, коефіцієнт чинника  $P$  та коефіцієнт взаємодії чинників  $K$  та  $P$  вважаються незначущими. Також у лінійному рівнянні, яке описує вплив чинників  $K$  та  $P$  на масу водного розчину піноутворювача, необхідного для гасіння лабораторного осередку, коефіцієнт взаємодії чинників  $K$  та  $P$  так само вважається незначущим. Згідно [160] незначущий коефіцієнт при чиннику означає, що зазначений чинник не впливає (або впливає у незначній мірі). Однак на величину коефіцієнта регресії впливає не тільки роль зазначеного чинника, але також обраний інтервал варіювання. З цього статистичний сигнал про незначущість чинника повинен бути перевірений або хоча б обговорений з технологічної точки зору. Відомо з експериментальних досліджень і апріорної інформації [130], що концентрація піноутворювача та її збільшення в

розчині в певному робочому діапазоні справляє позитивний ефект на властивості компресійної піни, такі як її стійкість і дисперсність. Також у дослідженні [130] експериментально підтверджено, що від концентрації піноутворювача у водному розчині залежить кратність компресійної піни. Згідно ідеї крокового пошуку було прийнято рішення [14] продовжити експеримент, з метою подання функції відгуку у вигляді квадратичного рівняння, з урахуванням усіх коефіцієнтів чинників як значущих. Виходячи з цього, дотримуючись ідеї крокової процедури, необхідно побудувати план другого порядку. В нашому випадку був використаний ортогональний план другого порядку. Раніше отримані результати дослідів було використано як ядра планування. Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі наведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі

Дослід	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1 x_2$	$y$	$z$
Планування типу $2^k$	+1	-1	-1	1/3	1/3	+1	$y_1$	$z_1$
	+1	+1	-1	1/3	1/3	-1	$y_2$	$z_2$
	+1	-1	+1	1/3	1/3	-1	$y_3$	$z_3$
	+1	+1	+1	1/3	1/3	+1	$y_4$	$z_4$
Зоряні точки	+1	-1	0	1/3	-2/3	0	$y_5$	$z_5$
	+1	+1	0	1/3	-2/3	0	$y_6$	$z_6$
	+1	0	-1	-2/3	1/3	0	$y_7$	$z_7$
	+1	0	+1	-2/3	1/3	0	$y_8$	$z_8$
Нульова точка	+1	0	0	-2/3	-2/3	0	$y_9$	$z_9$

Далі було продовжено експеримент із виміру маси розчину піноутворювача компресійної піни  $m_p$  і тривалості гасіння  $\tau$  компресійною піною для побудови полінома другого порядку. Робочу матрицю планування та отримані результати експерименту наведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Робоча матриця планування та отримані результати експерименту

$N^o$	$K$	$P, \%$	Маса розчину $m_p$ , кг				Тривалість гасіння $\tau$ , с			
			1	2	3	$\bar{m}$	1	2	3	$\bar{\tau}$
1	15	4	1,03	0,96	0,98	0,99	15,2	14,7	15,1	15
2	25	4	0,73	0,68	0,75	0,72	8,8	9,35	9,2	9,15
3	15	6	0,8	0,76	0,825	0,795	14,9	13,9	14,1	14,3
4	25	6	0,625	0,675	0,635	0,645	8,3	8,8	8,8	8,66
5	15	5	0,83	0,885	0,895	0,87	15,2	13,4	14,9	14,5
6	25	5	0,745	0,65	0,69	0,695	8,7	9,45	9	9,05
7	20	4	0,935	0,87	0,88	0,895	9,87	10,9	9,83	10,2
8	20	6	0,805	0,74	0,75	0,765	8,8	10,1	8,94	9,28
9	20	5	0,865	0,81	0,83	0,835	10,4	8,18	10,7	9,76

Розрахунок коефіцієнтів регресії за результатами експерименту проводили за формулою (3.27). Результати розрахунків коефіцієнтів регресії наведено в табл. 3.13.

Таблиця 3.13 – Отримані коефіцієнти регресії для моделей

Залежність маси водного розчину піноутворювача, необхідної для гасіння лабораторного осередку, від кратності піни і концентрації ПУ	Залежність проміжку часу, необхідного для гасіння лабораторного осередку, від кратності КП і концентрації ПУ
$b_0 = 0,801$	$b_0 = 11,1$
$b_1 = -0,09916$	$b_1 = -2,82$
$b_2 = -0,0666$	$b_2 = -0,3516$
$b_1^2 = -0,045$	$b_1^2 = 2,028$
$b_2^2 = 0,001$	$b_2^2 = -0,005$
$b_{1,2} = 0,03$	$b_{1,2} = 0,0525$

Отримано наступні рівняння регресії:

1) Поліном другого ступеня, який описує залежність маси водного розчину піноутворювача  $m_p$ , необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі від її кратності  $K$  і концентрації піноутворювача  $P$ :

$$m_p = 0,801 - 0,09916 \cdot K - 0,0666 \cdot P - 0,045 \cdot K^2 + 0,001 \cdot P^2 + 0,03 \cdot K \cdot P. \quad (3.32)$$

2) Квадратичне рівняння залежності проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі компресійною піною, від її кратності  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$ :

$$\tau = 11,1 - 2,82 \cdot K - 0,3516 \cdot P + 2,028 \cdot K^2 - 0,005 \cdot P^2 + 0,0525 \cdot K \cdot P. \quad (3.33)$$

Перевірка адекватності квадратичної моделі за рівняннями (3.32) та (3.33) наведена в табл. 3.14.

Таблиця 3.14 – Перевірка адекватності квадратичної моделі

Номер досліджу №	$\bar{m}$	$m_{роз.}$	$\bar{\tau}$	$\tau_{роз.}$	$(\bar{m} - m_{роз.})^2$	$(\bar{\tau} - \tau_{роз.})^2$
1	0,99	0,982	15	14,99	0,000064	0,001
2	0,72	0,723	9,15	9,2	0,000009	0,0025
3	0,795	0,788	14,3	14,19	0,000049	0,0121
4	0,645	0,650	8,66	8,65	0,000025	0,001
5	0,87	0,884	14,5	14,4	0,000196	0,01
6	0,695	0,686	9,05	9,15	0,000081	0,01
7	0,895	0,897	10,2	10,15	0,000004	0,0025
8	0,765	0,764	9,28	9,31	0,000001	0,0009
9	0,835	0,830	9,76	9,86	0,000025	0,01

Дисперсії адекватності розраховували за формулою (3.19):

для рівняння (3.32):  $s_{ад}^2 y = 0,00037$  ;

для рівняння (3.33):  $s_{ад}^2 z = 0,016$ .

Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,01 < F_{(0,05;3;4)} = 6,59, \quad (3.34)$$

$$F_z = 0,256 < F_{(0,05;3;4)} = 6,59. \quad (3.35)$$

Розрахункове значення критерію Фішера менше, ніж табличне, як можна бачити з рівнянь (3.34) та (3.35), тому отримані квадратичні моделі адекватно описують процес. За результатами досліджень на основі отриманих даних побудовано графіки залежностей маси водного розчину піноутворювача  $m_p$  і тривалості гасіння  $\tau$  лабораторного осередку від впливу кратності піни  $K$  та концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$  для діапазону параметрів наведених у табл. 3.10.

На рис. 3.15 наведено поверхні відгуку залежності маси розчину піноутворювача  $m_p$  компресійної піни, необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності піни  $K$  та концентрації ПУ у розчині  $P$ .

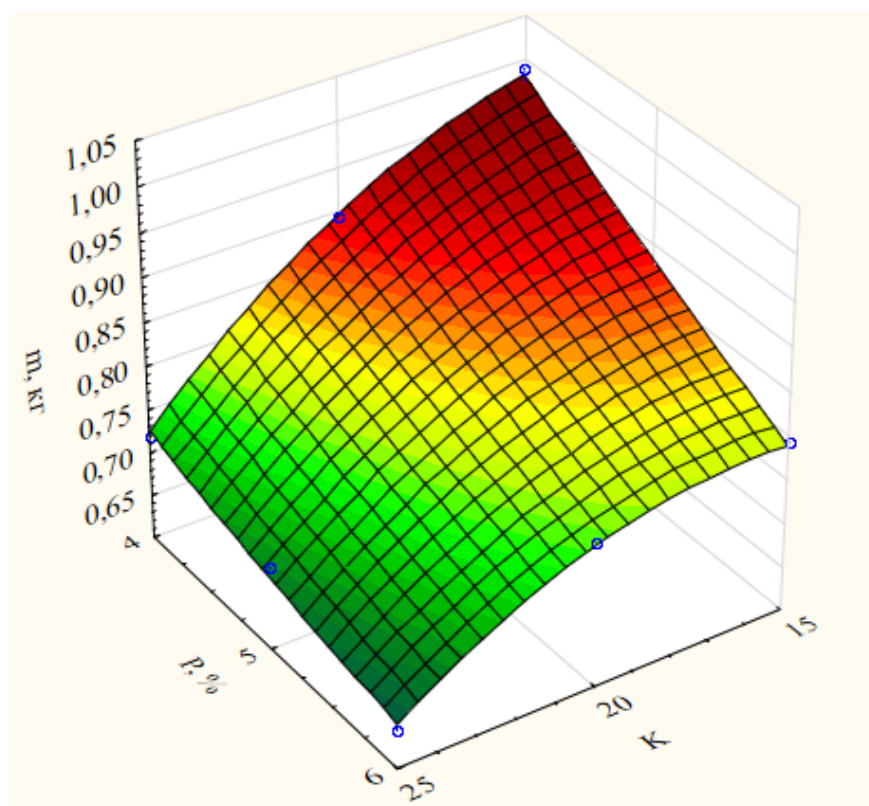
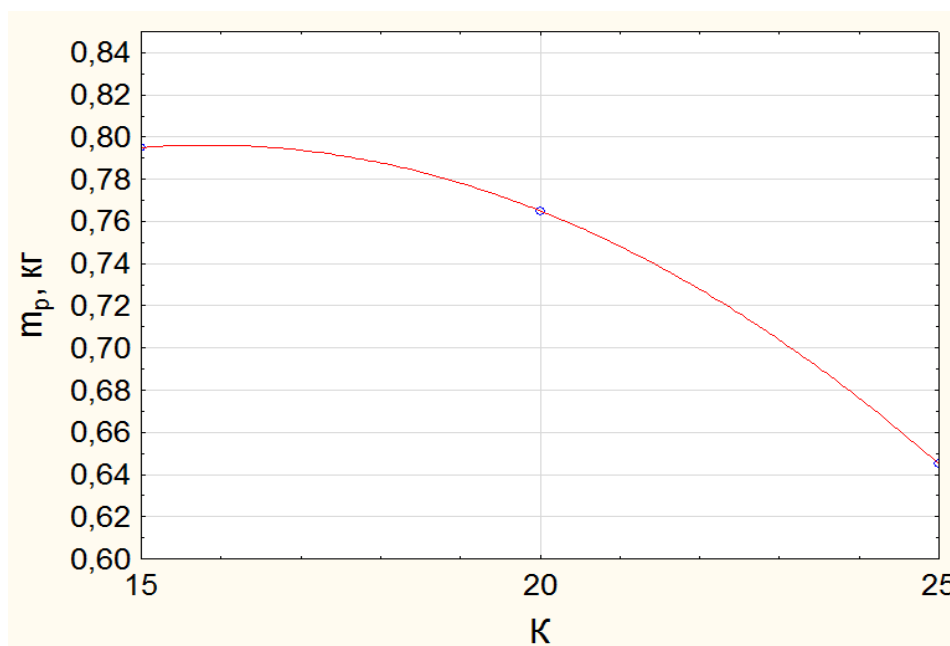


Рис. 3.15 – Залежність маси розчину піноутворювача  $m_p$  компресійної піни, необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності піни  $K$  та концентрації ПУ в розчині  $P$

Отримана поверхня відгуку залежності маси розчину піноутворювача  $m_p$  від зміни кратності піни  $K$  та концентрації піноутворювача у розчині  $P$  зображує, що мінімальна маса водного розчину піноутворювача спостерігається при верхніх рівнях чинників. За мінімальних значень кратності піни 15 і концентрації піноутворювача 4 % маса водного розчину піноутворювача, якою було погашено лабораторний осередок, склала 0,99 кг. За підвищення значення чинників до верхнього рівня (табл. 3.10) спостерігалось зниження маси на 35 % від значення, отриманого на нижньому рівні факторів, і склала 0,645 кг. За допомогою програмного забезпечення отримано наступне квадратичне рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_p = 1,4689 + 0,0235 \cdot K - 0,2033 \cdot P - 0,0018 \cdot K^2 + 0,006 \cdot K \cdot P + 0,0017 \cdot P^2 . \quad (3.36)$$

На рис. 3.16 зображено графік залежності маси водного розчину піноутворювача  $m_p$ , необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією піноутворювача  $P=6\%$ .



**Рис. 3.16 – Залежність маси водного розчину піноутворювача  $m_p$ , необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією піноутворювача  $P=6\%$**

Як видно з графіка на рис. 3.16, за підвищення кратності компресійної піни  $K$  маса водного розчину піноутворювача  $m_p$ , необхідна для гасіння осередку, зменшується. Це свідчить про те, що в робочому діапазоні кратності компресійної піни від 15 до 25 збільшення кратності дозволяє знизити масу розчину піноутворювача, необхідну для гасіння лабораторного

модельного осередку пожежі. Це справляє позитивний ефект з економічної точки зору на раціональну витрату вогнегасної речовини. У програмному забезпеченні отримано рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_p = 0,345 + 0,057 \cdot K - 0,0018 \cdot K^2. \quad (3.37)$$

На рис. 3.17 зображено графік залежності маси водного розчину піноутворювача  $m_p$ , кратністю  $K=25$ , необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від концентрації ПУ у розчині  $P$ .

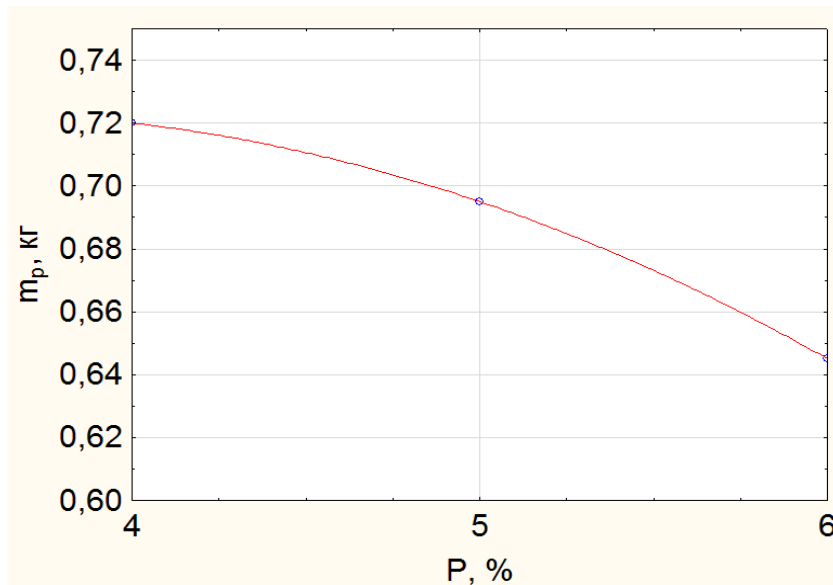


Рис. 3.17. Залежність маси водного розчину піноутворювача  $m_p$ , кратністю піни 25, необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від концентрації ПУ в розчині  $P$

Аналізуючи графік на рис. 3.17, зрозуміло, що зміна концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині має незначний вплив на зміну маси розчину піноутворювача  $m_p$ , необхідної для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі. Збільшення концентрації піноутворювача  $P$  від 4 % до 5 % призводить до зниження маси розчину піноутворювача  $m_p$  на 5 %, а при 6 %-й концентрації піноутворювача  $P$  маса знижується на 10 %. Це означає, що для генерування компресійної піни оптимальною є та сама концентрація піноутворювача у водному розчині, яку виробник рекомендує для генерування повітряно-механічної піни з використанням ежекційних генераторів піни низької та середньої кратності (у цьому випадку це 6 %). Отримано рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_p = 0,57 + 0,0875 \cdot P - 0,0125 \cdot P^2. \quad (3.38)$$

На рис. 3.18 наведено поверхню відгуку, яка відображає залежність проміжку  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності піни  $K$  та концентрації ПУ у водному розчині  $P$ .

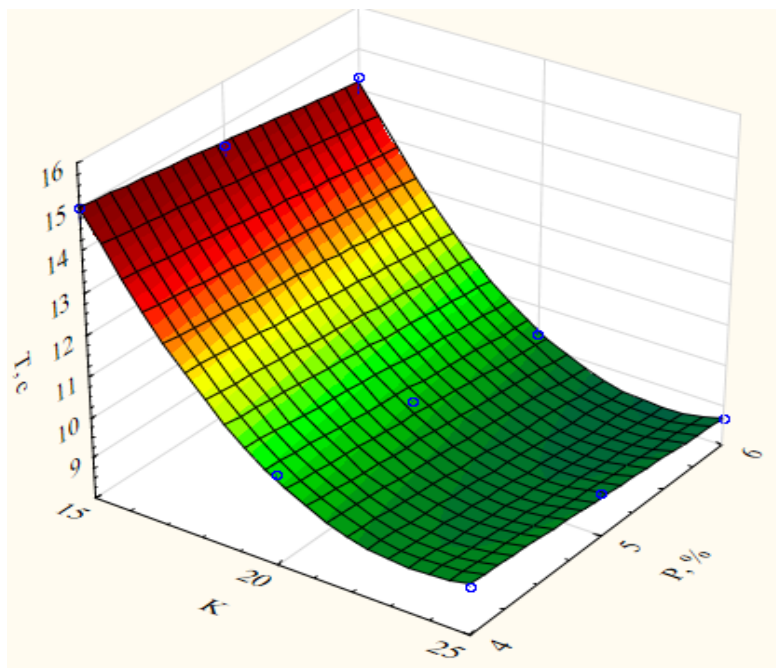


Рис. 3.18 – Залежність часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності піни  $K$  та концентрації ПУ у водному розчині  $P$

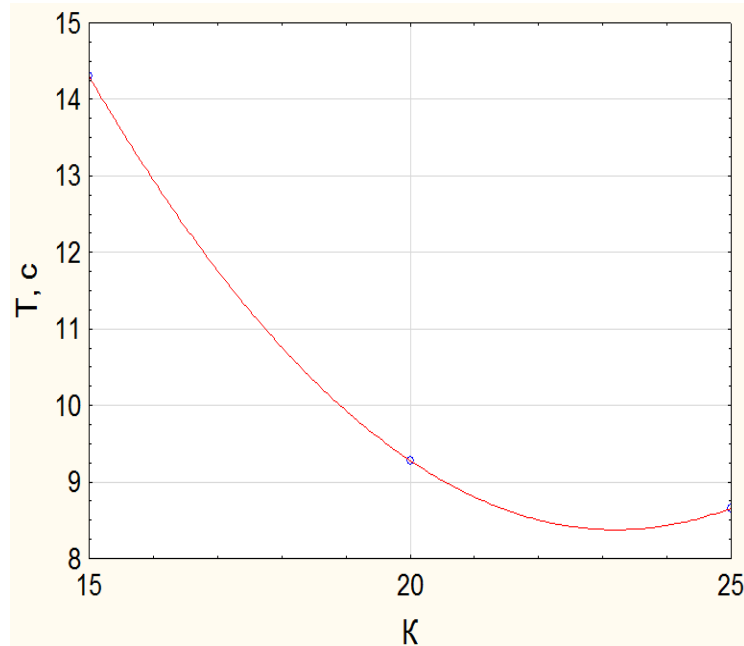
Виконавши аналіз поверхні відгуку зміни тривалості гасіння лабораторного модельного осередку  $\tau$  від кратності піни  $K$  і концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$  (рис. 3.18), відзначимо, що тривалість гасіння зменшується за збільшення кратності піни  $K$  і збільшення концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$ . При цьому збільшення кратності  $K$  від 15 до 20 суттєво впливає на тривалість гасіння і знижує його на 20 %. Мінімальна тривалість гасіння для верхніх рівнів факторів (табл. 3.10) становить 8,6 секунди. Під час аналізу зміни концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині встановлено, що змінювання концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 %, незначною мірою впливає на тривалість гасіння модельного осередку і знижує її загалом на 10 %. Залежність описана поліноміальною моделлю:

$$\tau = 56,2067 - 3,8652 \cdot K - 0,5117 \cdot P + 0,0812 \cdot K^2 + 0,0105 \cdot K \cdot P - 0,005 \cdot P^2. \quad (3.39)$$

На рис. 3.19 зображено графік проміжок часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією ПУ  $P=6$  %.

Проаналізувавши графік залежності тривалості гасіння лабораторного модельного осередку пожежі  $\tau$ , який зображено на рис. 3.19, від впливу кратності піни  $K$  при 6 %-й концентрації піноутворювача  $P$  у во-

дному розчині, встановлено, що найбільша тривалість гасіння, а саме 14,3 секунди, спостерігається за умов робочої кратності піни  $K=15$ . Підвищення кратності піни від 15 до 20 суттєво впливає на тривалість гасіння, яка складає 9,23 с, що на 20 % менше від тривалості гасіння піною кратністю 15. Суттєві зміни за підвищення кратності від 20 до 25 не спостерігались та становлять лише 2 %. Регресійна модель, яка описує цю залежність:



**Рис. 3.19 – Залежність проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від кратності  $K$  компресійної піни за концентрації РПУ у водному розчині 6 %**

$$\tau = 55,76 - 4,084 \cdot K + 0,088 \cdot K^2. \quad (3.40)$$

На рис. 3.20 наведено графік залежності проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині, при кратності піни  $K=25$ .

Залежність тривалості гасіння  $\tau$  від концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині наведено на рис. 3.20. Із графіка зрозуміло, що суттєвого впливу зміна концентрації піноутворювача  $P$  на тривалість гасіння  $\tau$  не справляє. Але найбільша вогнегасна ефективність, яка визначалась проміжком часу, спостерігається під час робочої концентрації піноутворювача 6 %. Це, у свою чергу, підкреслює, що цей піноутворювач слід використовувати згідно з паспортними рекомендаціями у співвідношенні 6/94. Поліноміальна модель залежності тривалості гасіння  $\tau$  від концентрації піноутворювача  $P$  описується такою формулою:

$$\tau = 6,65 + 1,205 \cdot P - 0,145 \cdot P^2. \quad (3.41)$$



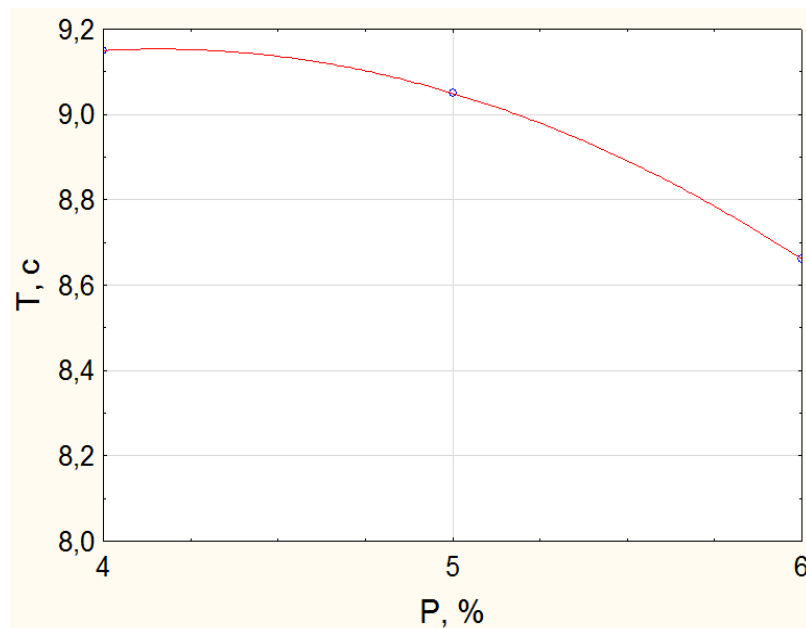


Рис. 3.20 – Залежність проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі, від концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині, за умов кратності піни  $K=25$

Результати проведених досліджень, щодо визначення впливу складу компресійної піни на її вогнегасну ефективність свідчать, що підвищення кратності  $K$  супроводжується суттєвим зменшенням витрати маси розчину піноутворювача  $m_p$  та проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння лабораторного модельного осередку пожежі.

### 3.3 Визначення показників ефективності гасіння та вогнегасної здатності

Згідно плану проведення дослідів наступним кроком було розраховано показник ефективності гасіння  $P_{e.g}$  за формулою (3.32). Для вираження чисельного результату показника вогнегасної здатності  $P_{v.z}$  було взято відношення маси вогнегасної речовини, використаної для гасіння, до площі модельного осередку ( $m_p/S_n$ ), використаної на гасіння [167–168]. Результати розрахунків показника ефективності гасіння та показника вогнегасної здатності наведено в табл. 3.15.

На рис. 3.21 наведено поверхню відгуку, яка відображає залежність зміни показника ефективності гасіння  $P_{e.g}$  від кратності компресійної піни  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині.

Аналізуючи поверхню відгуку залежності зміни показника ефективності гасіння  $P_{e.g}$  від кратності піни  $K$  і концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$  на рис. 3.20, можна дійти висновку, що на верхніх рівнях значення чинників (табл. 3.10) показник ефективності  $P_{e.g}$  має найвище значення, тобто піна кратністю 25, отримана з 6 %-го водного роз-

чину піноутворювача, має вогнегасну ефективність у 1,5 разу вищу, ніж піна з кратністю 15, одержана з 4 %-го водного розчину піноутворювача за таких умов експерименту. Також це вказує на те, що ПУ необхідно використовувати відповідно до рекомендацій виробника у співвідношенні 6/94. Отримані результати добре корелюють з результатами попередніх досліджень, отриманими у розділі 3.1. Рівняння регресії, яке описує дану залежність, подано формулою:

$$P_{e.g.} = -1,4267 + 0,2362 \cdot K + 0,0317 \cdot P - 0,0044 \cdot K^2 - 0,0035 \cdot K \cdot P + 0,025 \cdot P^2 \quad (3.42)$$

Таблиця 3.15 – Результати розрахунків показника ефективності гасіння  $P_{e.g.}$  та показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$

№ досліджу	$K$ , кратність	$P$ , %	$m_p$ , кг	$\tau$ , с	$P_{e.g.}$ , $10^{-3}, \frac{M^2}{кг \cdot с}$	$P_{в.з}$ , Г/М <sup>2</sup>
1	15	4	0,99	15	1,44	3094
2	25	4	0,72	9,15	1,94	2250
3	15	6	0,795	14,3	1,86	2484
4	25	6	0,645	8,66	2,29	2016
5	15	5	0,87	14,5	1,69	2719
6	25	5	0,695	9,05	2,04	2172
7	20	4	0,895	10,2	1,75	2797
8	20	6	0,765	9,28	2,25	2391
9	20	5	0,835	9,76	1,96	2609

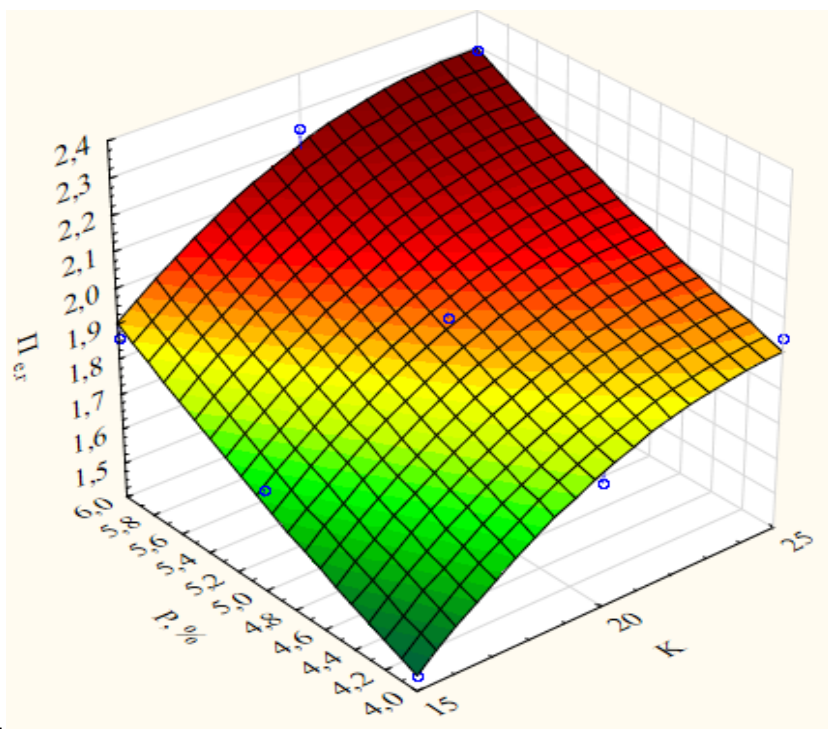


Рис. 3.21 – Поверхня відгуку залежності зміни показника ефективності гасіння  $P_{e.g.}$  від кратності компресійної піни  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині

На рисунку 3.22 зображено залежність зміни показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією піноутворювача  $P=5\%$ .

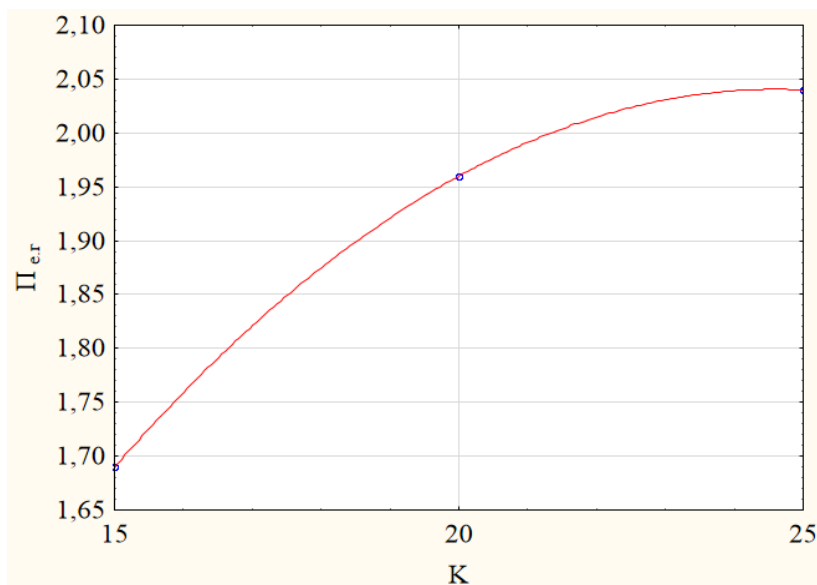


Рис. 3.22 – Залежність показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією водного розчину піноутворювача  $P=5\%$

Виходячи з аналізу графіка на рис. 3.22, показник ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  зростає зі збільшення кратності піни  $K$ . В разі зміни кратності від 15 до 25 спостерігається підвищення показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  на 21 %, тому застосування піни із кратністю  $K=25$  є найбільш доцільним для гасіння твердих горючих речовин. Модель опису цієї залежності представлена формулою:

$$\Pi_{e.g} = -0,26 + 0,187 \cdot K - 0,0038 \cdot K^2. \quad (3.43)$$

На рис. 3.23 зображено графік залежності зміни показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  від концентрації піноутворювача  $P$  із кратністю піни  $K=25$ .

Як зрозуміло з графіка на рис. 3.22, умови, за яких відбувається збільшення концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині, мають позитивний наслідок та підвищують значення показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$ . Найвище значення показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  спостерігається за робочої концентрації піноутворювача  $P=6\%$ . Це вказує на те, що слід дотримуватися вимог та рекомендацій виробника піноутворювача. На формулі 3.44 наведено рівняння, яке описує вплив концентрації піноутворювача  $P$  на показник ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$ :

$$\Pi_{e.g} = 3,04 - 0,575 \cdot P + 0,075 \cdot P^2. \quad (3.44)$$

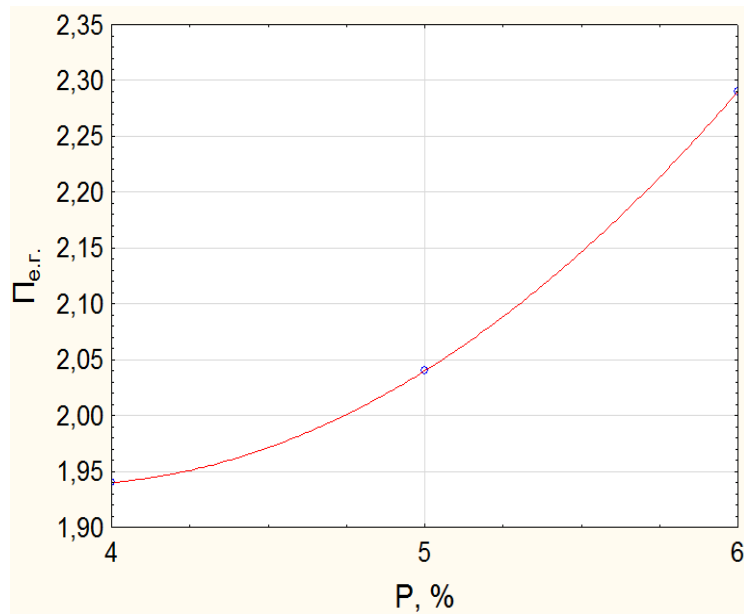


Рис. 3.23 – Залежність показника ефективності гасіння  $\Pi_{e.g.}$  від концентрації піноутворювача  $P$  із кратністю піни  $K=25$

На рис. 3.34 наведено поверхню відгуку залежності зміни показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від кратності компресійної піни  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$ .

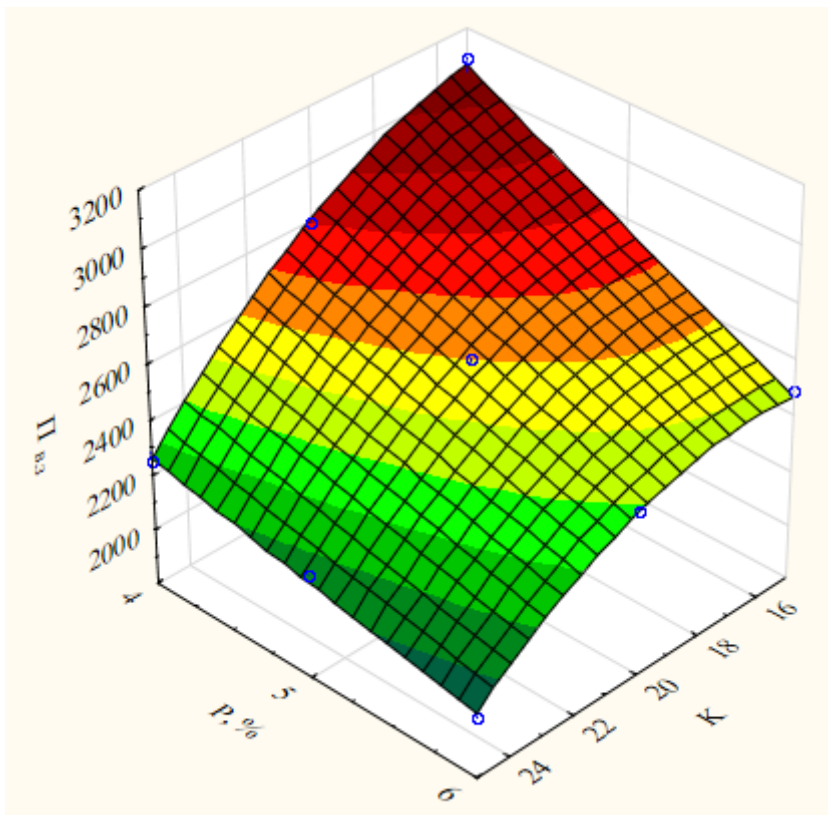


Рис. 3.24 – Залежність зміни показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від кратності компресійної піни  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$

Поверхня відгуку, зображена на рис. 3.24, описує залежність зміни показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від двох чинників, таких як кратність піни  $K$  та концентрація піноутворювача  $P$ . Аналізуючи графік, можна побачити, що найвища вогнегасна ефективність, за показником вогнегасної здатності, спостерігається за умови використання піни з кратністю  $K=25$  і концентрації піноутворювача в водному розчині  $P=6\%$ . За зниження до нижнього рівня чинників (таблиця 3.10) вогнегасна ефективність піни зменшується практично в 1,5 рази, що свідчить про негативний вплив низької концентрації піноутворювача  $P$  та низької кратності піни  $K$  на вогнегасну ефективність у цілому. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано нижче:

$$\Pi_{в.з} = 4599,1111 + 73,1 \cdot K - 637,6667 \cdot P - 5,7267 \cdot K^2 + 18,8 \cdot K \cdot P + 5,3333 \cdot P^2. \quad (3.45)$$

На рис. 3.25 наведено графік залежності показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією водного розчину піноутворювача  $P=6\%$ .

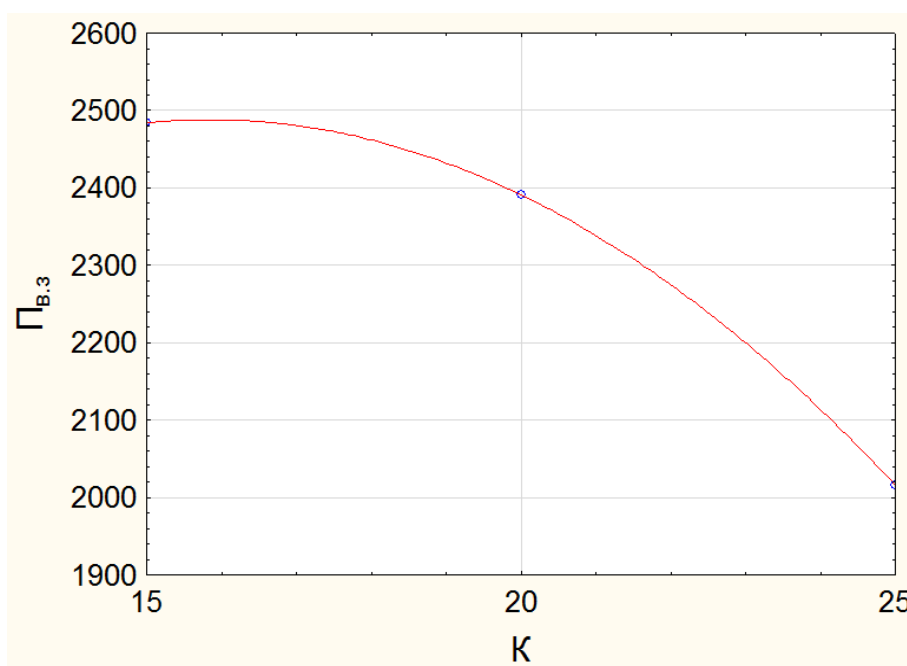


Рис. 3.25 – Залежність показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від кратності компресійної піни  $K$  з концентрацією піноутворювача  $P=6\%$

На рисунку 3.25 зображено залежність показника вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  від кратності компресійної піни  $K$ . Виходячи з розрахунків експериментальних даних та їх подальшої інтерпретації у графічному середовищі, встановлено, що у разі зростання кратності від 15 до 20 зростає вогнегасна ефективність піни, яка оцінюється за показником вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$ , на 5%. Надалі, за збільшення кратності піни від 20 до 25,

суттєві зміни у підвищенні ефективності не спостерігається і вони становлять близько 10 %. Рівняння регресії залежності наведено на нижче:

$$P_{в.з} = 1071 + 178,8 \cdot K - 5,64 \cdot K^2. \quad (3.46)$$

На рис. 3.26 зображено графік залежності показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  від концентрації піноутворювача  $P$  із кратністю піни  $K=20$ .

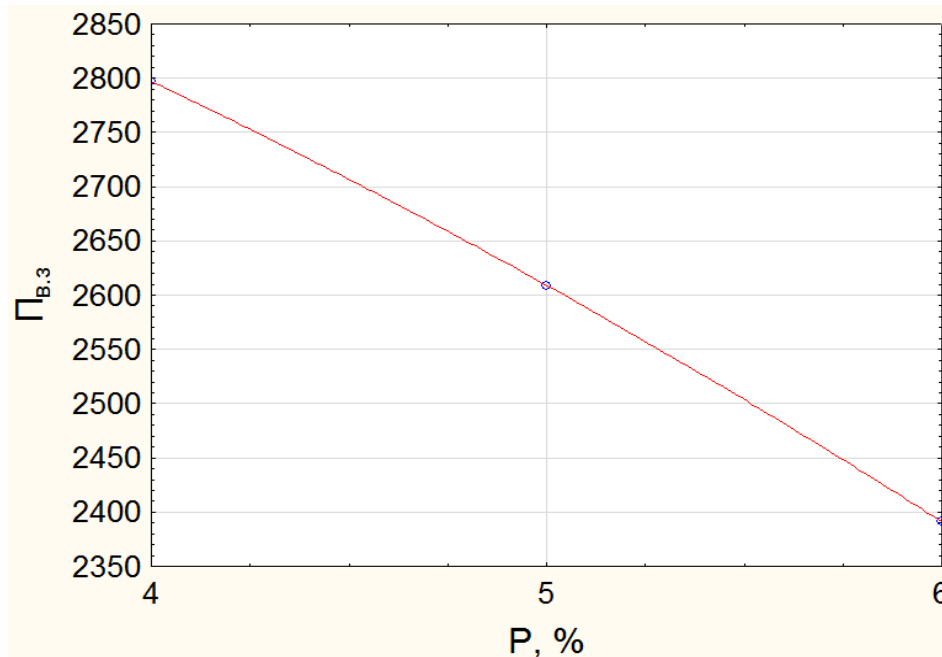


Рис. 3.26 – Залежність показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  від концентрації піноутворювача  $P$  із кратністю піни  $K=20$

Графічна залежність вогнегасної ефективності за показником вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  від концентрації піноутворювача у водному розчині  $P$  наведена на рис. 3.25. Збільшення концентрації піноутворювача  $P$  у водному розчині приводить до збільшення вогнегасної ефективності компресійної піни, яка оцінювалась за показником вогнегасної здатності  $P_{в.з}$ . Із графіка зрозуміло, що за концентрації водного розчину піноутворювача  $P=6$  % вогнегасна ефективність піни більша на 15 %, ніж за концентрації водного розчину  $P=4$  %, за однакової кратності піни  $K=20$ . Рівняння (3.47) описує залежність впливу концентрації піноутворювача  $P$  на показник вогнегасної здатності  $P_{в.з}$ .

$$P_{в.з} = 3249 - 53 \cdot P - 15 \cdot P^2. \quad (3.47)$$

Використання рівня (3.47) дозволяє визначити ефективність вогнегасної піни за показником вогнегасної здатності, залежно від концентрації піноутворювача в розчині.

### 3.4 Порівняння двох показників вогнегасної ефективності компресійної піни між собою

Під час розрахунку показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  враховується лише маса вогнегасної речовини  $m$  та площа умовної пожежі  $S$ . Показник ефективності гасіння  $P_{е.г.}$ , окрім площі умовної пожежі  $S$  та маси вогнегасної речовини  $m_p$ , також враховує проміжок часу  $\tau$ , необхідний для гасіння осередку, тому, з нашої точки зору, використання значень розрахунків  $P_{е.г.}$  є більш доцільним для оцінки вогнегасної ефективності компресійної піни.

Вогнегасну ефективність компресійної піни чисельно виражено через показник ефективності гасіння  $P_{е.г.}$  та показник вогнегасної здатності  $P_{в.з}$ . Компресійна піна, одержана за концентрації піноутворювача  $P = 6 \%$ , із кратністю піни  $K = 25$ , має найбільшу ефективність гасіння; при цьому чисельне значення показника ефективності гасіння дорівнює

$$P_{е.г.} = 2,29 \frac{M^2}{\text{кг} \times \text{с}}$$

Найнижча вогнегасна здатність піни за показником ефективності гасіння  $P_{е.г.}$  спостерігається за умов, коли концентрація піноутворювача у розчині дорівнює  $P = 4 \%$  та при кратності піни  $K = 15$ . У цьому випадку чисельне значення показника ефективності гасіння дорівнює

$$P_{е.г.} = 1,44 \frac{M^2}{\text{кг} \times \text{с}}$$

З вищевикладених результатів зрозуміло, що підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни, виражене як показник ефективності гасіння, полягає у числовому збільшенні розрахункового значення показника  $P_{е.г.}$ .

Для показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  встановлено протилежну залежність від показника ефективності гасіння  $P_{е.г.}$ . Підвищення вогнегасної ефективності піни у виразі у вигляді вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  полягає в його чисельному зменшенні. Найнижча вогнегасна ефективність за оцінкою показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$  спостерігається за умов кратності  $K = 15$  та концентрації піноутворювача у розчині  $P = 4 \%$  та становить  $P_{в.з} = 3094 \text{ г/м}^2$ . У свою чергу найвищу вогнегасну ефективність має піна кратністю  $K = 25$ , за концентрації піноутворювача  $P = 6 \%$ . Чисельне значення показника вогнегасної здатності становить  $P_{в.з} = 2016 \text{ г/м}^2$ .

З метою порівняння цих двох показників між собою та встановлення залежності збільшення або зменшення вогнегасної ефективності компресійної піни від зміни кратності  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$  було прийнято рішення [16] перевести числові розрахункові значення показників у відсоткові. За  $100 \%$  було взято найнижче розрахункове значення показника ефективності гасіння  $P_{е.г.}$  та найвище значення показника вогнегасної здатності  $P_{в.з}$ .

Серії дослідів розподілено на 6 випадків: випадки, у яких відбувається змінення вогнегасної ефективності піни за однакової концентрації піноутворювача  $P$  за рахунок зміни кратності  $K$ , та випадки, коли кратність  $K$  є сталою величиною і на вогнегасну ефективність впливає зміна концентрації піноутворювача  $P$ . Далі було розраховано збільшення або зменшення значень показників у відсотках від 100 % значення для кожної із серії дослідів за сталої концентрації  $P$ , для визначення впливу кратності  $K$ , та з незмінною кратністю  $K$  для визначення впливу концентрації  $P$ . Розрахункові дані наведено в табл. 3.16.

Таблиця 3.16 – Відсоткові розрахунки зміни вогнегасної ефективності компресійної піни за оцінками показника ефективності гасіння та показника вогнегасної здатності

Розподіл дослідів, №	$K$ , кратність	$P$ , %	$P_{e.g} \times 10^{-3}, \frac{M^2}{K \times C}$	$P_{в.з.}, \frac{г}{M^2}$	$P_{e.g}$ , %	$P_{в.з.}$ , %
Вплив зміни кратності $K$ на вогнегасну ефективність піни						
1	15	4	1,44	3094	100 %	100 %
	20	4	1,75	2794	121 %	110 %
	25	4	1,94	2250	134 %	128 %
2	15	5	1,69	2719	100 %	100 %
	20	5	1,96	2609	116 %	105 %
	25	5	2,04	2172	120 %	121 %
3	15	6	1,86	2484	100 %	100 %
	20	6	2,25	2391	121 %	104 %
	25	6	2,29	2016	123 %	119 %
Вплив зміни концентрації піноутворювача $P$ на вогнегасну ефективність піни						
4	15	4	1,44	3094	100 %	100 %
	15	5	1,69	2719	117 %	113 %
	15	6	1,86	2484	129 %	120 %
5	20	4	1,75	2794	100 %	100 %
	20	5	1,96	2609	112 %	107 %
	20	6	2,25	2391	128 %	115 %
6	25	4	1,94	2250	100 %	100 %
	25	5	2,04	2172	105 %	104 %
	25	6	2,29	2016	118 %	111 %

На основі числових даних, переведених у відсотки, побудовано залежності вогнегасної ефективності від кратності піни  $K$  та концентрації піноутворювача  $P$ . Графічна залежність показників за розрахунковими даними наведена рис. 3.27 та 3.28.

Аналізуючи графік на рис. 3.26, зрозуміло, що з підвищенням кратності піни  $K$  за сталої концентрації піноутворювача  $P = 6$  % відбувається підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни. Так, для кривої  $P_{e.g}$  спостерігається збільшення вогнегасної ефективності піни на



21 %, за збільшення кратності від 15 до 20. Рівняння для опису кривих  $\Pi_{e.g}$  та  $\Pi_{в.з}$  наведено нижче:

$$\Pi_{e.g} = -77 + 17,5 \cdot K - 0,38 \cdot K^2 ; \quad (3.48)$$

$$\Pi_{в.з} = 154 - 6,9 \cdot K + 0,22 \cdot K^2 . \quad (3.49)$$

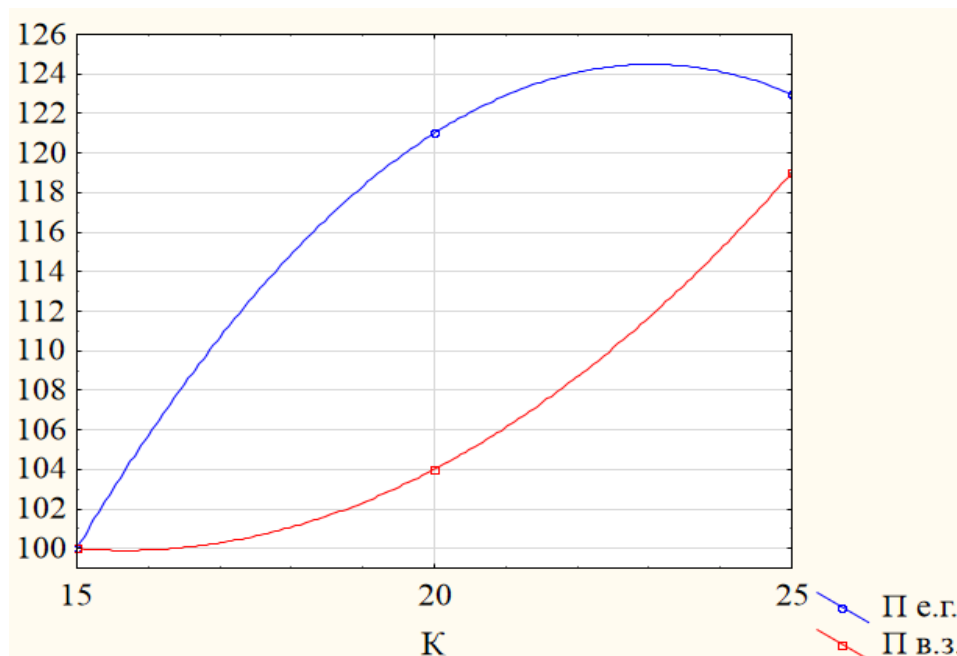


Рис. 3.27 – Залежність показників вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  та ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  від кратності піни  $K$  за концентрації піноутворювача  $P=6\%$

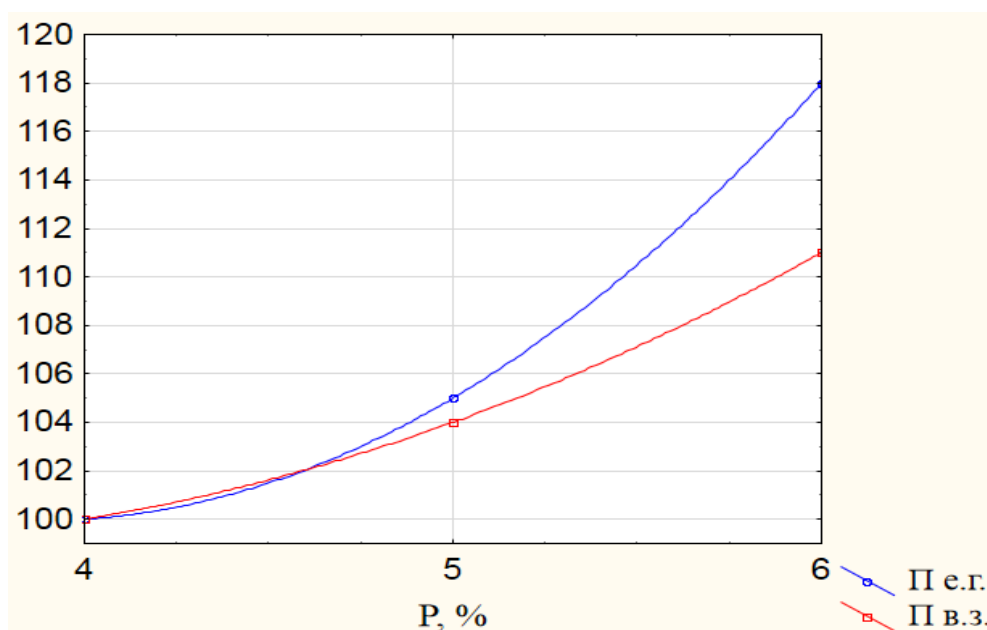


Рис. 3.28 – Залежність показників вогнегасної здатності  $\Pi_{в.з}$  та ефективності гасіння  $\Pi_{e.g}$  від концентрації піноутворювача  $P$  у розчині за умов кратності піни  $K=25$

Проаналізувавши графік (рис. 3.26) впливу концентрації піноутворювача  $P$  на вогнегасну ефективність компресійної піни за сталої кратності  $K=25$ , можна зрозуміти, що за вищій вогнегасній ефективності відповідає більша концентрація піноутворювача  $P$ . З підвищенням концентрації піноутворювача  $P$  від 4 % до 5 % збільшення вогнегасних властивостей піни за показником  $P_{e.g}$  становить 5 %. Подальше збільшення концентрації  $P$  до 6 % приводить до підвищення ефективності на 18 %. Це підкреслює необхідність використання піноутворювача згідно з вимогами виробника. За показником  $P_{в.з}$  має місце підвищення вогнегасної ефективності піни на 4 % та 7 % відповідно, у разі зміни її кратності  $K$  від 15 до 20, та з 20 до 25. Рівняння регресії, які описують дані залежності, наведено нижче:

$$P_{e.g} = 160 - 31 \cdot P + 4 \cdot P^2 ; \quad (3.50)$$

$$P_{в.з} = 114 - 9,5 \cdot P + 1,5 \cdot P^2 . \quad (3.51)$$

Проведено порівняння показників вогнегасної ефективності компресійної піни. Встановлено різницю зміни показників залежно від кратності піни та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування.

### **3.5 Експериментальні дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни, води та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандартизованих модельних осередків пожежі класу А**

Проведений аналіз у розділі 1 дозволив встановити найбільш поширені вогнегасні речовини, які можуть бути використані для гасіння пожеж, пов'язаних із горінням твердих горючих речовин.

Вода є основною вогнегасною речовиною для гасіння пожеж класу А, але має ряд недоліків, основними з яких є низький коефіцієнт її використання та значний вторинний збиток.

Одним із сучасних способів, які можуть бути використані для більш ефективного гасіння твердих горючих речовин, є використання гелеутворюючих систем, які мають ряд переваг у порівнянні з водою [173,174].

У розділі 3.2 проведено експериментальні дослідження з визначення вогнегасної ефективності компресійної піни різної кратності з різними концентраціями піноутворювача та підтверджено її вогнегасну ефективність.

Також, згідно встановлених задач, однією з них є порівняння вогнегасної ефективності води, гелеутворюючих систем та компресійної піни під час гасіння твердих горючих речовин.

Порівняння будь-яких засобів пожежогасіння оцінюється за показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$ , згідно [20, 23]. Для цього визначається кількість вогнегасної речовини, що використана на гасіння за певний проміжок часу під час гасіння визначеної площі пожежі. Розрахунок показника ефективності гасіння  $P_{e.g}$  здійснювали за формулою (3.28).

Кірєєвим О.О. та Савченком О.В. було проведено експериментальні дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності гелеутворюючих систем під час гасіння стандартизованих модельних осередків пожежі класу А [175] за показником вогнегасної здатності  $P_{в.з.}$ . Встановлено найбільш ефективний гелеутворюючий склад для гасіння твердих горючих речовин. Це ГУС  $CaCl_2$  (11,4 %) –  $Na_2O \cdot 2,95SiO_2$  (3,8 %) –  $H_2O$  (84,8%). Для подальшого порівняння гелеутворюючої системи із водою та компресійною піною за показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$  були використані результати дослідників, які отримані в роботі [175]. Тому нами не здійснювалося гасіння стандартизованих модельних осередків пожежі класу А гелеутворюючими системами.

Дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності компресійної піни за показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$  у розділі 3.2 проводились на лабораторних осередках малого розміру. Компресійна піна, утворена за концентрації піноутворювача  $P=6$  % та кратності  $K=25$  має найбільшу ефективність гасіння; при цьому чисельне значення показника ефективності гасіння дорівнює  $P_{e.g} = 2,29 \times 10^{-3} \frac{M^2}{KG \times C}$ , у зв'язку з чим для проведення дослідів використовували піну кратністю 25.

Як модельні осередки для моделювання реальних пожеж невеликої площі використовують стандартні модельні осередки пожеж різного рангу [172]. Стандартні модельні осередки 1А мають площу поверхні, в  $\sim 15$  разів більшу, ніж лабораторні осередки, які використовували для визначення вогнегасної ефективності компресійної піни у розділі 3.2. Ці два види модельних осередків підбрано з урахуванням їх геометричної подоби.

Так, для проведення уточнення вогнегасної ефективності компресійної піни та порівняння її з водою обрано модельний осередок пожежі класу 1А, що являє собою дерев'яний штабель зі звичайної сосни з 72 брусків перерізом (40×40) мм та довжиною 500 мм, які укладені у шість рядів. Вологість брусів соснової деревини становить 10 %. Загальна і відкрита площі поверхонь такого осередку становлять 5,99 м<sup>2</sup> і 4,7 м<sup>2</sup> відповідно.

Умови проведення дослідів відповідали стандарту [172]. Випробування проводились [17] на відкритому просторі за швидкості вітру 1÷2 м/с, температура повітря дорівнювала 10 °С. У визначеному місці проведення дослідів було встановлено виносну платформу. Як опори використовувались металеві стійки зі сталевих кутків. Далі на стійках збирався

штабель. Відстань від платформи до основи штабеля становила  $(400\pm 10)$  мм. Після цього під штабель було встановлено металеве деко розміром  $400\text{ мм}\times 400\text{ мм}\times 100\text{ мм}$ . Деко розміщалося горизонтально, дно покривалося шаром води товщиною 30 мм, до нього заливалось 1,1 л бензину А-92.

На рис. 3.29 зображено фото модельного осередку на початку горіння та після певного проміжку часу вільного горіння. Пальне у деко підпалювалось, після його вигорання (120–160 с) деко забиралось з-під штабеля. Загальна тривалість вільного горіння модельного осередку складала  $\sim 7$  хвилин.



а)

б)

**Рис. 3.29 – Фото модельного осередку осередку пожежі:**

а) стан модельного осередку на початку горіння; б) стан модельного осередку після 7 хвилин вільного горіння

На рис. 3.30–3.31 зображено процес гасіння модельного осередку з експериментальної системи для генерування і подавання компресійної піни: водою; компресійною піною. Під час гасіння осередку дотримувалися вимог ДСТУ 3675–98. Після вигорання ( $45 \pm 2\%$ ) маси штабелю ( $400\text{–}440$  с вільного горіння) здійснювали гасіння.

Згідно ДСТУ 3675–98 після гасіння протягом 10 хвилин здійснювали спостереження за модельним осередком щодо появи повторного займання. Якщо його не виникало, модельний осередок вважався погашеним. На рисунку 3.32–3.33 наведено модельні осередки після гасіння: водою; компресійною піною



**Рис. 3.30 – Фото процесу гасіння модельного осередку пожежі водою**

Маса вогнегасної речовини визначалась шляхом зважування ємності з вогнегасною речовиною до початку гасіння і після повної ліквідації полум'я на модельному осередку. Фіксували проміжок часу від початку спрямування вогнегасного струменя в осередок пожежі, до моменту повного гасіння. Було проведено 2 досліді, по 3 серії в кожному. Далі було розраховано середнє значення маси вогнегасної речовини та проміжок часу, який було витрачено на гасіння. Узагальнені результати експерименту наведено в табл. 3.17.



Рис. 3.31 – Фото процесу гасіння модельного осередку пожежі компресійною піною



Рис. 3.32 – Фото модельного осередку після гасіння водою (через 5 хвилин спостерігалося повторне займання)



Рис. 3.33 – Фото модельного осередку після гасіння компресійною піною

Таблиця 3.17 – Результати гасіння модельного осередку 1А водою та компресійною піною

Вогнегасна речовина	Маса $m_p$ , кг				Тривалість гасіння $\tau$ , с				$S$ , м <sup>2</sup>
	1	2	3	$\bar{m}$	1	2	3	$\bar{\tau}$	
	$m_1$	$m_2$	$m_3$		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$		
Вода	10,3	13,2	11	11,55	105	97	95	99	4,7
КП	5,8	6,5	6	6,1	63	52	50	55	
ГУС	6,53				60				

На основі отриманих даних експерименту та результатів роботи [175] було розраховано значення показників ефективності гасіння  $P_{e.g}$  для води, компресійної піни та гелів. Після гасіння модельного осередку водою, через 5 хвилин спостерігалось повторне займання.

Результати розрахунків наведені в табл. 3.18.

Таблиця 3.18 – Розрахункові дані  $P_{e.g}$  для різних вогнегасних речовин

Вогнегасна речовина	$P_{e.g} \times 10^{-3}, \frac{M^2}{KG \times C}$
Вода	4,12
ГУС	11,9
КП	14

На рис. 3.34 зображено графік залежності маси вогнегасної речовини  $m_p$ , необхідної для гасіння модельного осередку класу А, від типу вогнегасних речовин, які використовувались в експерименті.

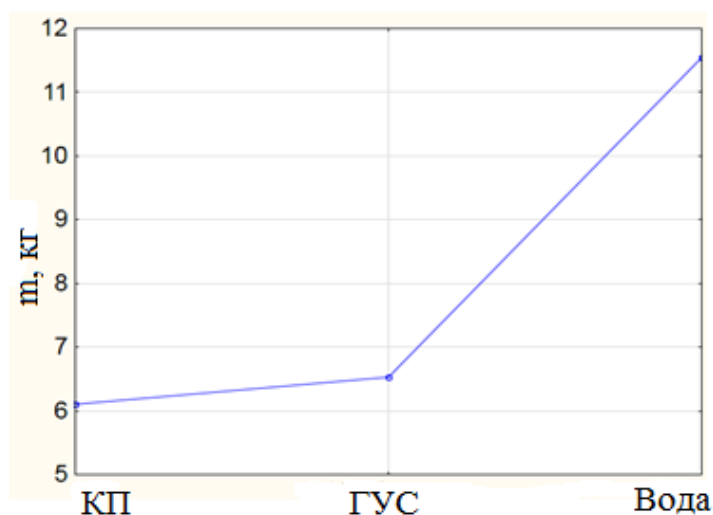


Рис. 3.34 – Кількість необхідної маси води, гелеутворюючих систем та компресійної піни, необхідної для гасіння модельного осередку класу 1А

Виходячи із графіка на рис. 3.34, маса розчину піноутворювача КП, використана на гасіння, становить  $m_p = 6,1$  кг, що на 47 % менше, ніж маса води, що була використана на гасіння модельного осередку. У випадку гелеутворюючих систем маса, необхідна для гасіння, становила  $m_a = 6,53$  кг. Це на 45 % менше, ніж маса води, та на 2 % більше, ніж маса водного розчину піноутворювача, використовуваного для генерування компресійної піни.

На рис. 3.35 зображено графік залежності проміжку часу  $\tau$ , необхідного для гасіння модельного осередку класу 1А, залежно від вогнегасних речовин, які застосовували в експерименті.



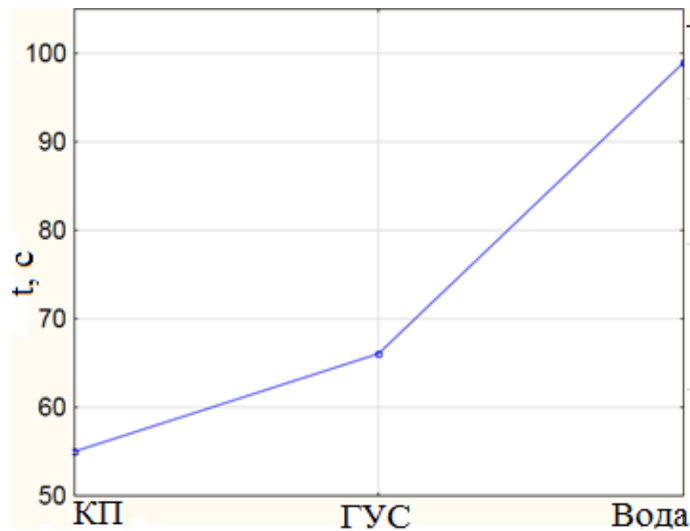


Рис. 3.35 – Проміжок часу  $\tau$ , необхідного для гасіння модельного осередку класу 1А водою, гелеутворюючими системами та компресійною піною

Виходячи з даних графіка на рис 3.35, найбільше часу для гасіння модельного осередку витрачається у випадку застосування води. Так, проміжок часу, потрібний для гасіння водою, склав  $\tau = 99$  секунд (за середньої витрати 6,97 л/хв). Це значення на 39 % більше, ніж проміжок часу, який був потрібен для гасіння гелеутворюючими системами, та склав  $\tau = 60$  секунд. Найменший проміжок часу, необхідний для гасіння модельного осередку, спостерігається у випадку застосування компресійної піни та становить  $\tau = 55$  секунд. Це на 45 % менше, ніж проміжок часу, необхідний для гасіння водою, та на 10 % нижче, ніж проміжок часу, який був зафіксований у випадку гасіння модельного осередку гелеутворюючими системами.

На рис. 3.36 графічно зображено порівняння показника ефективності  $Pe_{г}$  гасіння для води, компресійної піни та гелеутворюючих систем.

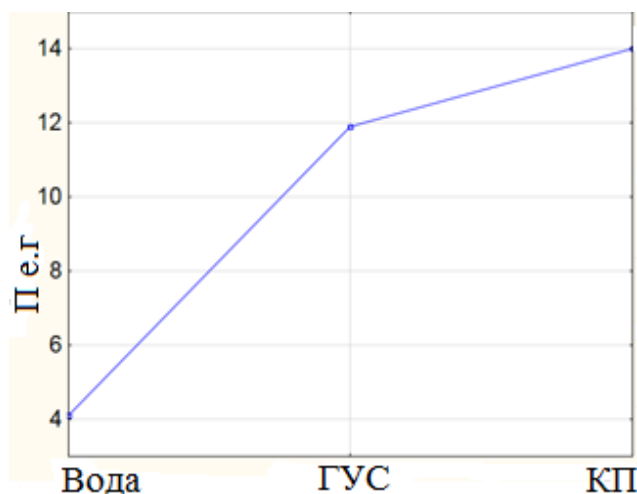


Рис. 3.36 – Графічне зображення показника ефективності гасіння  $Pe_{г}$  для води, гелеутворюючих систем та компресійної піни

Аналізуючи графік на рисунку 3.36, можна дійти висновку, що найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$  спостерігається у випадку застосування компресійної піни, чисельне значення становить  $P_{e.g} = 14 \times 10^{-3} \frac{M^2}{кг \times c}$ . Виходячи з даних на графіку, вогнегасна ефективність компресійної піни більше, ніж у води, на 80 %; щодо гелеутворюючих систем, то, у порівнянні з ними, вогнегасна ефективність піни більше на 15 %.

Отже, проведені експериментальні дослідження дозволили встановити найбільш ефективну вогнегасну речовину для гасіння твердих горючих матеріалів. За показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$  компресійна піни має найбільшу вогнегасну здатність, у порівнянні з водою та гелеутворюючими системами.

### 3.6 Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити вплив концентрації водного розчину піноутворювача і кратності компресійної піни, одержаної з нього, на її дисперсність і стійкість, а також дослідити зміну середнього розміру пінних бульбашок; зокрема встановлено раніше невідомі залежності для компресійної піни, які мають принципові відмінності від аналогічних залежностей для піни, утвореної повітряно-механічним способом:

– для компресійної піни більшої кратності має місце і більша її стійкість, а саме під час збільшення кратності від 5 до 12,5 відбувається збільшення стікості піни у 2,9 рази. Відповідно у разі збільшення кратності від 5 до 20, відбувається збільшення її стійкості у 4,8 рази, а саме для піни із кратністю 5 стікості дорівнює 4,5 хв., для піни із кратністю 20 вона дорівнює 21,8 хв. Збільшення концентрації водного розчину піноутворювача (на прикладі піноутворювача «БАРС-S») від 4 % до 6 % (концентрації рекомендованої виробником) супроводжується збільшенням стійкості піни на 22 %;

– зі збільшенням кратності відбувається зменшення розміру пінної бульбашки, що приводить до збільшення тривалості її існування, наслідком чого є утворення високодисперсної стійкої піни; зокрема зі збільшенням кратності піни від 5 до 20 відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 14 %. Також виявлено (на прикладі піноутворювача «БАРС-S»), що за збільшення концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 % (концентрації рекомендованої виробником) відбувається зменшення розміру бульбашки на 10 %;

– зі збільшенням кратності піни збільшується однорідність її бульбашок, зокрема за збільшення кратності від 5 до 12,5 відбувається зменшення діапазону діаметрів бульбашок на 66 %. Подальше збільшення

кратності до 20 супроводжується зменшенням діапазону діаметрів бульбашок майже на 80 %.

2. Оцінено вогнегасну ефективність КП під час гасіння лабораторних (нестандартизованих) осередків класу А, за показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння, залежно від її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, з якого одержано піну. Визначено, що кратність піни істотно впливає на її вогнегасну ефективність. Залежно від концентрації та зі збільшенням кратності піни від 15 до 25 відбувається зростання вогнегасної ефективності на 60 %. Встановлено, що найбільша вогнегасна здатність компресійної піни спостерігається за кратності піни 25 та концентрації піноутворювача 6 % (на прикладі піноутворювача загального призначення «БАРС-S»). Це вказує на те, що ПУ необхідно використовувати відповідно до рекомендацій виробника стосовно його використання для генерування піни за допомогою ежекційних стволів-генераторів (у співвідношенні 6/94).

3. Проведено експериментальні дослідження щодо гасіння стандартизованого модельного осередку 1А водою (без функціональних добавок) та компресійною піною. Порівняно вогнегасну ефективність гелеутворюючих систем, компресійної піни та води. Оцінку вогнегасної ефективності проведено за показником ефективності гасіння  $P_{e.g}$ . Під час гасіння модельного осередку водою значення показника ефективності гасіння склало  $P_{e.g} = 4,12 \times 10^{-3}, \frac{M^2}{KG \times C}$ , але після гасіння модельного осередку, через 5 хвилин, спостерігалось повторне займання. Значення показника для ГУС склало  $P_{e.g} = 11,9 \times 10^{-3}, \frac{M^2}{KG \times C}$ , що на 65 % більше, ніж вогнегасна ефективність води. Найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння спостерігається для компресійної піни та становить  $P_{e.g} = 14 \times 10^{-3}, \frac{M^2}{KG \times C}$ , що на 80 % більше, ніж у води, та на 15 % більше, ніж у ГУС.

4. Визначено концентрацію водного розчину та кратність компресійної піни, за яких досягається її найбільша вогнегасна ефективність під час гасіння твердих горючих речовин. Рекомендовано використання компресійної піни кратністю 25. На прикладі піноутворювача загального призначення «Барс-S» встановлено, що найбільша вогнегасна ефективність компресійної піни досягається за концентрації водного розчину піноутворювача загального призначення, рекомендованої виробником для генерування повітряно-механічної піни у звичайний спосіб.

## РОЗДІЛ 4

### ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ПІДРОЗДІЛІВ ДСНС

#### 4.1 Рекомендації щодо застосування компресійної піни в підрозділах ДСНС

Традиційно у переважній більшості в Україні застосовуються водяні пожежні стволи. Протягом багатьох років технології пожежогасіння із застосуванням води розвивалися в напрямку збільшення номінальної витрати води і дальності її подавання [105].

Ефективність такого методу є виправданою лише під час гасіння великомасштабних пожеж. Але у випадках пожеж у спорудах житлового сектору, частка яких становить 76 % від загальної кількості пожеж по Україні, використання такої техніки не є ефективним, адже надлишок води (до 90 %), що застосовується для цілей пожежогасіння, не бере участі у гасінні пожежі, заливає нижні поверхи, призводячи до суттєвих вторинних збитків. Використання КП значно зменшує розмір вторинних збитків. Розвинуті держави використовують нову технологію на основі КП навіть під час гасіння великих лісових пожеж.

За період з 2016 року по 2019 рік в Україні майже удвічі збільшилась тривалість ліквідації пожеж з 28–30 хв. до 53–55 хв. Однією з вагомих причин є значне зниження пропускної здатності міських вулиць, особливо під час пікових навантажень, у зв'язку зі значним збільшенням кількості автомобілів. Перевагу в такій ситуації мають більш маневрені малогабаритні автомобілі, але вони не мають можливості доставляти великі об'єми стандартної вогнегасної речовини. У випадку застосування КП [99–101] такі автомобілі скорочують тривалість гасіння у 5–7 разів. За результатами опрацювання витрати води у 5–15 разів менше і стають еквівалентними витратам, забезпечуваним пожежними автомобілями.

На основі експериментальних даних з гасіння модельних осередків пожежі класу А, а також виходячи з результатів експериментальних досліджень з вивчення вогнегасних властивостей компресійної піни, було розроблено рекомендації щодо її застосування під час гасіння твердих горючих речовин і матеріалів.

Вогнегасна ефективність компресійної піни визначається її кратністю, вмістом та властивостями піноутворювача для кожного з класів пожеж. Рекомендується така кратність компресійної піни, генерованої з водних розчинів піноутворювача загального призначення (на прикладі піноутворювача загального призначення «БАРС-S») для гасіння твердих горючих речовин і матеріалів:

- кратність – 25;

- концентрація піноутворювача – 6 % (відповідає концентрації, рекомендованій виробником для гасіння пожеж повітряно-механічною піною, генерованою з використанням ежекційних стволів-генераторів);
- кількість води – 94 %.

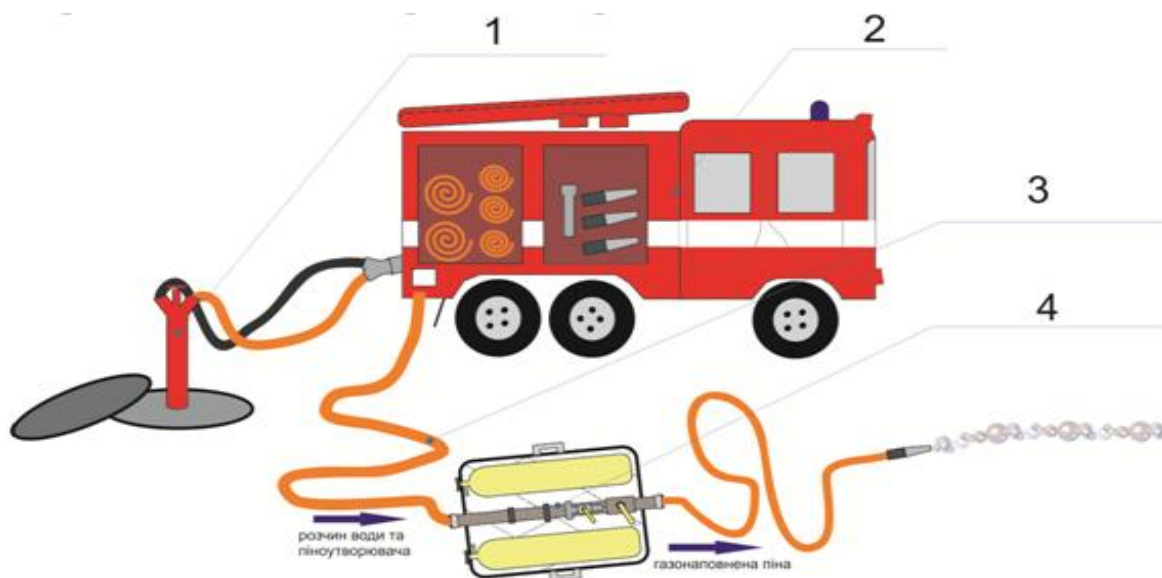
Використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А є можливим як за допомогою штатної протипожежної техніки, так і за допомогою переносних технічних засобів пожежогасіння. Але на сьогодні на території України і на озброєнні ДСНС відсутні будь-які зразки систем для генерування і подавання компресійної піни. Модернізація існуючої пожежної техніки або закупівля пожежних автомобілів, оснащених такою системою, тягне за собою суттєві економічні затрати, тому для розгляду пропонуються переносні технічні засоби пожежогасіння.

Переносні технічні засоби призначені для гасіння пожеж пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС в певних умовах, а саме:

- в багатоквартирних житлових будинках, задля суттєвого зменшення розмірів побічного збитку внаслідок затоплення суміжних приміщень (є характерним для багатоповерхових будинків і будівель підвищеної поверховості);
- в умовах недостатності вогнегасних речовин (є характерним для сільської місцевості, лісових масивів тощо);
- в умовах, коли насосне обладнання пожежної техніки не в змозі забезпечити оптимальні робочі характеристики пожежних стволів щодо тиску й витрати води (є характерним для будівель підвищеної поверховості та висотних будинків);
- в умовах, коли подавання вогнегасної речовини на певну висоту не є можливим із застосуванням насосного обладнання систем протипожежного захисту будівель (є характерним для висотних будівель).

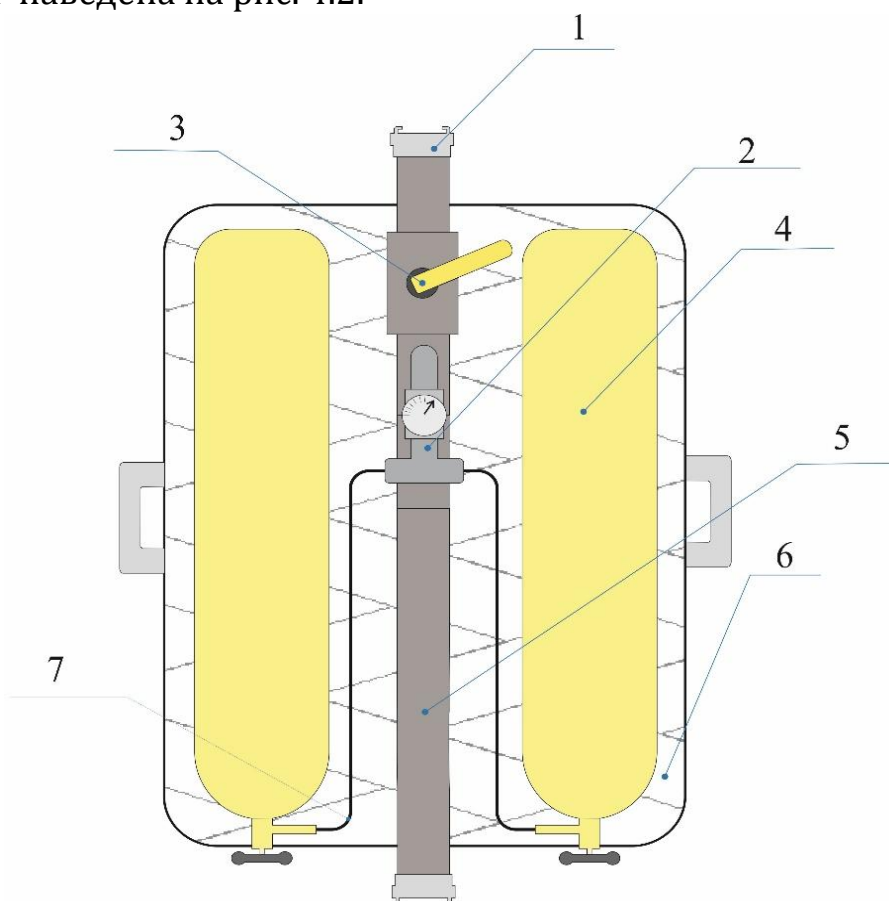
Спираючись на результати проведеного аналізу, враховуючи особливості парку протипожежної техніки оперативно-рятувальної служби ЦЗ України, нами запропоновано дві розробки [3]:

- 1) неавтономні переносні технічні засоби пожежогасіння;
  - 2) автономні переносні технічні засоби пожежогасіння.
1. Неавтономний переносний модуль для генерування компресійної піни, що використовується разом з автоцистернами як вставка в рукавну лінію. Пропонується використання модуля за схемою, наведеною на рис. 4.1.
  2. Автономна переносна система генерування і подавання компресійної піни має закриту схему та може бути реалізована у вигляді ранцевої системи пожежогасіння, вогнегасника, модуля для автомобілів першої допомоги або у вигляді причепа.



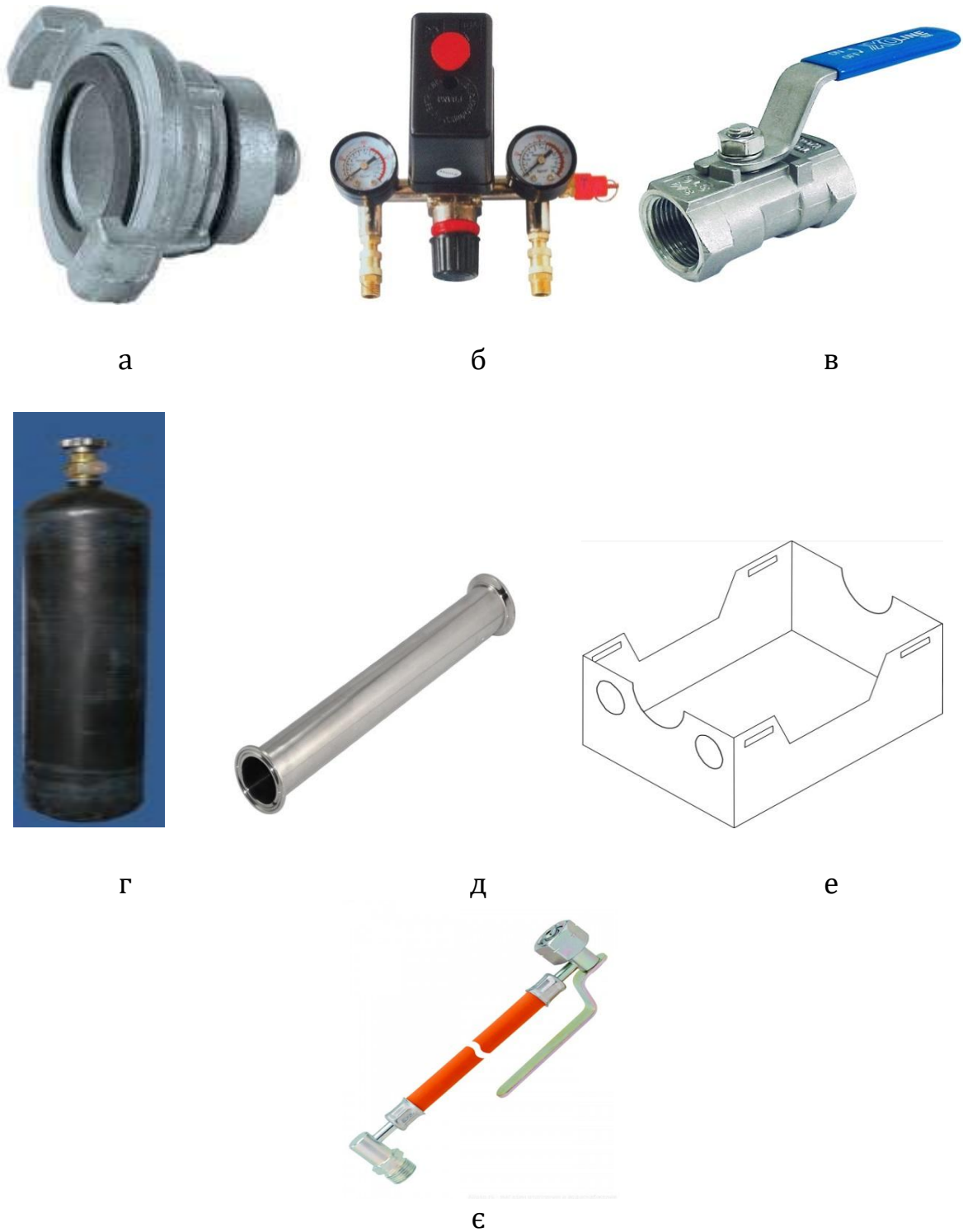
**Рис. 4.1 – Принципова схема використання неавтономного переносного модуля для генерування компресійної піни**

Схема неавтономного переносного модуля для генерування компресійної піни наведена на рис. 4.2.



**Рис. 4.2 – Схема неавтономного переносного модуля для генерування компресійної піни**

Склад неавтономного модуля для генерації компресійної піни наведено на рис. 4.3.



**Рис. 4.3 – Складові елементи неавтономного модуля для генерування компресійної піни:**  
 а) з'єднувальні головки; б) редуктор із манометром; в) кран для подачі розчину води та піноутворювача; г) балони зі стисненим повітрям; д) основний трубопровід; е) каркас модуля; е) з'єднувальні трубопроводи для стисненого повітря

Принципову схему такої системи наведено на рис. 4.4.

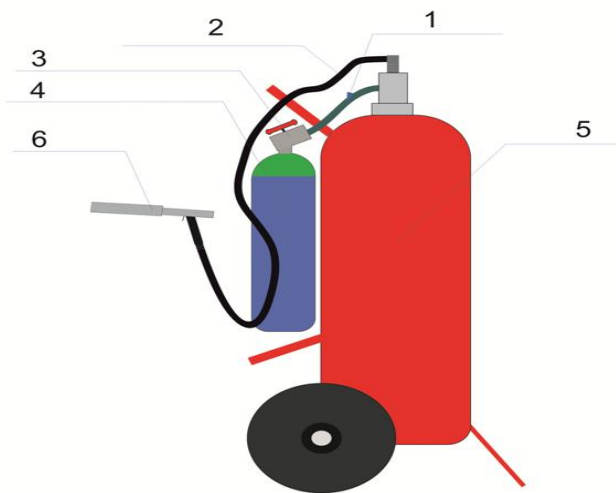


Рис. 4.4 – Автономна переносна система для генерування і подавання компресійної піни

Склад автономного модуля для генерування і подавання компресійної піни наведено на рис.4.5.



Рис. 4.5 – Складові елементи автономного модуля для генерації компресійної піни:

а) трубопровід для подачі стисненого повітря; б) трубопровід для подачі компресійної піни; в) кран для перекриття подачі стисненого повітря; г) балон зі стисненим повітрям; д) балон із водою і піноутворювачем; е) ствол



Основні параметри переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни мають відповідати наведеним технічним вимогам та основним технічним характеристикам (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Основні технічні характеристики переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни

Параметри	Неавтономний переносний модуль для генерування і подавання компресійної піни	Переносна автономна система для генерування і подавання компресійної піни
Продуктивність за піною, л/хв	1080	до 1600
Кратність піни	10–25	10–25
Кількість повітря для генерування компресійної піни	2 балони зі стисненим повітрям, об'єм – 6 літрів, тиск – 300 бар	1 балон зі стисненим повітрям, об'єм – 5 літрів, тиск – 150 бар
Робочий тиск, бар	до 10	до 8
Концентрація піноутворювача у розчині, %	6	6
Габарити в межах, мм	750 x 450 x 450	
Вага, кг	до 50	до 100
Орієнтовна вартість розробки, грн.	до 30 000	
Вартість аналогів, грн.	Уточнюється	від 200 000

Переваги застосування переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни (ПТЗКП):

- економічна та сучасна технологія пожежогасіння (проста в обслуговуванні та експлуатації);
- незалежний від параметрів роботи пожежного автомобіля автономний модуль, який легко за своїми габаритними розмірами вміщується у відсік автомобіля;
- ефективне гасіння горючих речовин і матеріалів, таких як пластик, гума, олива тощо (добра проникна здатність за рахунок збільшення тривалості спінювання);
- добра адгезія, завдяки однорідній структурі піни;
- низька вітрова вразливість, яка веде до високої точності влучення в осередок пожежі; подавання вогнегасної речовини на значні висоту й довжину;
- підвищення маневреності працюючого зі стволом за рахунок меншої ваги і більшої ергономічності використання високонапірного рукава.

Напрямки застосування ПТЗКП загального призначення (що утворюють мокру піну):

1. На поверхах та горищах житлових будинків:

- в умовах, коли подавання вогнегасної речовини на певну висоту є неможливим із застосуванням стаціонарного насосного обладнання систем

протипожежного захисту будівель та штатної пересувної пожежної техніки (є характерним для багатопверхових будівель і будівель підвищеної поверховості), а також у будівлях та спорудах різного призначення;

– основною метою застосування переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни в багатоквартирних будівлях є зменшення побічного збитку від дії вогнегасних засобів і затоплення нижніх поверхів, а також економія вогнегасних речовин. Можливе попереднє розміщення подібних систем пожежогасіння на поверхах або між ними на сходових клітках, що значно зменшить тривалість вільного розвитку пожежі та оперативне розгортання.

2. Для гасіння пожеж на об'єктах транспорту (АЗС, парки техніки, пожежі автомобілів):

– у разі виникнення пожеж на об'єктах транспорту використання ПТЗКП веде до зменшення тривалості гасіння, витрати вогнегасних речовин та зменшення збитків від пожежі;

– під час гасіння розлитих ЛЗР та ГР пінні струмені подають безпосередньо на поверхню рідини, що горить, до повного покриття їх піною;

– під час гасіння пожеж на транспорті пінні струмені спрямовують безпосередньо на елементи, що горять; при цьому мають місце два механізми припинення горіння – охолодження та ізоляція;

– доцільним є забезпечувати місця стоянки техніки та АЗС ПТЗКП для зменшення тривалості вільного розвитку пожежі.

3. В сільській місцевості та екосистемах:

– застосування ПТЗКП буде ефективним та економічним під час гасіння пожеж у сільській місцевості та невеликих пожеж в екосистемах (лісових пожеж на початковій стадії, для прокладання вогнезахисних смуг у лісах);

– за умови недостатньої кількості вогнегасних речовин ПТЗКП можуть використовуватись для гасіння окремо розташованих будівель та «оперативного» покриття поверхонь піною для запобігання їх запалюванню.

Напрямки застосування ПТЗКП спеціального призначення (що створюють «суху» піну):

1. На підприємствах енергетичного комплексу для гасіння пожеж електрообладнання під напругою:

– низький вміст рідкої фази у складі «сухої» КП дозволяє застосувати ПТЗКП для гасіння електрообладнання під напругою, за умови застосування запобіжних заходів і використання індивідуальних засобів захисту пожежного. При цьому дальність подачі струменя та гранична напруга, за якої допустиме використання, повинні бути визначені дослідним шляхом із подальшою сертифікацією ПТЗКП.

2. Використання ПТЗКП спеціального призначення із «сухою» піною, для захисту від теплового випромінювання і запалювання суміжних приміщень, стін та перекриттів, за рахунок здатності піни затримуватися на вертикальних поверхнях.

Доцільними є освоєння цієї нової технології та поступова модернізація існуючої власної протипожежної техніки, що забезпечить технологію отримання КП для використання підрозділами ДСНС України.

Доступні інформаційні джерела вказують на наявність різноманітних засобів пожежогасіння, які є в розпорядженні пожежно-рятувальних підрозділів інших країн світу. Зазначені засоби відрізняються один від одного за масогабаритними розмірами (від 50 до 300 кг) та способами доставки на місце події (причеп або пожежно-рятувальний автомобіль), і, як правило, мають такі складові частини: насос високого тиску, паливний бак, трубопровід високого тиску, спеціальний ствол, а також додатково можуть бути обладнані ємністю для зберігання вогнегасної речовини. Перевагами використання таких засобів є: швидка доставка до місця пожежі та їх розгортання, гасіння осередків пожеж у важкодоступних місцях, висока вогнегасна ефективність за малої витрати води тощо. Тому ми приділяли велику увагу саме технології отримання КП за допомогою малогабаритних установок пожежогасіння.

#### **4.2 Переваги застосування КП у порівнянні з водою та гелеутворюючими системами**

Застосування компресійної піни передбачається для гасіння твердих горючих речовин, які широко поширені в житлових будинках та побуті. З цієї причини порівняння вибраних вогнегасних засобів оцінювали в умовах житлового сектору.

Розглянемо можливі причини збитків від кожного з вогнегасних засобів:

Вода – найбільших збитків завдає під час її застосування у спорудах житлового сектору, а саме через низький коефіцієнт її використання безпосередньо під час гасіння пожежі, а також під час “проливання” конструкцій.

Гелеутворюючі системи – надмірний пролив вогнегасної речовини, який може призвести до значних збитків та затопленням суміжних та розташованих нижче конструкцій та поверхів, не спостерігається.

КП – за рахунок низького вмісту рідкої фази затоплення не характерне.

Щодо складності подавання засобів пожежогасіння:

Вода – є простою у застосуванні, не потребує додаткового протипожежного чи іншого обладнання для її подавання.

Гелеутворюючі системи – складність застосування полягає у необхідності використання двох ємностей з різними складовими та двох рукавів, для транспортування цих сумішей, з їх подальшим змішування між собою, з метою отримання ВР, яку можна застосовувати для гасіння пожежі. Застосування ГУС потребує суттєвої модернізації існуючої протипожежної техніки, наявної у підрозділах ОРС ЦЗ.

КП – відсутня необхідність використання додаткових ємностей, як у випадку з гелеутворюючими сполуками. Також транспортування готової КП відбувається по одному рукаву, що не є можливим для ГУС. Можливе використання протипожежного обладнання та пожежних автомобілів, які не потребують суттєвих конструктивних змін для їх подальшого використання з метою генерування і подавання КП, на відміну від ГУС.

### **4.3 Висновки**

1. З урахуванням особливостей парку протипожежної техніки оперативно-рятувальної служби ЦЗ України обґрунтовано необхідність розроблення неавтономного переносного модуля пожежогасіння та автономної переносної системи для генерування та подавання компресійної піни. Наведено основні конструкційні елементи, основні технічні характеристики та орієнтовану вартість таких технічних засобів пожежогасіння.

2. Визначено основні переваги застосування переносних технічних засобів генерування і подавання компресійної піни, а також основні напрями застосування ПТЗКП, залежно від типу піни, яку вони генерують.

3. Визначено основні переваги КП над водою та гелеутворюючими сполуками, за можливими причинами збитків та складністю подавання під час гасіння пожеж в умовах житлового сектору.

## ВИСНОВКИ

В монографії наведено результати розв'язання актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А за рахунок варіювання її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, використовуваного для її генерування. При цьому отримано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу методів гасіння пожеж класу А встановлено, що в наш час для гасіння таких пожеж у більшості випадків найбільш доцільно використовувати воду, яка є екологічно та фізіологічно безпечною речовиною, має невисоку вартість та характеризується високими показниками питомої теплоємності й питомої теплоти пароутворення, що дає змогу ефективно відводити теплоту від осередку пожежі. Водночас основним недоліком води як вогнегасної речовини є низький коефіцієнт її використання (близько 5 %), а решта води залишається надмірно пролитою. У світовій практиці поширення набула компресійна піна, яка має ряд суттєвих переваг, у порівнянні з водою та повітряно-механічною піною, зокрема характеризується високою адгезією до твердих поверхонь, що суттєво збільшує коефіцієнт використання водного розчину піноутворювача, з якого її одержано. Проте, незважаючи на значну кількість відомих пристроїв для подавання і генерування компресійної піни, відсутнє наукове обґрунтування щодо кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, за якого забезпечується найвища вогнегасна ефективність під час гасіння твердих горючих речовин.

2. Розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни. Модель дає змогу проводити технічний розрахунок параметрів системи для подачі компресійної піни в залежності від кратності піни, яку необхідно отримати, та дозволяє досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни. Математична модель враховує такі вхідні параметри для подальшого розрахунку, як тиск у системі, діаметри повітряного та рідинного сопел, температуру навколишнього середовища, діаметр та довжину камери змішування, діаметр та довжину рукава, яким рухається вже згенерована піна, діаметр та довжину ствола для її подавання.

3. Спроектовано та розроблено експериментальний зразок системи для подачі компресійної піни на основі розрахункових даних, отриманих за допомогою математичної моделі й аналізу існуючих систем для подачі компресійної піни, який дозволяє отримувати компресійну піну з робочим діапазоном кратності від 5 до 30. В системі використано оригінальний запатентований пінозмішувач коаксіального типу перемішування.

4. Проведено експериментальні дослідження впливу кратності та концентрації водного розчину піноутворювача «БАРС-S» у компресійній піні на її властивості та встановлено, що, на відміну від повітряно-

механічної піни, компресійна піна більшої кратності має більшу стійкість. Зокрема зі збільшенням кратності піни від 5 до 20 її стійкість підвищується з 4,5 хв до 21,8 хв, тобто майже уп'ятеро. Збільшення концентрації водного розчину піноутворювача «БАРС-S» від 4 % до 6 % супроводжується збільшенням стійкості компресійної піни, генерованої з нього, на 22 %, а зі змінюванням кратності піни в тих самих межах відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 14 %, що зумовлює збільшення тривалості її існування. Також виявлено (на прикладі піноутворювача «БАРС-S»), що у разі збільшення концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 % (концентрації, рекомендованої його виробником) відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 10 %, наслідком чого є утворення високодисперсної і більш стійкої піни. Встановлено, що за збільшення кратності піни її однорідність зростає, а саме в разі збільшення кратності від 5 до 12,5 відбувається зменшення діапазону діаметрів бульбашок на 66 %. Щодо подальшого більшення кратності до 20, відбувається зменшення діапазону діаметрів бульбашок майже на 80 %.

5. Експериментальним шляхом досліджено вплив концентрації водного розчину піноутворювача і кратності компресійної піни на її вогнегасну ефективність під час гасіння лабораторних (нестандартизованих) осередків класу А. Виявлено, що збільшення кратності піни з 15 до 25 зумовлює підвищення ефективності гасіння лабораторного осередку на величину до 60 %, в залежності від концентрації піноутворювача. Встановлено, що компресійна піна з найвищою вогнегасною ефективністю утворюється з водного розчину піноутворювача, концентрація якого дорівнює концентрації, рекомендованій для генерування повітряно-механічної піни з використанням штатних ежекційних стволів-генераторів. Це означає, що піноутворювачі загального призначення можна застосовувати для гасіння пожеж компресійною піною в тому самому порядку, в якому вони застосовуються для гасіння пожеж існуючою пересувною протипожежною технікою.

6. Проведено експериментальні дослідження щодо гасіння стандартизованого модельного осередку пожежі 1А водою (без функціональних добавок) та компресійною піною. Порівняно вогнегасну ефективність гелеутворюючих систем, компресійної піни та води. Встановлено, що найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння спостерігається для компресійної піни – вона становить  $14 \times 10^{-3}, \frac{M^2}{\text{кг} \times \text{с}}$ , що на 80 % більше, ніж у води, та на 15 % більше, ніж у гелеутворюючих систем.

7. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано та розроблено рекомендації щодо застосування систем генерування і подавання компресійної піни, які впроваджено в діяльність підрозділів ДСНС України.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шахов С.М., Виноградов С.А., Ларін О.М. Аналіз світових зразків систем пожежогасіння газонаповненою піною. *Надзвичайні ситуації. Попередження та ліквідація*. 2017. Вип 1. С. 50–58.
2. Shakhov S.M., Balaka N.I. Innovative technologies in firefighting: compressed air foam. *Technologie Informacyjne i innowacyjne w XXI wieku: mat. Międzynarodowa konferencja naukowa*. Poland : Katowice, 2019. P. 395–406.
3. Шахов С.М., Виноградов С.А., Присяжнюк В.В. Розробка системи пожежогасіння газонаповненою піною. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип 42. С. 12–21.
4. Шахов С.М. Використання статичних змішувачів у системах подачі компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. ІХ Міжнар. наук.–практ. конф., 18–19 трав. 2018 р. Черкаси : ЧПБ, 2018. С. 144–145.
5. Шахов С.М., Нікулін О.Ф. Функціонально-фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація* : матеріали наук.–практ. сем., 21 лют. 2019 р. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 285–287.
6. Шахов С.М., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А. Математичне забезпечення для проектування систем генерування компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020, т. 30, № 3. С. 111–115.
7. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchuk O.V. [Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems](#). *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54). P. 29–35.
8. Шахов С.М., Кодрик А.И., Виноградов С.А., Титенко О.М. Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация* : сб. материалов докл. VIII Междунар. науч.–практ. конф. Минск: НИИПБЧС , 2019. С. 107–119.
9. Шахов С.М., Виноградов С.А., Тітенко О.М., Кодрик А.І. Пінозмішувач для утворення компресійної піни: пат. 142507 Україна: МПК А62С 31/12, А62С 5/02, В05В 7/00. № у 2019 11826; заявл. 11.12.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11/2020.
10. Шахов С.М., Виноградов С.А. Пеносмеситель для генерации компрессионной пены. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы* : сб. материалов докл. XI Междунар. науч.–практ. конф. (8–9 апр., 2020 г.) Минск : УГЗ, 2020. С. 291–292.
11. Шахов С.М. Розробка експериментальної установки для проведення досліджень властивостей компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 185.

12. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Вплив кратності компресійної піни на дисперсність і стійкість. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 45. С. 27–33.
13. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Стилик І.Г. Визначення залежності характеристик компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. № 5. С. 103–106.
14. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею твердих горючих речовин. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 46. С. 199–205.
15. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення показника вогнегасної здатності компресійної піни. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. Вип. 47. С. 199–205.
16. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Порівняння вогнегасних показників компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. XI Міжнар. наук.– практ. конф., 09–10 квіт. 2020 р. Черкаси : ЧПБ, 2020. С.86–88.
17. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. The efficiency of the compressed air foam, water and gel extinguishing agent on the standard model fire class A. *Safety & Fire Technology*. 2020. Issue 1(56). P. 154–160.
18. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення найбільш ефективної вогнегасної речовини під час гасіння стандартних модельних осередків класу А. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки*: зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти. Рівне: НУВГП, 21–22 травня 2020. С 178–180.
19. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж. [Чинний від 2006-01-01] Держстандарт України. 7 с. (Інформація та документація).
20. Бобков С. А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. М.: АГПС МЧС РФ, 2014. 210 с.
21. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. 268 с.
22. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб.пособие. М.: ВИПТШ, 1980. 255 с.
23. Рашоян И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара : учеб.пособие. Тольятти: ТГУ 2013. 107 с.
24. Шрайбер Г. Огнетушащие средства. Химико–физические процессы при горении и тушении. М.: Стройиздат, 1975. 240 с.
25. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное изд.: в 2 книгах; кн. 1. М.: Химия, 1990. 496 с.



26. Баратов А. Н., Иванов Е. Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1971. 365 с.
27. Иванов Ю. И., Сараев С. П., Михайлов Ю. П., Ракитянская С. В. Пожарная безопасность. Кемерово: Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти, 2004. 190 с.
28. Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. Пены и пенообразователи для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М.: Пожнаука, 2005. 335 с.
29. Розенфельд Л.М. Физико-химия стойких воздушно - механических пен, применяемых в пожаротушении. М. 1941. 73 с.
30. Абрамов Ю.А., Гвоздь В.М., Тищенко А.М. Оценка влияния инерционных свойств систем автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой на время их тушения. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. Вып. 33. С. 3–8.
31. Абрамов Ю.А., Тищенко Е.А. Частотные характеристики объекта управления системы тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблеми пожежної безпеки* : зб. матеріалів доп. міжнародної науково-практичної конференції : Харків, 2016. С. 199–200.
32. Абрамов Ю.А., Тищенко Е.А. Моделирование процессов тушения пожаров класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности*. 2015. Вып. 37. С. 3–8.
33. Абрамов Ю.А., Садковой В.П. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой. Харків, 2010. 267 с.
34. Абрамов Ю.А., Бесараб С.Н., Садковой В.П. Условия и временные характеристики тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. Вып. 30. С. 3–7.
35. Абдурагимов И.М. [Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях](#). *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 2. С. 69–74.
36. Абдурагимов И.М. К [Проблеме тушения крупных пожаров твердых горючих материалов в зданиях](#) в черте города. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 2. С. 75–78.
37. Абдурагимов И.М. Несостоятельность идеи применения тонкораспыленной и «термоактивированной» (перегретой) воды для пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. Вып. 6. С. 53–58.
38. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. [Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях](#). *Вестник МГСУ*. 2011. Вып. 1. С. 331–335.
39. Корольченко Д.А. Изменение характеристик горючей жидкости при тушении тонкораспыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 5. С. 79–80.
40. Корольченко Д.А. Условие тушения горючих жидкостей распыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып 6. С 74–75.

41. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. [Влияние](#) дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Вып. 12. С. 69–73.
42. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. [Тушение горючих жидкостей распыленной водой](#). *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Вып. 11. С. 70–74.
43. Битуев Б.Ж., Воевода, А.Ф., Шароварников С.А. [О](#) влиянии жесткости воды на эффективность тушения пожаров смесевых топлив. *Технологии техносферной безопасности*. 2012. Вып 5. С. 1–75.
44. Ross R.H., Honkonen D.L., Salaymeb S.R. Water film thickness effect from automatic fire sprinklers. *Trans. Amer. Nucl. Socm.* 1991. V. 63. P. 18– 220.
45. Smith D.P. Water mist fire suppression system. *Fire Safety Eng.* 1995. V.2. № 2. P. 10–15.
46. Стась С.В., Яхно О.М., Гнатів Р.М. Врахування стисливості рідини за неусталеної течії в напірних трубопроводах систем пожежогасіння. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 3/7(75), 2015. С. 38–42.
47. Стась С.В. Анализ гидродинамических характеристик протока жидкости в специальных пожарных стволах и насадках целевого типа. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2009. Вип. 57. С 139–142.
48. Стась С.В. Аналіз системи генерування струминних потоків, що застосовуються в пожежогасінні. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. Вип. 63. С. 240–243.
49. Ольшанский В.П., Поляк Т.Ю., Чернуха А.А. Об одной задаче геометрического синтеза траектории пожарной гидравлической струи. *Проблемы пожарной безопасности*. 2005. Вып.17. С 147–153.
50. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2005. Вып. 4. С. 67–70.
51. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К моделированию падения испаряющейся капли диспергированного огнетушащего вещества. *Пожаровзрывобезопасность*. 2006. Том 15, №1. С. 141–148.
52. Виноградов А.Г., Яхно О.М., Дунюшкин А.В. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранированного теплового излучения. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2015. №1(31). С. 36–45.
53. Виноградов А.Г., Малигін Г.О. Екрануючі властивості водяних завіс: методика розрахунків і порівняння з експериментом. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2013. Вип. 15. С. 49–56.

54. Виноградов А.Г. Расчет конструктивных параметров противопожарных водяных завес. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. №3 (87). С. 61–74.
55. Роечко В.В. Анализ требований к комплексу средств пожаротушения автодорожных тоннелей. *Мир и безопасность*. 2004. Вып 6. С. 26–29.
56. Alfons R. Loschmittelwasser. Stuttgart, Berlin. 1997. P. 161.
57. Механизм тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах. Информационный сборник. М.: ЦНИИПО ГУПО. 1958. 75 с.
58. Брушлинский Н.Н., Мешалкин Е.А. Оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих материалов и веществ на открытом пространстве при использовании огнезащитных устройств. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. Вып. 3. С. 42–47.
59. Новожилов В. В. Численное моделирование струй распыленной воды. *Пожаровзрывобезопасность*. 2005. Вып. 11. С. 32–37.
60. Антонов Н.М. Характеристика пожарных ручных стволов типа ПС50, ПС70, КРБ и РСБ и водоизмерительных приборов : Информационный сборник. Пожарная техника. М: ГУПО ЦНИИПО, 1958. 45 с.
61. Бабенко В.С., Кремена А.П. Дальнобойность гидроимпульсной струи. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. Вып. 32. С.13–19.
62. Карпенчук И.В., Петуховский С.Г. Методы расчёта кавитационных сопел для получения мелкораспылённой воды или водного огнетушащего раствора. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2007. №2 (16). С. 162–169.
63. Душкин А.Л., Карпышев А.В., Сегаль М.Д. Оптимизация параметров потоков тонкораспылённых огнетушащих веществ. *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. №1. С. 39–44.
64. Роечко В.В. Уникальные свойства температурно активированной воды. *ЖПД*. 2009. №4. С. 20–22.
65. Мешалкин Е.А., Шевченко П.П. Состояние и перспективы разработок изделий для тушения тонкораспыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т.17, № 1. С. 68–75.
66. Данэнгадэр С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизм, особенности, перспективы. 1994. 40 с.
67. Chow W.K., Li Y.F. A review on studying extinguishing room fires by water mist. *J. Appl. Fire Sci*. 2002–2003. V.11, № 4. P. 367–403.
68. Карпышев А.В., Душкин А.А., Рязанцев Н.Н. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ. *Пожаровзрывобезопасность*. 2007. Т. 16, № 2. С. 69–73.
69. Дугин Г.С. Новые решения и оборудование для тушения пожаров. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2007. № 6. С. 68–73.

70. Храмов С.П. Вода для тушения пожаров. *Пожаровзрывобезопасность*. 2007. №16 (4). С. 72–75.
71. Повзик Я.С. Пожарная тактика: учеб. пособие. М.: Спецтехника, 2004. 416 с.
72. Абдурагимов И.М., Вильчковский С.К., Ринков К.М., Яворский Г.А. О повышении эффективности и коэффициента использования огне-тушащих составов при тушении пожаров ТГМ. *Труды ВИПТШ МВД СССР*. 1978. Вып. 3. 1012 с.
73. Тетерин И.М. Температурно–активная вода – новая парадигма развития техники пожаротушения. Индустрия безопасности [сайт]: *Средства спасения. Противопожарная защита [Интернет-журнал]*. 2005.
74. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Подслоное тушение. *Пожарное дело*. 1995. № 11. С. 40–41.
75. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах подачей пен в слой горючего. *Транспорт и хранение нефтепродуктов*. 1996. Вып. 8–9. С. 5–10.
76. Шароварников А.Ф., Ефимов А.А. Перспектива разработки и освоения «подслоного» способа тушения нефти и нефтепродуктов в резервуарах. *Пожаровзрывобезопасность*. 1992. №1. С. 62–67.
77. Казаков М.В. Применение поверхностно–активных веществ для тушения пожаров. М.: Стройиздат, 1997. 80 с.
78. Казаков М.В., Билкун Д.Г., Моисеенко В.М., Пешков В.В. Огнетушащие свойства пен низкой и средней кратности из пенообразователей различных типов. *Пожаротушение: сб. науч. тр.* М.: ВНИИПО МВД СССР. С. 10–15.
79. Пешков В.В. Водопенные средства тушения. *Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны*. М.: ВНИИПО МВД России. 1997. С. 362–373.
80. Пешков В.В., Цариченко С.Г. Пенообразователи для тушения пожаров. *Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России*. М.: ВНИИПО. 2007. С. 281–289.
81. Пешков В.В., Крылова Г.С. Применение синтетических пенообразователей для тушения авиационного топлива. *Пожаротушение: сб. науч. тр.* М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. С. 79–82.
82. Parsons P.L. Foam tests on petrol tray fires. *Fire Eng. J.* 1982. 42, №125, 32 p.
83. Ryderman Anders. Testing of foam as a fire extinguishing medium for polar. *Fire*. 1975, № 2, p. 35–41.
84. Oil Tank Fire Extinguishing. *Fire*. October, 1960, № 109, p. 1–43.
85. R. J. French. P. L. HinkPey and P. Nash. Foam extinguishing liquid fire. *Fire*. 1958. March, № 50, p. 585–594.
86. Comparative tests on liquid fuel fires. *Fire International*. 1968, September, № 121, p. 65–79.
87. Pozarnik. 1984. V. 61 № 21, p. 15.

88. Pinuela de Pablos N.A. Eficacia de los agents extintores Instalador 1987. P. 33-35.
89. Иагата К. Пены. Касай, 1987, V. 37 № 1, p. 43–46.
90. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пена и пенные пленки. М.: Химия. 1990. 402 с.
91. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: Калан, 2002. 448 с.
92. ДСТУ 3789:2015. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 67 с.
93. Котов А.А., Петров И.И., Реутт В.Ч. Применение высокократной пены при тушении пожаров. М.: Стройиздат, 1972. 114 с.
94. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («ПІНА – К»). К.: УкрНДІЦЗ, ДСНУ України, Звіт про науково-дослідну роботу. 2018. 259 с.
95. Авакимов С.С, Белов В.П., Бушуй М.И. Справочник по противопожарной службе гражданской обороны. М.: издательство Мин. обороны СССР, 1982. 152 с.
96. Compressed Air Foam System: веб-сайт. URL: <http://compressedairfoamsystem.com> (дата звернення: 30.12.2018).
97. Ларін О.М., Виноградов С.А., Баркалов В.Г. Пожежні машини. К.: МПБП «Гордон», 2016. 279 с.
98. Colletti, D. J. Compressed–air foam mechanics. *Fire Engineering*. 1994. 147. p. 61–65.
99. CAFS. Straight answers for the beginner or the expericienced user: веб-сайт URL: <http://www.cafsinfo.com/index.html> (дата звернення: 30.12.2018).
100. Robert G. Taylor. Technical Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions. *Report 98*. Morristown Fire Bureau –Morristown, New Jerseyю 1998. P. 75–112.
101. Colletti, D. J. Class A foam for structure firefighting. *Fire Engineering*. 1992, 145. P. 47–56.
102. NFPA 1145. Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting. 2011. P. 1–34.
103. CAFS веб-сайт URL: <https://tcesd5.org/articles/> (дата звернення: 20.12.2019).
104. Кректунов А.А., Платонов Е.Ю., Торопов С.В., Хабибулин А.Ф. Использование компрессионной пены при тушении лесных пожаров. *Аграрное образование и наука*. 2016. №2. С. 16–23.
105. Залесов С.В., Годовалов Г.А., Кректунов А.А., Оплетаев А.С. Новый способ создания заградительных и опорных противопожарных полос. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2014. № 3. С. 90–94.
106. Colletti, D. J. Compressed air foam systems and fire hose. *Fire Engineering*. 1996. P. 50–52.

107. BAO Zhi-ming, CHEN Tao, Fu XUE-cheng, ZHANG Xian-zhong, WANG Rong. Study of Performance of Class A Foam used for Liquid Hazard Fire Protection and Foam Stability Mechanism. *The National Dangerous Substances and Security Emergency Symposium*. 2011. P. 41–43.

108. Li Huiqing. Experimental study of foam generated by compressed air foam system. *Beijing: Beijing Forestry University*. 2000. P. 105–111.

109. Compressed air foam systems. Patent No.: US 6,357,532 B1; Date of Patent: Mar. 19, 2002. Michael A. Laskaris; Michael Sulmone. P. 1–7.

110. Compressed air foam generator. Patent No.:US 6276459 B1; Date of Patent: Aug. 21, 2001. Bradford James Herrick, Mark D. Baxter. P 1–6.

111. Chu Yingxia. A Experimental study on The Dependent Relationship of Flow Parameters and foam Pattern in CAFS. *Beijing: Beijing Forestry University*. 2005. P. 31–35.

112. Lin Lin. Property characterization and fire extinguishing efficiency study of the multi-component compressed air foam. *Beijing: University of Science and Technology of China*. 2007. P. 164–168.

113. Tafreshi A.M., Marzo M, R. Floyd R, Wang S. FIRE PROTECTION FOAM THERMAL PHYSICAL PROPERTIES. *Maryland: NIST*. 1998. P. 1–8.

114. Xue Lin. Water-saving and high efficiency firefighting equipment and application technology research. Shanghai: *Shanghai Fire Research Institute*. 2008. P. 25–31.

115. Алексеев К.О. Гидродинамика потока в статических смесителях насадочного типа: дис. канд. техн. наук: 05.17.08, КНИТУ. Казань, 2016. 167 с.

116. Богданов, В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.

117. Myers K.J., Bakker D., R. Avoid agitation by selecting static mixers. *Chem Eng Prog*. 1997. V.6. P.28–38.

118. Фарахов Т.М. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа. Маслообменные характеристики нерегулярной насадки Инжехим.

119. Comax products веб-сайт URL: <https://komax.com/product-category/static-mixers/> (дата звернення: 11.08.2020).

120. Taysher W., Mathys P. Paper presented at the first European Conference of Mixing and Centrifugal Separation, Cambridge, England, September 9-11 – 1974.

121. Ковалишин В.В., Грушовіччук О.В. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності піни різної кратності, генерованої з 6% розчину піноутворювача «альпен». *Пожежна безпека: теорія і практика»* 2015. №19. С. 42–48.

122. Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б., Грушовіччук О.В. Експериментальні дослідження процесу взаємодії струменів повітряно-

механічної піни різної кратності під час їх польоту. *Пожежна безпека*. 2018. №32. С. 32–38.

123. Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б. Перспективи гасіння пожеж водопінними вогнегасниками. *Пожежна безпека*. 2017. Вип 31. С. 49–58.

124. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Присяжнюк В.В. [Розроблення експериментального лабораторного зразка системи пінного пожежогасіння, що споживає стиснене повітря \(CAFS\)](#). *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2018. № 2 (6). С. 27–41.

125. Мороз О.І., Кодрик А.І., Нікулін О.Ф., Тітенко О.М. Матеріали 20-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку». 2018. С. 320–324.

126. Боровиков В.А., Слуцкая О.М. Совершенствование методов испытаний и нормативной базы по оцениванию показателей качества пенообразователей для тушения пожаров в Украине. [Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация](#). 2017. №2(42). С. 5–15.

127. Боровиков В.О., Слуцька О.М. Про необхідність удосконалення нормативних документів щодо протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2014. № 2 (30). С. 93–98.

128. Боровиков В.О., Слуцька О.М. Щодо визначення ефективності піноутворювачів у разі гасіння моторного пального з полярними добавками *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* 2017. № 1 (3). С 78–83.

129. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Функціонально–фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 7. С. 163–166.

130. Кодрик А.І., Тітенко О.М., Куртов О.В. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. Вип. 7. С. 54–62.

131. Vinogradov S., Kodrik A., Titenko O. [Consideration of Thermodynamic Processes Formation of Compressed-Air Foam in Design Compressed Air Foam Systems](#) Materials Science Forum 1006. P. 1–11.

132. Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Проектування систем компресійної піни з урахуванням процесів її формування. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2020. С. 192–193.

133. Carey W.M. National class A foam research project technical report: Structural fire fighting–room burn tests phase II. *MA: National Fire Protection Research Foundation*. 1994. P. 33.

134. Liebson, J. Introduction to class A foams and compressed air foam systems for the structural fire service. *MA: International Society of Fire Service Insulators*. 1991. P.41–45.

135. Грачулин А.В., Камлюк А.Н., Навроцки О.Д., Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. №1. С.44–53.
136. Алешков М.В., Емельянов Р.А., Колбасин А.А., Федяев В.Д. Условия применения современных технологий пожаротушения для ликвидации пожаров электрооборудования под напряжением. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Вып. 25(6). С. 12–16.
137. Crampton G., Kim A. Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Sopution. *Research Report*. 2007. 147 P. 1–25.
138. Dong–Ho R., Jang–Won L., Seonwoong K. Class B Fire–Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Differen Air–to–Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. *Applied Science*. 2016. Vol. 6 (191). P. 2–12.
139. Wang X., Liao Y., Lin l. Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi–component compressed air foam. *Chinese Science Bulletin*. 2009. Vol. 54. Issue 3. P. 492–496.
140. Jing–yuan C., Mao X. Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*. 2014. № 71. P. 44–56.
141. William L., San J. Properties of compressed air foam. *County Fire District. Friday Harbour*. 2001. №3 P. 13–19.
142. Grady C., Lafferty R. How high can you pump wildland firefighting foam. *Foam applications for wildland and urban fire management*. 2007. №1. P. 27–35.
143. Dhruvad P. 2017. Experimental study of pressure drop an bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system. 2017. P. 1–135.
144. Oneseven: веб-сайт. URL: <http://www.oneseven.com> (дата звернення: 30.12.2018).
145. Systeme: einfach, sicher und okonomisch: веб-сайт. URL: <http://www.oneseven.com/de/stationaerbrandschutz/systeme/standardsystem/beschreibung.php> (дата звернення: 30.12.2018).
146. Leistungsstark. Einfach. Sicher : веб-сайт. URL: <http://www.rosenbauer.com> (дата звернення: 27.11.2018).
147. CAFS–Systems : веб-сайт. URL: <http://www.waterousco.com/cafs-systems> (дата звернення: 27.11.2018).
148. Firefighting Vehicles : веб-сайт. URL: <http://www.gimaex.com>. (дата звернення: 27.11.2018).
149. Products: веб-сайт. URL: <http://kssieler.de/hale/cafs> (дата звернення: 27.11.2018).
150. Описание технологии NATISK : веб-сайт. URL: <http://www.specialauto.ru/catalog/524.html> (дата звернення: 27.11.2018).



151. Оборудование пенного пожаротушения : веб-сайт. URL: <http://www.stalt.ru/en/products/sistema-pennogopozharotusheniya.html> (дата звернення: 27.11.2018).
152. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1979. 824 с.
153. Кутателадзе С.С., Стыркович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: «Энергия» 1976. 143 с.
154. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О. Штейнберга, 3-е изд., перераб. и доп.-М.; Машиностроение, 1992. 672 с.
155. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Гостоптехиздат, 1961. 848 с.
156. Feng D. Analysis on Influencing Factors of the Gas-liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems. *Procedia Engineering*. 2013. №52 P. 105 – 111.
157. ДСТУ ГОСТ 8.003:2008 Метрологія. Мікроскопи інструментальні. Методи і засоби перевірки. Київ. Дата початку дії 01.10.2008. Дата прийняття. 25.06.2008
158. Виноградов А.Г., Огурцов С.Ю., Дунюшкин А.В., Бенедюк В.С. Экспериментальное исследование экранирования теплового излучения распыленной водой. *Науковий вісник УкрНДПБ*. 2014. №2(30). С. 99–108.
159. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
160. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических условиях. К.: Техника, 1975. 168 с.
161. Изаков Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка данных. Челябинск: ЧГАУ, 1997. 128 с.
162. Закгейм Д.А. О некоторых рекомендациях при планировании эксперимента. Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях. 1974. 25 с.
163. Тихомиров В.Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов. М.: Легкая индустрия, 1968. 262 с.
164. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. К.: Вища школа, 1976. 184 с.
165. Vox G.E.P., Wilson K.B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1951. № 1. P. 1–45.
166. Усовершенствованная технология создания пены со сжатым воздухом: пат. 2456037 RU; заявл. № 2008151529\12, 24.04.2018; опубл. 20.07.2012.
167. Антонов А.В., Боровик В.О., Орел В.П. Вогнегасні речовини. К.: Пожінформтехніка. 2004. 176 с.
168. ДСТУ 2272. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. К.: Держстандарт України. 2006. 32 с.

169. Абрамов А.А., Степаненко С.Г., Шкоруп А.И. Параметры горения модельного очага пожара класса А. *Средства порошкового пожаротушения*. 1992. С. 3–5.
170. Шкоруп А. И., Степаненко С. Г., Волошаенко А. И. Особенности тушения очагов пожаров классов А и В в лабораторных условиях. *Средства порошкового пожаротушения*. 1992. С. 119–125.
171. Кустов М.В., Калугин В.Д. Повышение огнетушащей эффективности истинных растворов с помощью добавок электролитов. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. №.24. С. 38–43.
172. ДСТУ 3675–98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. К.: Держстандарт України, 1999. 33 с.
173. Савченко О.В., Киреев О.О. Оптимізація кількісного складу гелеутворюючої системи для гасіння пожеж об'єктів житлового сектору. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. Вып. 25. С. 162–166.
174. Савченко О.В. Експериментальне визначення вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворювальної системи  $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,95 \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ . *Пожежна безпека*. 2010. Вип. 16. С. 109–114.
175. Савченко О.В., Кіреєв О.О., Островерх О.О. Визначення показника вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворюючої системи  $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,95\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  на стандартизованому модельному осередкові пожежі. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. Вып. 29. С. 149–155.

## ДОДАТКИ

Додаток А

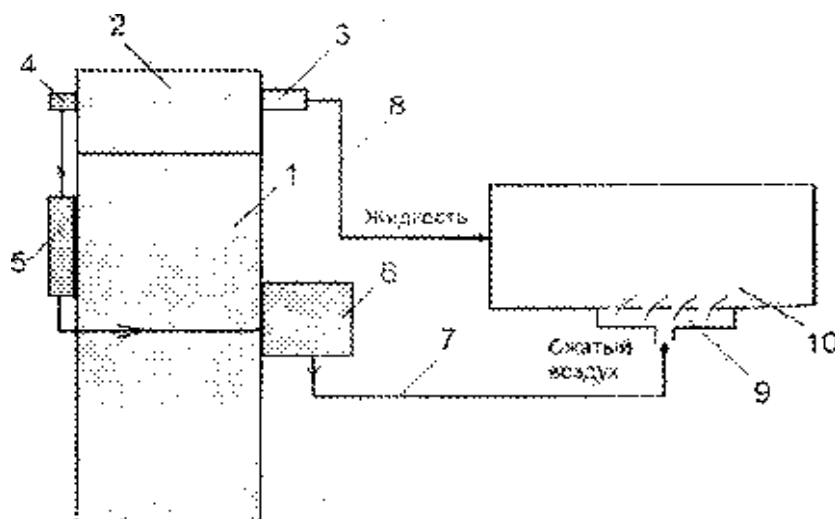
### Аналіз патентних джерел систем генерування та подавання компресійної піни

Патентні дослідження проводилися з метою встановлення тенденцій технічного розвитку в напрямку отримання і використання КП. Для проведення патентного пошуку використовувалися дані серверів United States patent and trademark office, Європейського патентного відомства.

Розглядалися шляхи можливої модернізації існуючих пожежних машин (складаються тільки з компресорної установки та дозволяють приєднати піно генеруючу систему зі стисненим повітрям до вже існуючого пожежного обладнання із системою пінного дозування), переносні та пересувні установки для створення КП, обладнання для змішування компонентів КП, способи її вироблення, дозування компонентів та подачі КП до осередку пожежі.

Патент RU 2481873 відноситься до переносних установок пожежогашіння (мобільний вогнегасник). Вказана установка являє собою вогнегасник закачаного типу. Вогнегасник заповнений негорючою рідиною, із запірно-пусковим пристроєм ручного типу і системою подачі рідини з піногенератором. Додатково містить систему подачі газу, яка включає в себе мікровимикач, встановлений на запірно-пусковому пристрої таким чином, що під час пуску вогнегасника одночасно включається компактний компресор, що працює від переносного акумуляторного блока. Технічний результат - підвищення ефективності гасіння пожеж різних класів за рахунок використання високократної повітряно-механічної піни. Робоче креслення мобільного вогнегасника наведено на

Рис. А.



Фиг. 1

### Рис. А.1 – Робоче креслення мобільного вогнегасника

Патент RU 2508143, в рефераті йде мова про мобільну установку пожежогасіння, що являє собою вогнегасник закачаного типу, заповнений негорючою рідиною, із запірно-пусковим пристроєм ручного типу і системою подачі рідини з піногенератором. Додатково містить систему подачі газу (повітря), яка включає в себе мікровимикач, встановлений на запірно-пусковому пристрої таким чином, що під час пуску вогнегасника одночасно включається компактний компресор, що працює від переносного акумуляторного блока. Причому піногенератор містить розпилювач, пінну насадку і розсікач двофазного потоку; розпилювач з'єднаний з корпусом пінної насадки. На корпусі пінної насадки в частині, розташованій ближче до розпилювача, виконані три вікна для ежектування повітря, а на виході закріплений розсікач двофазного потоку, виконаний у вигляді круглої сітки; корпус розпилювача виконаний з каналом для підведення рідини і має співосну, жорстко пов'язану з корпусом втулку із закріпленим в її нижній частині соплом.

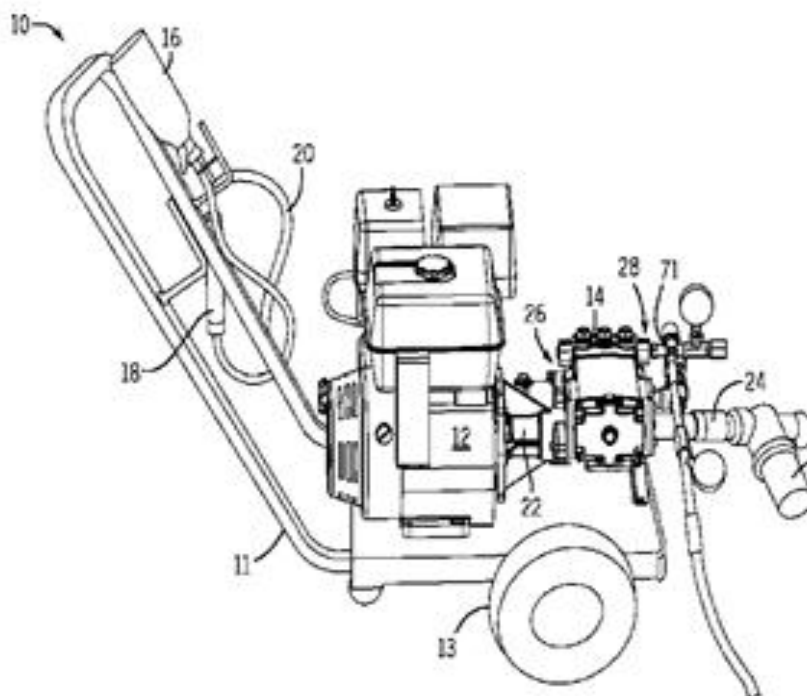
Патент RU 2552860, в рефераті йде мова про засіб гасіння пожеж за допомогою газомеханічної піни. Генератор високократної піни для пожежогасіння має послідовно сполучені один з одним розташовані співосно стосовно загальної осі забірник навколишнього повітря, першу камеру змішування, сепаратор, кільцеву розподільну камеру, для газоподібного компонента, другу камеру змішування, а також вихідний патрубок із піноформуєчим сітчастим елементом. В боковій стінці першої камери змішування зроблений один отвір для підводу до її порожнини стиснутого газу або газової суміші. У вихідній зоні першої камери змішування і співосно їй розміщений обтічник, виконаний у вигляді тіла обертання. Кільцева розподільна камера включає в себе кожух, який має повздовжні щілинні отвори, що розташовані рівномірно. В результаті підвищується надійність роботи генератора високократної піни для пожежогасіння за рахунок запобігання забиванню піноформуєчого сітчастого елемента дисперсними частинками, які утворюються під час горіння продуктів.

Патент US 2009014186, в рефераті йде мова про винахід, який відноситься до засобу пожежогасіння. Система, що є достатньо компактною і портативною, щоб переміщуватись по спрямувальній опорній платформі дизельного транспортного засобу, що має активну здатність насоса і рухомого засобу з передніми і задніми гідравлічними приводами, такими як Bobcat Toolcat Turbo 5600. Система містить водяну цистерну, зазвичай на 150 галонів (1 галон  $\approx$  4 л, прим. переклад.) та бак із піноутворювачем. Ця система приводиться в дію гідравлічною системою базового транспортного засобу, яка активує гідравлічний двигун на системі. Гідравлічний двигун системи обертає ремінь із достатньою кількістю оборотів за хвилину для приведення в дію водяного насоса, повітряного компресора і модуля системи генерування піни стисненим повітрям (CAFS). Викорис-

товуючи винятково потужність від гідравлічного двигуна, вода витікає із цистерни, що використовується або самостійно, або змішується з піною у процентному відношенні, яке задає користувач. Додається стиснуте повітря і саме повітря, сама вода або суміш води з піною направляється через регульовальний клапан або в 1-дюймовий (2,54 см) пожежний рукав, або в напівжорсткий рукав, що закінчується регульованою рухомою насадкою, що кріпиться до даху базового автомобіля.

У патенті US 20110226494, в рефераті йде мова про винахід, який відноситься до автономної системи пожежогасіння для використання з джерелом води. Система пожежогасіння може включати в себе двигун, насос, пінний резервуар, витратомір і клапан регулювання піноутворювача. Витратомір може бути витратоміром різної площі та вказувати на миттєву концентрацію розчину «вода-вспінювач». Регулюючий клапан для утворення піни може бути голчастим клапаном. Головний інжектор можна під'єднати до насоса. Головний інжектор забезпечує змішування піноутворювача з водою всередині насоса для утворення водяного розчину. Система пожежогасіння може також включати у себе вузол змішувального клапана на вході та розвантажувальний клапан для рециркуляції водяно-пінного розчину, як це зображено на рис. А.2.

Піна (CAF) використовується для гасіння пожеж і звичайно складається з комбінації води та концентрату пін, змішаного повітря для утворення пінорозчину. Якість і консистенція CAF залежать від достовірності змішування розчину повітря і піни та структури пазирків піни CAF, утвореної у змішувальній установці, перед її подачею на об'єкт гасіння.



## Рис. А.2 – Автономна система пожежогасіння

Спочатку способи та пристрої для змішування об'ємного повітря та пінного розчину подавали в реакційну камеру через так звані трубки Піто (радіально або тангенціально) в один отвір через клапани, фітинги або трубки, крізь які протікає розчин пін. За умов такої крапкової подачі стиснене повітря нерівномірно розподіляється всередині розчину піни, а отримана структура міхурів САФ є невідповідною. Статичні змішувачі або скрубери, які складаються з ряду пластин, перфорованих пластин або дисків або інших неорганізованих форм, звичайно розміщуються після місця введення повітря, що може порушити траєкторію потоку і викликати турбулентність, у разі подальшого змішування розчину сухого повітря та пін. В той час, як це порушення потоку покращує змішування і утворення плівок САФ, втрата на тертя через пристрій збільшується, що зменшує тиск потоку САФ, тим самим обмежуючи радіус дії піни зі ствола. Нижче надані патенти, в яких пропонуються варіанти конструкцій, які спрямовані на покращення змішування води, піноутворювача та повітря.

У патенті US 5255747 А1 пропонується система подачі стисненого повітря і піни для отримання першого потоку, що повинен аерувати піну. Система включає в себе пожежний насос, повітряний компресор та здійснює подачу через сопло Вентурі й систему автоматичної підтримки необхідного співвідношення повітря і води, що подають через сопло Вентурі у пристрій подачі пожежного потоку. Аналогічні принципові пропозиції викладені також і в патенті US 2493982 (рис А.3.)

У патенті WO 2014047456 А3 пропонується насадка для нанесення піни, що зазвичай використовує змішувальний редуктор, який має зазвичай порожній корпус із вхідним отвором і протилежним рознесеним вихідним отвором. Напірний струмінь води направляєється у вхідний отвір, створюючи область низького тиску на вхідному отворі, яка діє, щоб доставити спінений розчин, який з'єднаний з тілом, у вхідний отвір. Розчин піни змішується зі струменем води в корпусі змішувача, змішаний розчин пінної води викидається з вихідного отвору під тиском струменя води. Винахід забезпечує ефективний спосіб і пристрій для боротьби з пожежами в обмеженому просторі. Перш за все це пов'язано з пожежами вугільних шахт, але слід розуміти, що описаний тут спосіб і пристрій є ефективним і для боротьби з іншими видами пожеж у замкнутих просторах, таких як, наприклад, підвальні та тунельні пожежі, гасіння резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Спосіб включає стадії дозування пінного концентрату в негорючу рідину з утворенням піноконцентрату / рідкої суміші і створення потоку текучого середовища піноконцентрату / рідкої суміші. Азот вводиться в потік пінної рідкої суміші, щоб ініціювати утворення піни з розширенням її азотом. Розподільчий потік, що несе спінену піноутворюючу масу, завершує повне розширення тільки після контакту з азотом, а далі відбувається подавання в обмежену зону, залучену в полум'я,

тим самим гасячи вогонь і практично закриваючи контакт між горючим матеріалом, який бере участь у пожежі, і навколишньою атмосферою та істотно знижує небезпеку вибуху або спалаху.

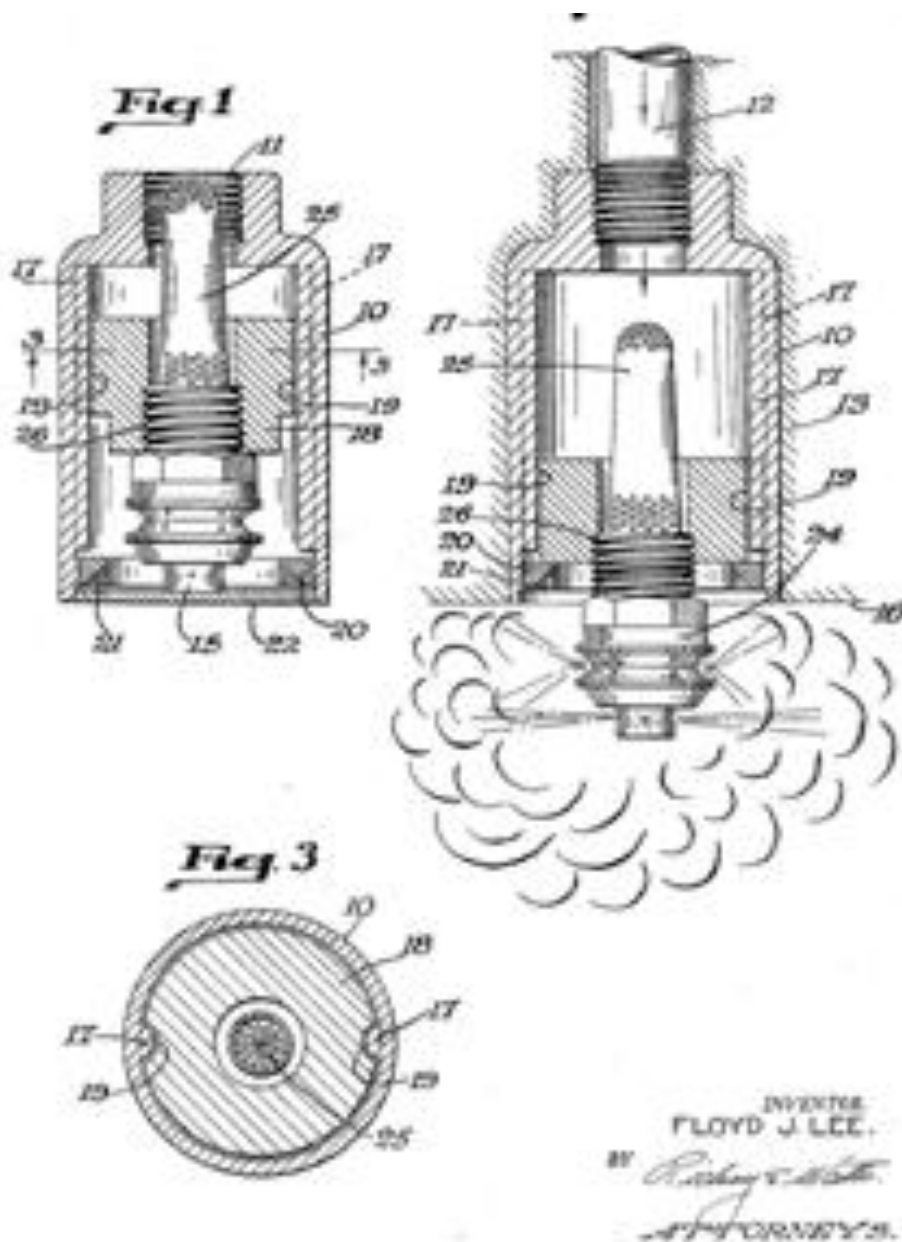


Рис. А.3 – Схема реалізації рішення до Патенту US 2493982

Пристрій пристосований для розширення і видачі піни, містить корпус, який визначає внутрішній простір, через який проходить випускна лінія. Краї корпусу закриті навколо кінців нагнітальної лінії, а кінці випускної лінії проходять за кінці корпусу, щоб утворити з'єднання на одному кінці для прийому потоку піноутворювача / рідини, а на протилежному кінці знаходиться дозуючий кінець пінопристрою.

Частина нагнітальної лінії в корпусі визначає змішувач для введення газу, що розширюється в потоці піноутворювача / рідини, що протікає через лінію нагнітання. Схема на рис А.4. (фіг.1 та 2 ) пояснює вищенаведене.

Патенти WO2017078951A1 та US20080245282A1 вирішують питання подавання піни на палаючу поверхню. Наприклад US20080245282A1 являє собою дисперсійно - аераційний пристрій, що містить соплову частину (11), що має перший канал (14), який має, щонайменше, один впускний отвір (15) і, щонайменше, один випускний отвір (16) для першого текучого середовища, і другий канал (17), що має, щонайменше, один вхідний отвір (18) і, щонайменше, один випускний отвір (19) для другого матеріалу, перші виходи (16) для подачі розташовані так, що перше текуче середовище змішується з другим матеріалом при виході з другого випускного отвору (19) для аерації та диспергування другого матеріалу в заданому напрямку.

Патент WO2017078951 A1 також у цілому відноситься до змішувачів для використання в системі подачі стисненого повітря і піни (CAF) для гасіння вогню. Відмінністю є те, що впускний колектор стисненого повітря має безліч бічних сторін, які мають безліч отворів, розташованих щонайменше на одній з бічних сторін. Трубка промивного колектора проходить у змішувальну камеру для утворення кільцевої області потоку в камері змішувача. Труба промивного колектора має безліч отворів, розподілених навколо зовнішньої периферії промивної колекторної труби. Внутрішня колекторна труба – всередині промивної труби. Випускний патрубок для стисненого повітря оперативно з'єднаний із промивною колекторною трубою.

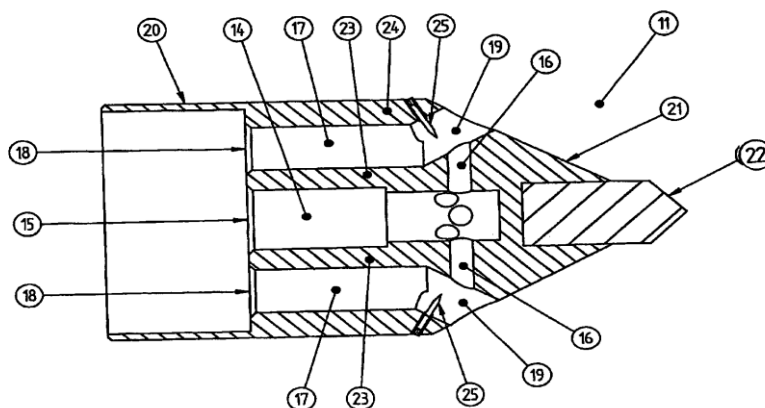


Рис. А.4 – Принципові пояснювальні схеми до патенту US20080245282A1

У патенті DE 2925528 CD розвантажувальний отвір нагнітального насоса сконструйовано у вигляді розпилювального сопла перед дзвіно-подібним корпусом. На відстані від переднього розпилювального сопла розміщують екран, на який спрямовано йде струмінь із розпилювального сопла. Розмір осередків сита складає 0,074–0,25 мм. Внутрішній діаметр корпусу більше діаметра розпилювача, так що на частину екрана не впливає розпилювальний струмінь. У вільні отвори екрану подають повітря, що потрібно для утворення піни.



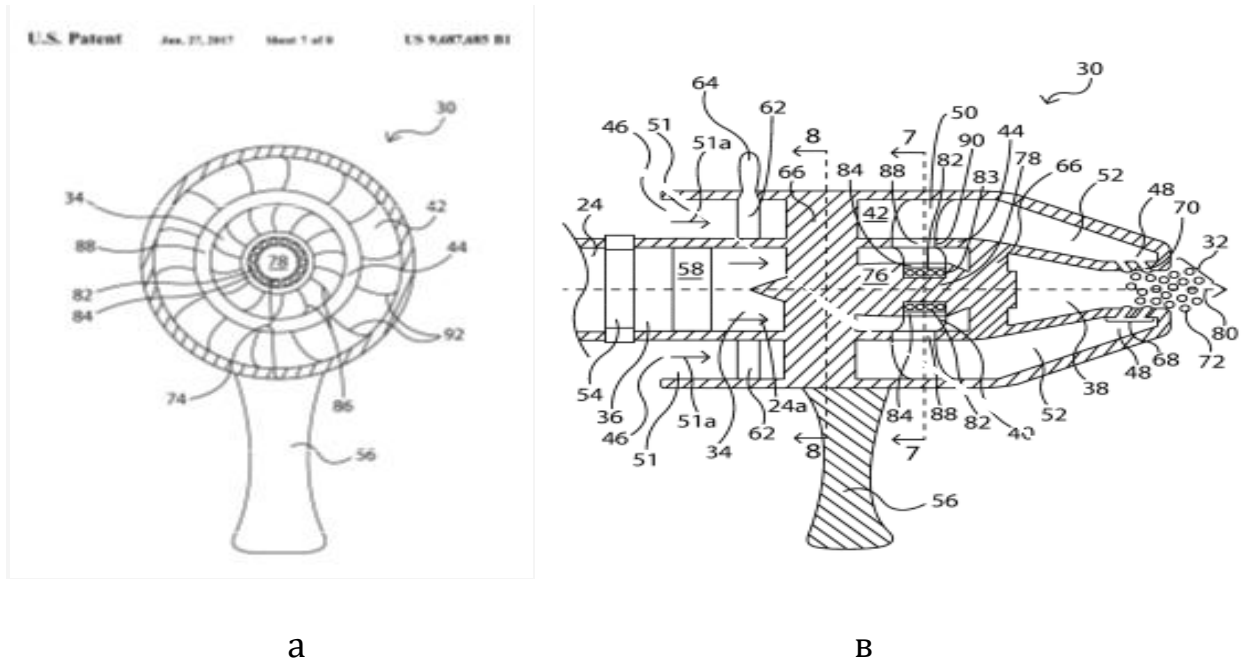
У патентах AU 470144 В і AU 623537 для спінювання рідко-повітряної суміші пропонується використовувати кілька екранів із різними розмірами осередків, які розміщують у каналі для спінювання рідко-повітряної суміші. У кращому варіанті здійснення екран має розмір осередку менше 0,07 мм, зазвичай розмір осередку 0,036 мм або менше. З таким ситом може бути отримана піна дуже доброї якості. Можна організувати кілька екранів поспіль. У розпилувальній голівці можна розташувати один за одним безліч сит.

У патенті WO1993013829A1 запропоновано пристрій для отримання піни, в якому спінена повітряно-рідка суміш пропускається до того, як вона досягає сита, через елемент, що містить перфорацію, щоб забезпечити однорідний розподіл повітря, захопленого піною. Пристрій пропонує розпилення піни, за допомогою якого може бути виготовлена тонка піна з рівномірним розподілом повітря. Зокрема передбачено, що розсікаючий елемент є дисковим або має перфорації, а нижня поверхня елемента відкрита з одного боку порожнього циліндра. Поперечно розташовані отвори в елементі можуть бути прорізами, або перфорованими, або мати будь-яку іншу геометрію. Переріз кожної з перфорацій має бути переважно 0,20 мм<sup>2</sup>. Зокрема загальна площа поперечного перерізу отворів  $1/18 - 1/22$ , переважно  $1/20$  поверхні диска і нижньої поверхні циліндра. Кількість отворів може бути, наприклад, 12. Відповідно до іншого варіанта пропонується, щоб камера змішувача в напрямку сідла клапана, мала продовження у вигляді порожнього циліндра, закритого дисковим елементом або нижньої поверхнею, яка є концентричною до отвору розпилувальною голівкою, в якій, щонайменше, розташовані сита, елемент для змішування і екрани виконані з тканини, Faserge або обплетення (можливе використання пемзи). Рішення забезпечує змішування суміші рідина-повітря до досягнення екрана, а у пристрої, що містить раніше захоплене повітря з рівномірним його розподілом за розмірами, утворюється піна.

Патент WO 2014047456 A2. Одним з аспектів зазначеного винаходу є сопло для нанесення піни, яке включає в себе порожнистий корпус зі змішувачем, розташованим у корпусі, який утворює випускную камеру. Впускний отвір змішувача і протилежний випускний отвір для ежектора пов'язані по текучому середовищу з камерою випуску. Безліч струменевих впускних отворів проходить у стінку корпусу, впускні отвори для струменів, що закінчуються в реактивних портах, які пов'язані по текучому середовищу з камерою випуску. Впускні отвори для струменів сконфігуровані для прийому заданої частини рідини під тиском, причому частина, що виходить через порти струменя, зазвичай знаходиться в напрямку випускного отвору змішувача, створюючи вакуум у випускній камері. Вакуум сконструйований таким чином, щоб вводити розчин піни у вхідний отвір змішувача, змішуючи розчин піни з вищезгаданою час-

тиною під тиском текучого середовища у випускній камері з утворенням пінної суміші.

У патенті US 9687685 В1 (рис А.5) пропонується вирішення питання щодо ефективного змішування двокомпонентної суміші (рідина та повітря) за рахунок організації їх переміщення по спіральній траєкторії з використанням різниці тиску у внутрішньому та зовнішньому каналах.



**Рис. А.5 – Пристрій для створення піни за допомогою стиснутого повітря, патент US 9687685**

Пристрій для створення піни за допомогою стиснутого повітря для гасіння вогню. Пристрій може бути прикріплений до стандартних джерел води під тиском, які використовуються для боротьби з пожежами. Пристрій містить водяну камеру, прилеглу до повітряної камері з перегородкою. Водяна крильчатка знаходиться, щонайменше, частково всередині водяної камери, і повітряна крильчатка знаходиться, щонайменше, частково всередині повітряної камери. Вода під тиском управляє крильчаткою, яка, у свою чергу, з'єднана з приводом повітряної крильчатки. Повітряне робоче колесо всмоктує повітря в повітряну камеру і стискає повітря. Потім повітря проходить через сопло в перегородці для аерації джерела води, що містить пінні розчини, для утворення піни стисненого повітря. Піна стисненого повітря виходить із пристрою зі швидкістю, щоб покрити вогонь, який повинен згаснути.

В патентах US 6086052, а також у патентах US 6138994, US 6217009, US 5837168 пропонуються пристрої для отримання піни за допомогою розташування у реакторах змішування пластин різних конструкцій. Наприклад, у US 6086052 (рис А.6.) пристрій для отримання піни для вико-

ристання під час гасіння пожеж, що має дві пластини, розміщені в камері, які відповідно вводять повітря під тиском і розчин води / поверхнево-активної речовини між двома пластинами, де утворюється піна і викидається з отвору на стороні камери. Вода під тиском / мильний розчин надходить у камеру через отвір в одній пластині. Повітря під тиском надходить у камеру через кілька каналів, просвердлених через іншу пластину, яка обмежує вхідний отвір для води. Пластини забезпечені поверхнями, які зібрані разом, утворюючи між ними обмежену зону. Обмежена зона врівноважує тиск між водою і вхідним повітрям, досягаючи рівноваги на деякому певному радіусі з центру двох пластин. Цей рівноважний радіус переміщається всередину і з центру в міру необхідності, щоб збалансувати два тиски. Пристрій також включає в себе систему регулювання тиску, яка автоматично відключає потік стиснутої води і повітря в разі відключення дозуючого сопла.

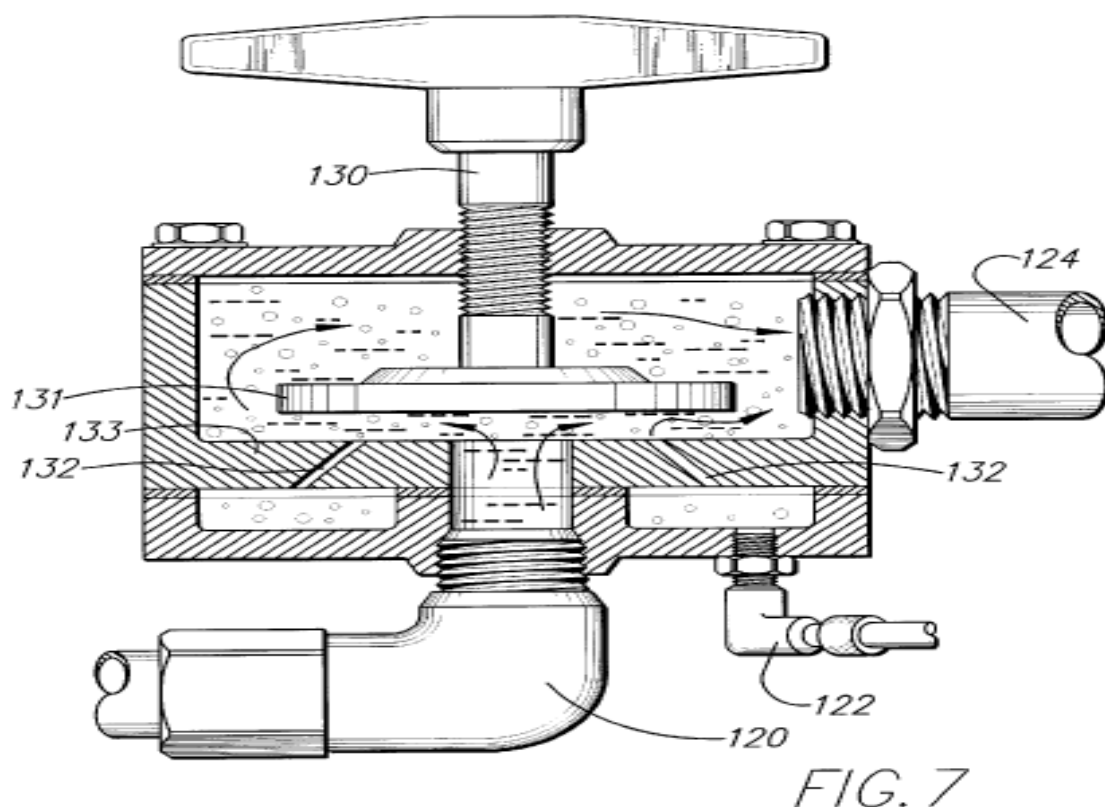
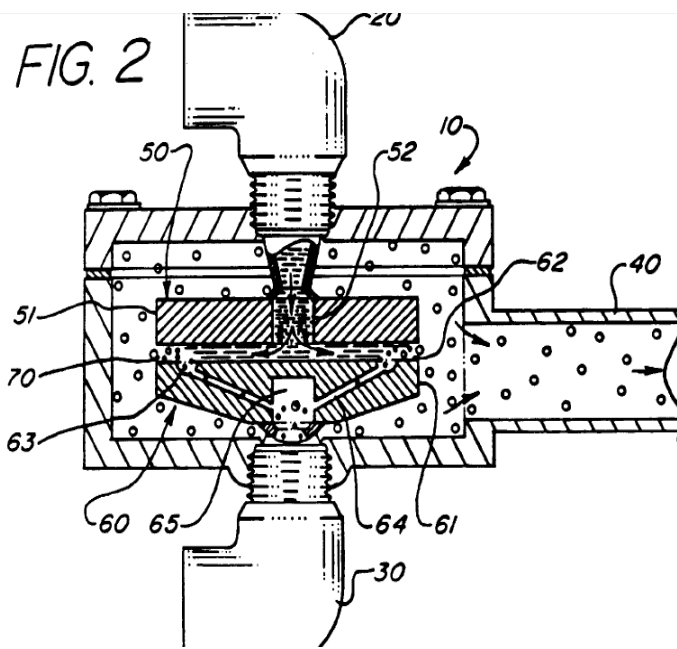


Рис. А.6 – пристрій для отримання пін пат. US 6086052:

130–регульовальний пристрій; 120–випускна лінія для піни; 132–отвір для повітря; 122– вхідна лінія для повітря; 124–впускна лінія для води

На рис. А.7 приведено можливі варіанти виконання пристроїв, відповідно до патентів US 6217009, US 5837168.



a

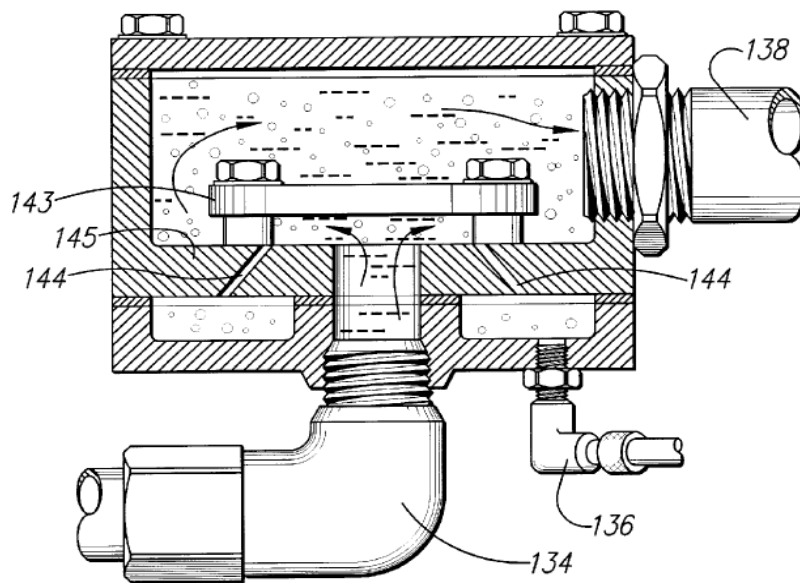


FIG. 8

b

Рис. А.7 – Варіанти виконання пристроїв із використанням дисків у патентах US 6217009, US 5837168.

У патенті US 5255747 (рис. А.8) розкрито систему подачі стисненого повітря і піни для отримання першого потоку, що повинен аерувати піну. Система включає в себе пожежний насос, повітряний компресор, трубку Вентурі та систему автоматичної підтримки необхідного співвідношення повітря і води, які подаються із трубки Вентурі у пристрій подачі пожежного потоку.

FIG. 3

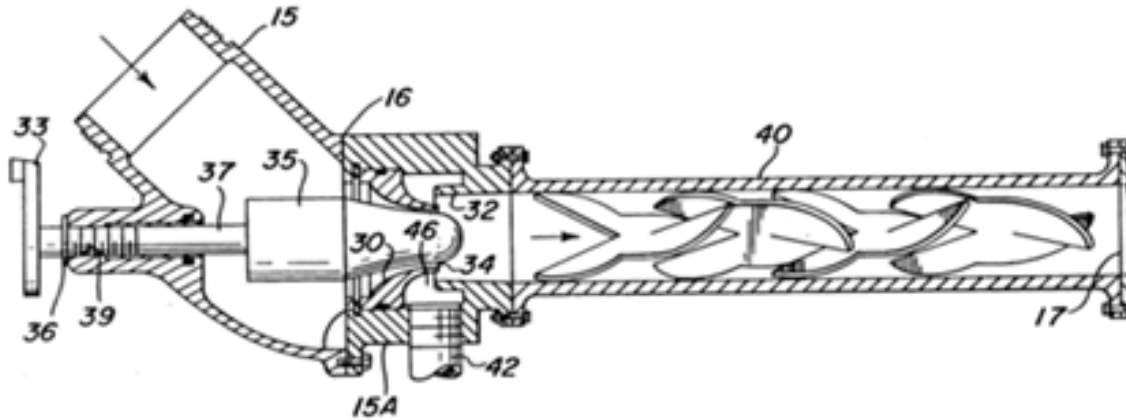


Рис. А.8 – Система подачі стисненого повітря і піни для отримання потоку аерації піни

У патенті US 5113945 пропонується змішувач для піни / води / повітря для протипожежних пристроїв (рис. А.9), спеціально призначений для доставки піни під тиском до поверхні мішені. Пристрій включає в себе унікальний змішувач для впорскування повітря, в якому сопла для випуску повітря орієнтовані під похилим кутом до напрямку потоку. Подане повітря змушує піну розширюватися у змішувачі без втрати сили за рахунок генерування турбулентності потоку, що підвищує ефективність пристрою.

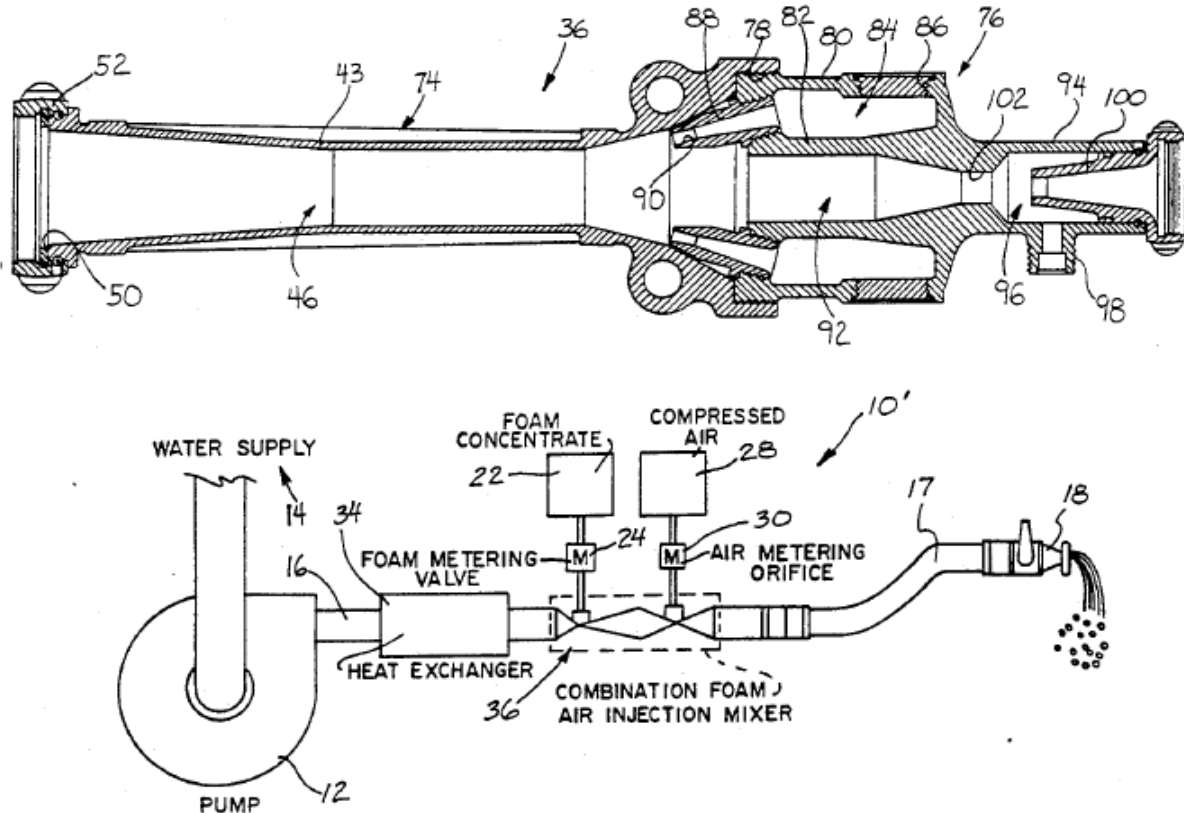


Рис. А.9. – Схема підключення та змішувач для піни / води / повітря для протипожежних пристроїв

Пристрій пожежогасіння, що містить трубопровід, насосне обладнання, поєднане із зазначеним трубопроводом для подачі текучого середовища під тиском через вказаний канал у випускне сопло, причому текуче середовище під тиском містить задану кількість спінювального компонента, змішувальну трубку, розташовану уздовж і в потоковому з'єднанні із зазначеним трубопроводом.

Зазначена змішувальна трубка включає в себе вхідний отвір для повітря в потоці, що сполучається з потоком стисненого повітря, і випускне сопло для повітря, розміщене у трубці змішувача, в потоковому сполученні між вхідною частиною і наскрізним проходом зазначеної змішувальної трубки, через який протікає текуче середовище під тиском, згадане випускне сопло для повітря, орієнтоване під похилим кутом відносно проточного каналу зазначеного текучого середовища через вказаний канал, і має засіб для введення повітря в зазначений канал потоку через випускне сопло, в якому згаданий піноутворювач розширюється перед випуском через випускне сопло.

Патент US 010560, в рефераті його йде мова про винахід, який відноситься до засобу пожежогасіння та способу отримання піни. Суть полягає у швидкості під високим тиском подавання піноутворювача у змішувальний колектор через велику кількість струменів, а негорючий газ вводиться під високою швидкістю та високим тиску до центру змішувального колектора, після чого струмені у напрямку потоку утворюють піну. Піна, яка утворюється у змішувальному колекторі, подається через шланг високого тиску та ствол, які з'єднані зі змішувальним колектором. Засіб може бути автономним блоком, розташованим на рамі, зі своїм джерелом піноутворювальної рідини та негорючим газом, що зображено на рис. А.10.

Зазначений винахід направлено на пристрій і спосіб отримання піни, які можуть бути використані для гасіння пожежі. Пристрій включає джерело піноутворювальної рідини і газу, обидва з яких вводяться під тиском у змішувальний колектор (рис А.11). Піна утворюється у змішувальному колекторі, протікає через шланг і виходить із сопла. Пристрій може бути встановлено на візку або на самохідному транспортному засобі, такому як вантажівка, чи може бути стаціонарним.

Піноутворювальну рідину можна попередньо перемішати і зберігати в ємності. Альтернативно піноутворювальний агент може бути дозований в об'ємну рідину, якщо це необхідно, в режимі змішування на льоту. Піноутворювальна рідина вводиться до змішувального колектора під тиском, наприклад, шляхом підвищення тиску в резервуарі, в якому зберігається рідина, або шляхом прокачування рідини. Клапан може бути передбачений в лінії, що подає рідину в колектор, для регулювання швидкості потоку рідини, що дозволяє оператору контролювати співвідношення рідкого газу в генерованій піні.

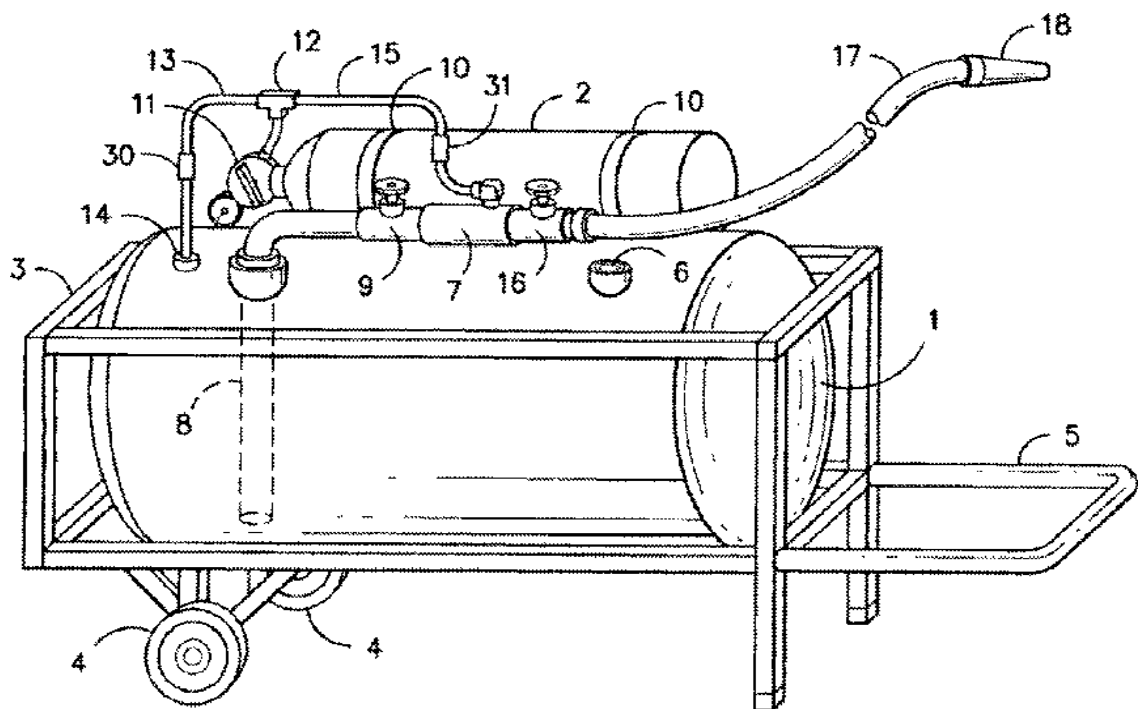


Рис. А.10 – Засіб пожежогасіння та способу отримання піни

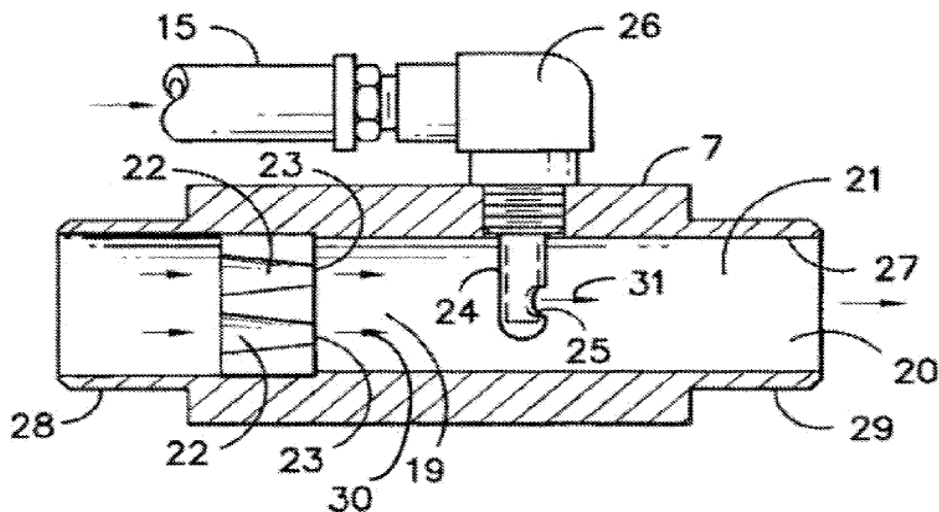


Рис. А.11. – Схема змішування компонентів піни згідно з патентом US 0105601

Як приклад співвідношення рідина-газ може знаходитися в діапазоні від 1:15 до 1:50, переважно від 1:20 до 1:40. Газ може бути стиснутий і зберігатися в баку під тиском. Передбачено регулятор для зменшення тиску газу, що зберігається в баку, до бажаного робочого тиску до введення газу у змішувальний колектор. Стиснутий газ також може бути використаний для підвищення тиску в резервуарі для зберігання рідини. Наприклад, газова лінія, що виходить із регулятора, може бути розгалуженою, з однією лінією, використовуваною для транспортування газу у змішувальний колектор, а інша лінія використовується для підвищення тиску в резервуарі для зберігання рідини. В такому прикладі піноутво-

ривальна рідина, що протікає до колектора, і газ, що протікає до колектора, будуть перебувати за умов приблизно однакового тиску. В одному варіанті здійснення винаходу газ є негорючим газом. Прикладами відповідних негорючих газів є азот, діоксид вуглецю, галогеновуглеці, благородні гази і гази, що містять недостатню концентрацію кисню для забезпечення горіння. Метою цього винаходу є мінімізація втрати імпульсу рідини, газу і піни в результаті кута подачі газу по відношенню до потоку рідини через змішувальний колектор. Для досягнення мети можуть бути використані різні засоби, в тому числі введення газу через порт, розташований збоку змішувача колектора під кутом нижче за потоком, через поперечину, що має отвір, звернений вниз за потоком, або через трубу, вставлену по суті в центр потоку рідини через змішувальний колектор.

У патенті US 2106403 розкрито спосіб отримання піни, в якій негорючий газ змішується з водною піноутворювальною сумішшю в камері для формування піни. Газ, що входить, подається в камеру формування піни під тиском, де тиск газу є достатнім для перенесення піни з камери через приєднаний до неї шланг і насадку. Газ вводиться перпендикулярно до потоку водної суміші.

У патенті US 5058809 представлено піноутворювальне сопло, призначене для аспірації навколишнього повітря у проточний водний потік, що містить агент, який виробляє піну. Піна виробляється і випускається з випускного отвору насадки. Відомо також, що в піноутворювальному соплі є система для полегшення змішування і збільшення виробництва піни, як це показано в Nysted, US Pat. № 4 330 086.

У патенті ЕН 348848598 запропоновано піноутворювальний пристрій, який має змішувальний колектор, в якому газ інжектуються під кутом менше  $90^\circ$  відносно напрямку потоку розчину, що утворює піноутворювальна рідина, що описано в Mahrt, US Pat. № 5881817 і Henry, US Pat. № 61212819. Однак жодне з вищезгаданих посилань не містить струменів або інших засобів для збільшення швидкості рідини до утворення піноутворювальної рідини із упорскуванням газу у змішувальний колектор.

Пристрій для викиду двофазної суміші, патент US 9352340 В2, включає в себе впускний отвір для рідини і газу, розподільну камеру для виробництва першої суміші рідкого газу, ежекторне сопло першої суміші рідкого газу в основному напрямку, який визначається віссю,–вектор. Вихідне сопло має геометрію, що містить щонайменше на своїй довжині мінімальний розріз або шийку в місці розташування вектора осі. Зокрема через геометрію сопла розширення, отримане всередині ежекторного сопла, дозволяє перетворити першу суміш рідкого газу з розподільної камери у другу суміш відповідно до конфігурації потоку, що складається, наприклад, із двофазного струменя з діапазоном викиду і розміром рідких частинок, який можна регулювати відповідно до масового потоку рідини та газу й абсолютного тиску на впускному отворі.



Пристрій генерування піни, патент US 6276459 B1 (рис. А.12), включає джерело стисненого газу 16 і джерело рідини 26, пристосований для отримання піни. Передбачено газовий насос, такий як діафрагменний насос 18, який має впускний отвір для газу, що сполучається із джерелом стисненого газу для приводу насоса, газовідвід 14, впуск для рідини і випуск рідини для випуску рідини з насоса. Інжектор 38, розташований зі сторони сполучається з випускним отвором для газу 28 в насосі для подачі вихлопного газу в рідину, що випускається насосом 32, для аерації рідини і отримання піни. Пристрій може бути портативним, встановленим на автомобілі або стаціонарним. Рідиною може бути вода з інжектором для введення спінювального агента у воду.

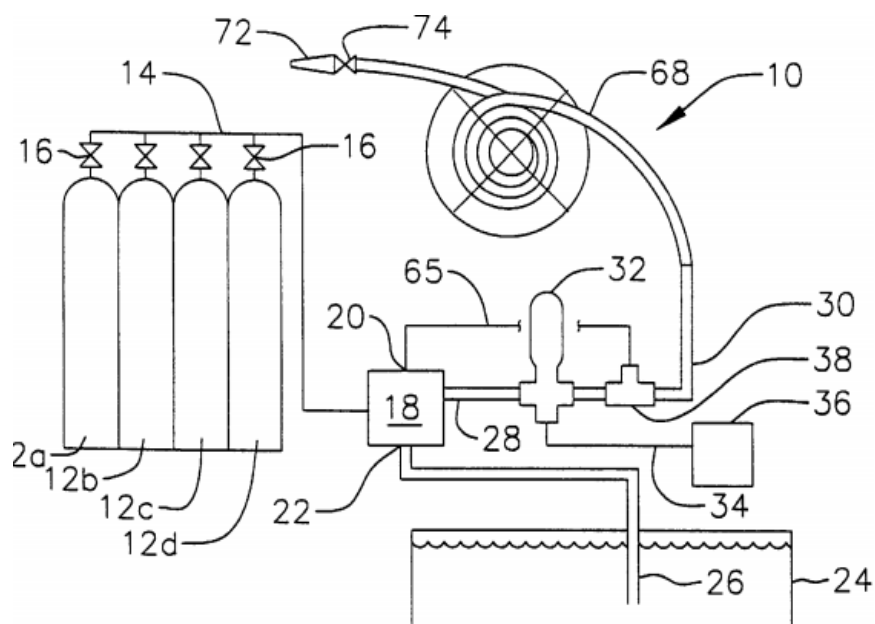


Рис. А.12 – Пристрій генерування піни, патент US 6276459 B1

Статичний змішувач, US 5492655A3 (рис. А.13), містить корпус, який поділяється на дві камери за допомогою краплеутворювача. Потік стисненого повітря і потік матеріалу під тиском вводяться у вхідну камеру, де потоки перетинаються один з одним, потрапляють на краплеутворювальну пластину і змішуються, утворюючи піну у висхідній камері.

Піна проходить через отвори у пластині крапель у нижню за потоком камеру, де піна додатково очищається перед тим, як її вивантажують зі статичного краплеутворювача.

Пристрій генерування піни, патент US 6276459 B1, включає джерело стисненого газу і джерело рідини, пристосований для отримання піни. Передбачено газовий насос, такий як діафрагменний насос, який має впускний отвір для газу, що сполучається із джерелом стисненого газу для приводу насоса, газовідвід, впуск для рідини і випуск рідини для випуску рідини з насоса. Інжектор, розташований зі сторони нагнітального

насоса і сполучається з випускним отвором для газу в насосі для подачі вихлопного газу в рідину, що випускається насосом для аерації рідини й отримання піни. Пристрій може бути портативним, встановленим на автомобілі або стаціонарним. Рідиною може бути вода з інжектором для введення спіню вального агента у воду.

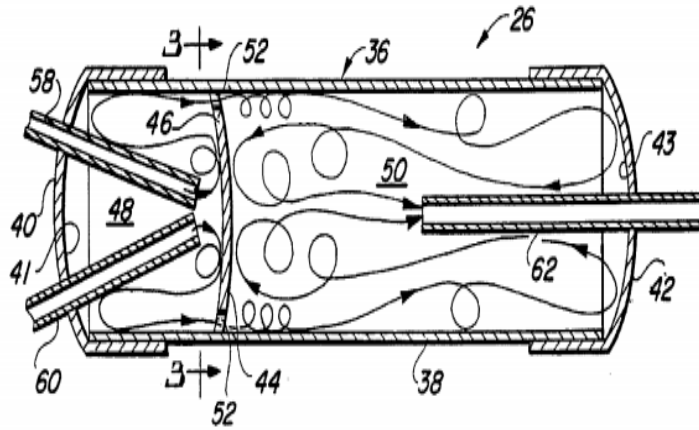
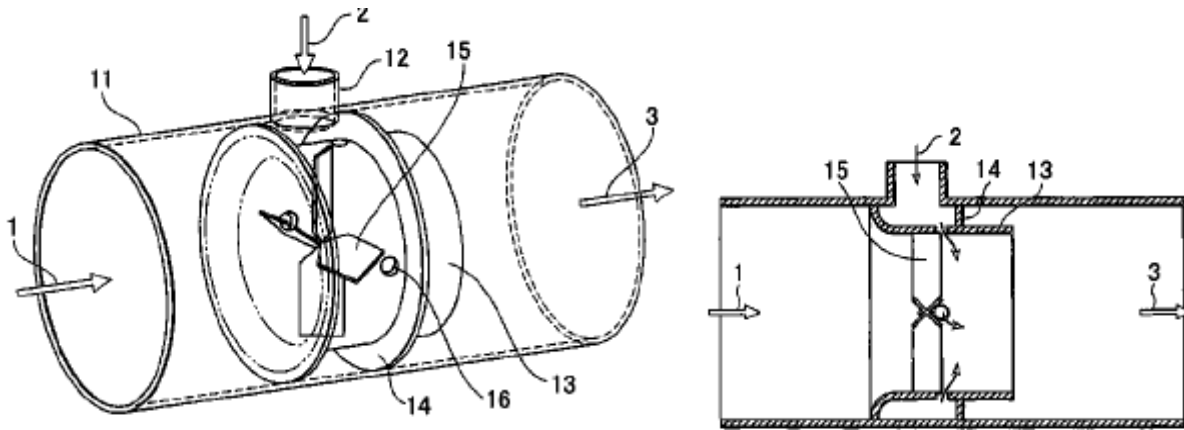


Рис. А.13–Статичний змішувач, US 5492655A3

Устаткування для змішування рідин пропонують у патенті US 8033714 (рис. А.14). Прохідний канал у циліндрі, в якому тече перше текуче середовище, включає внутрішній циліндр, який, за діаметром менше, ніж проточний канал. Віхороутворювальний статор, що має чотири лопаті, радіально закріплений у внутрішньому циліндрі.



- 1:FLUID 1
- 2:FLUID 2
- 3:FLUID MIXTURE
- 11:FLOW PASSAGE FOR FLUID 1 AND FLUID MIXTURE
- 12:FLOW PASSAGE FOR FLUID 2
- 13:INTERNAL CYLINDER
- 14:DIVIDER PLATE
- 15:SWIRL-GENERATING STATOR
- 16:OPENING

Рис. А.14–Устаткування для змішування рідин за допомогою віхороутворювального статору

Поверхня для подачі другого текучого середовища передбачена на зовнішній периферії поверхні стінки внутрішнього циліндра в контакті із зонами поділу потоку, які формуються уздовж розташованих нижче за потоком поверхонь лопатей статора, коли перша рідина проходить крізь нього. Поверхня стінки внутрішнього циліндра утворена отворами, через які область поділу потоку пов'язана із простором заголовка. Друге текуче середовище, що подається у простір колектора, протікає через отвори в області поділу потоку і розсіюється уздовж лопатей, закручується та переміщується з першим протікаючим середовищем, яке подається за допомогою вихрових сил.

У патенті US 632822 пропонується сопло (рис. А.15), для роторної КП, що обертається. Сопло для піни стисненого повітря (CAF) має циліндр, встановлений для обертання навколо осі, перпендикулярно до її поздовжньої осі. Ємність встановлена на підвідному каналі CAF і має площу поперечного перерізу, істотно більшу, ніж площа поперечного перерізу трубопроводу. Два нерівних отвори у стовбурі розташовані на протилежних сторонах осі обертання і розподіляють піну таким чином, що вона покриває майже повну кругову область на землі.

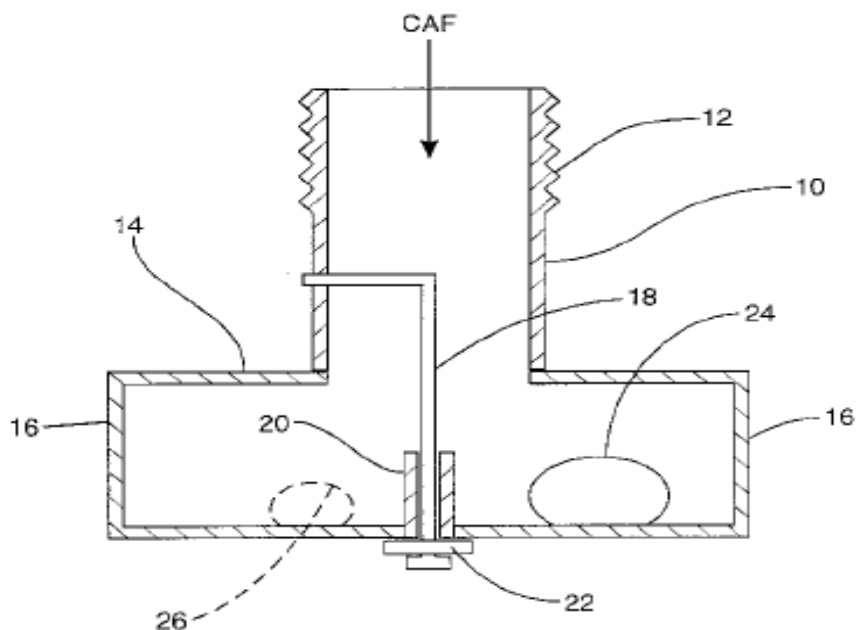


Рис. А.15- Сопло, що обертається, для подачі компресійної піни (CAF)

Аналізуючи вищенаведені патенти, відзначимо, що піна стисненого повітря (CAF) використовується для гасіння пожеж і зазвичай складається з комбінації води і концентрату піни, змішаних разом, з утворенням пінного розчину. Піна стисненого повітря потім додається до розчину піни, щоб доставляти піною стисненого повітря (CAF) для подачі у вогонь.

Якість і консистенція САФ залежать від ретельності змішування розчину повітря та піни і структури бульбашки САФ, що утворилася в змішувальному пристрої, перед подачею у вогонь через пожежний рукав або контрольне сопло.

Існуючі способи і пристрої для змішування стисненого повітря і пінного розчину часто подають стиснене повітря в один отвір для ін'єкцій на зовнішній периферії сантехнічного компонента, такого як корпус клапана, фітинг або труба, через які протікає розчин піни. При такій однокрапковій ін'єкції стиснене повітря нерівномірно розподіляється всередині розчину піни, і отримана структура бульбашок САФ є непослідовною.

Статичні змішувачі або скрубери, які складаються із серії пластин, перфорованих пластин або дисків або інших нерегулярних форм, зазвичай розміщуються після місця уприскування повітря, щоб порушити траєкторію потоку і викликати турбулентність для подальшого змішування розчину стисненого повітря і піни. У той час, як це порушення потоку покращує перемішування й утворення піни САФ, втрати на тертя через пристрій збільшуються, що зменшує тиск потоку САФ, що доставляється, й обмежує охоплення від пожежного шланга або насадки на вогонь. Крім того, коли тиск використовується тільки для води і не використовується для САФ, збільшені втрати на тертя обмежують витрату.

У зв'язку з цим останнім часом стали пропонувати рішення по змішуванню компонентів із використанням кільцевої подачі складових в розпиленому вигляді через безліч отворів. Прикладом можуть служити рішення викладені в патентах US20170120092A1, WO1993013829A1, US 8 919 745, WO 2014047456 A2, WO2017078951 A1.

Наприклад у патенті US20170120092A1 винахід являє собою змішувальний пристрій, який покращує змішування стисненого повітря всередині розчину піни для поліпшення створення структури бульбашок САФ, одночасно зменшуючи втрати на тертя через змішувальний пристрій.

На рис. А.16 представлено схему пристрою одного з варіантів здійснення змішувального пристрою згідно з описаним винаходом. Корпус 20 змішувального пристрою 10 показаний під фланцевим вхідним патрубком 110; рифлений кінець і внутрішнє різьбове випускне з'єднання 120; нижній зливний отвір 130; канал 140 підведення тиску; і з'єднувальний порт для колектора 150 для уприскування стисненого повітря.

На рис. А.16 представлено схематичний вигляд одного варіанта здійснення змішувального пристрою 10 згідно з даним винаходом для виробництва компресійної піни для устаткування пожежогасіння. Корпус 20 змішувального пристрою 10 показаний з наступними деталями. Піноутворювальний розчин тече у змішувальний пристрій 10 через вхідний отвір 40 для спіненого розчину в область 170 суміші розчинів піни. Вхід 40 для розчину піни може додатково містити фланцеве вхідне з'єднання 110.

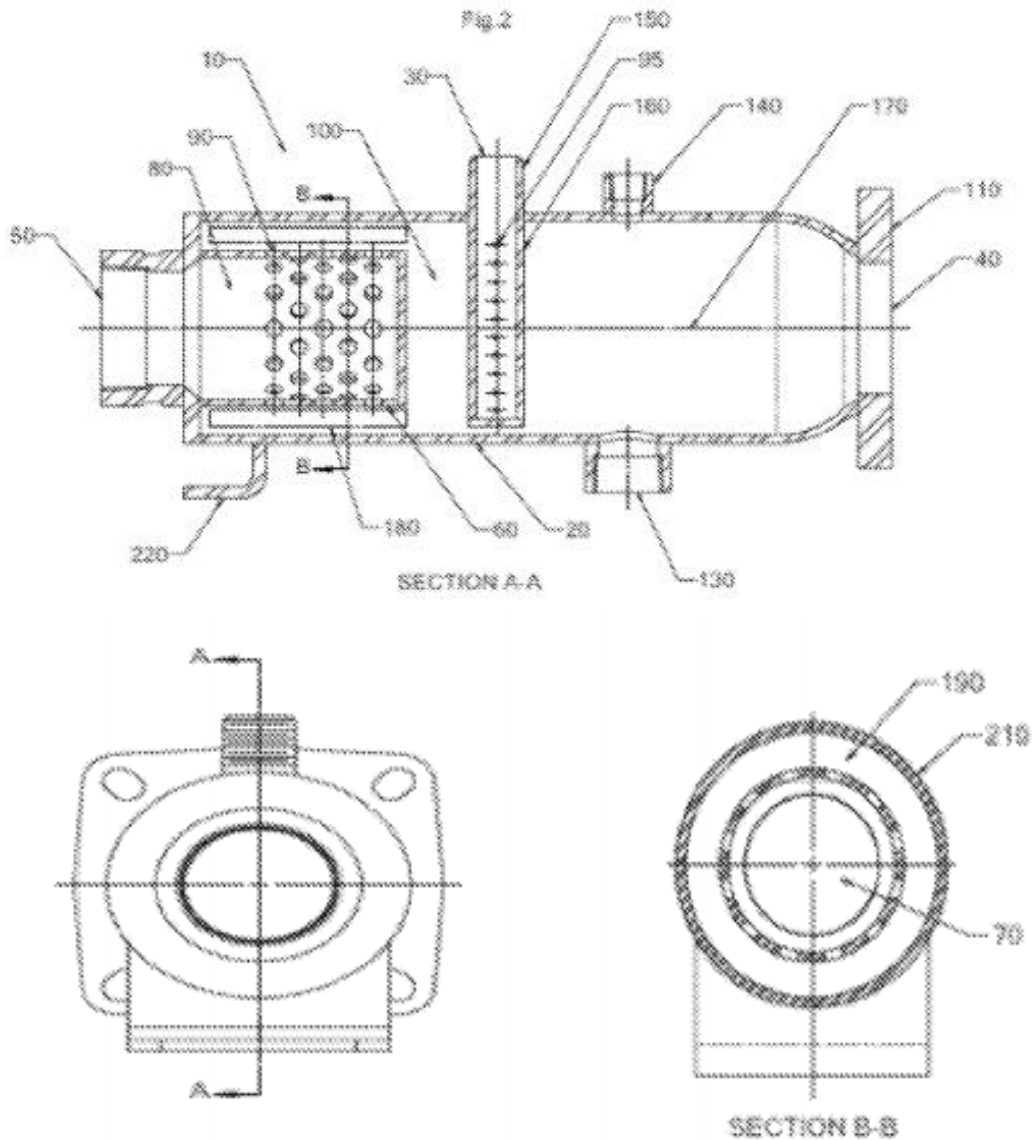


Рис. А.16 – Схема змішувального пристрою за пат. US20170120092A1

Шланг для подачі стисненого повітря з'єднаний із впускним отвором 30 для стисненого повітря, який з'єднаний з колектором 160 для вприскування стисненого повітря. Стиснуте повітря вводиться у змішувальний пристрій 10 через колектор 160 для увприскування стисненого повітря, який поділяє навпіл поперечний переріз змішувальної камери 100. Впускний колектор 160 стисненого повітря може мати безліч бічних сторін, які можуть мати безліч отворів 95, розташованих щонайменше на одній з бічних сторін. Це рівномірно розподіляє стиснене повітря у всьому поперечному перерізі потоку розчину піни. Потім суміш розчинів піни надходить у зовнішнє кільце 190 між зовнішньою оболонкою 210 змішувального пристрою і промивною трубкою 60 для очищення. Суміш пінного розчину надходить у промивальну трубку 60 через серію отворів 90, розподілених по зовнішній периферії промивної колекторної труби 60.

Труба 60 промивного колектора проходить у змішувальну камеру 100 для створення кільцевої області 180 потоку в камері змішувача 100. Розміщення отворів 90 навколо зовнішньої периферії труби колектора 60 виконано з можливістю розподілу структури потоку рівномірно в інтер'єрі 80 зрошувального колектора труби 60.

Зокрема розміщення отворів 90 зупиняється перед лівим кінцем кільцевого простору 190. Отвори 90 мають розмір, щоб додатково поліпшити змішування повітря та розчину піни і отриману структуру бульбашок САФ, одночасно обмежуючи втрати на тертя, коли САФ виходить зі змішувального пристрою 10 через вихідний отвір 50 для спіненого повітря. Випускний отвір 50 для спіненого повітря може додатково містити рифлений кінець і внутрішнє різьбове випускне з'єднання 120. Труба промивного колектора може додатково містити внутрішню колекторну трубу 70 всередині промивної труби 60 для промивання.

По суті основна перевага цієї конструкції полягає в тому, щоб забезпечити поліпшене змішування стисненого повітря і розчину піни, яке створює кращу піну стисненого повітря з меншими втратами на тертя, що дозволяє поліпшити подачу піни стисненого повітря до вогню.

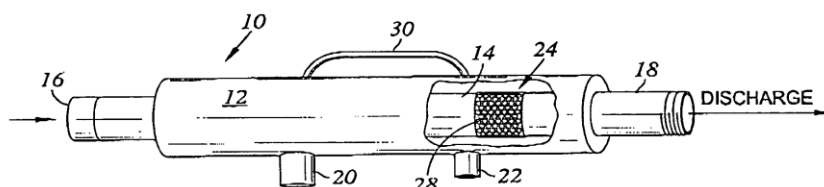
Насадка для нанесення піни зазвичай використовує змішувальний редуктор, що має зазвичай порожній корпус із вхідним отвором і протилежним рознесеним вихідним отвором. Напірний струмінь води направляє у вхідний отвір, створюючи область низького тиску на вхідному отворі, який діє, щоб нанести спінений розчин, з'єднаний з тілом, у вхідний отвір. Розчин піни змішується зі струменем води в корпусі змішувача, змішаний розчин пінної води викидається з вихідного отвору під тиском струменя води.

Винахід забезпечує ефективний спосіб і пристрій для боротьби з пожежами в обмеженому просторі. Перш за все це пов'язано з пожежами у вугільних шахтах, але слід розуміти, що описаний тут спосіб і пристрій є ефективним і для боротьби з іншими видами пожеж в замкнутих просторах таких як, наприклад, підвальні і тунельні пожежі, гасіння резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Спосіб включає стадії дозування пінного концентрату в негорючу рідину з утворенням піноконцентрату / рідкої суміші та створення потоку текучого середовища піноконцентрату / рідкої суміші. Азот вводиться в потік пінної рідкої суміші, щоб ініціювати утворення піни з розширенням її азотом. Розподільчий потік, що несе спінену піноутворювальну масу, завершує повне розширення тільки після її розширення азотом, подають в обмежену зону, залучену в полум'я, тим самим гасячи вогонь і практично закриваючи контакт між горючим матеріалом, який власне і горить під час пожежі, і навколишньою атмосферою та істотно знижує небезпеку вибуху або спалаху.

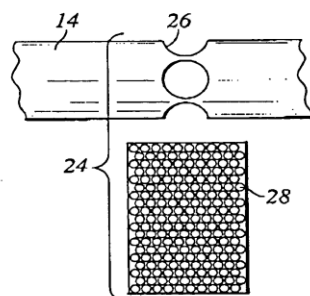
Пристрій, відповідно до винаходу, пристосований для розширення та подачі піни і містить корпус, який визначає внутрішній простір, через

який проходить випускна лінія. Кінці корпусу закриті навколо кінців нагнітальної лінії, а кінці випускної лінії проходять за кінці корпусу, щоб утворити з'єднання на одному кінці для прийому потоку піноконцентрату (рідини), а на протилежному кінці знаходиться дозуючий кінець піни пристрою.

Патент WO2017078951 A1 (рис. А.17), також в цілому відноситься до змішувачів для використання в системі подачі стисненого повітря і піни (CAF) для гасіння вогню.



*Fig. 1*



*Fig. 2*

Рис. А.17 – Змішувач для подачі стисненого повітря і піни, пат. WO2017078951

Відмінністю є те, що впускний колектор стисненого повітря має безліч бічних сторін, які мають безліч отворів, розташованих щонайменше на одній з бічних сторін. Трубка промивного колектора проходить у змішувальну камеру для утворення кільцевої області потоку в камері змішувача. Трубка промивного колектора має безліч отворів, розподілених навколо зовнішньої периферії промивної колекторної труби. Внутрішня колекторна труба розташована всередині промивної труби. Випускний патрубок для стисненого повітря, оперативно з'єднаний із промивною колекторною трубою.

У патенті US 8231111 (рис. А.18 та А.19), пристрій генерування піни містить: корпус, який має простір у середині та вхідний кінець, утворений на одному кінці, й випускний кінець сформований на іншому кінці;

частина усереднення потоку повітря, що міститься у просторі тіла поруч із вхідним кінцем, причому буферний простір визначається між стороною частини усереднення потоку повітря у напрямку до вхідного кінця корпусу і внутрішньої кромки вхідного кінця, а частина усереднення потоку повітря має безліч наскрізних отворів і пористе тіло, розташоване у просторі тіла і прилеглим до сторони частини усереднення потоку повітря у вихідного кінця корпусу, та камеру для збору піни, утворену між пористим тілом і внутрішньою кромкою вихідного кінця корпусу, в якому частина усереднення потоку повітря має форму конуса з вершиною конуса до вхідного кінця, а наскрізні отвори розташовані радіально.

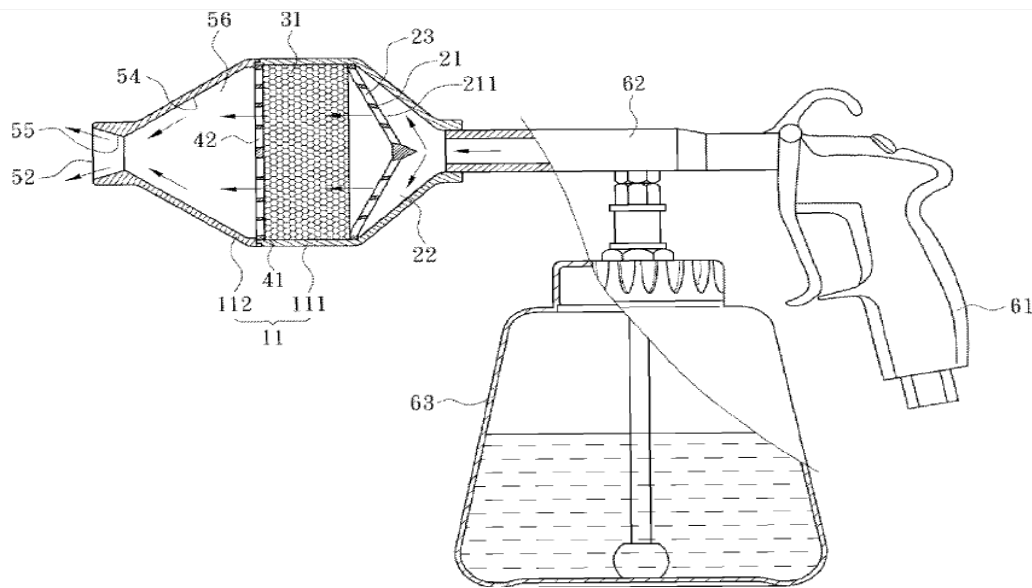


Рис. А.18 – Пристрій генерування піни, пат. US 8231111

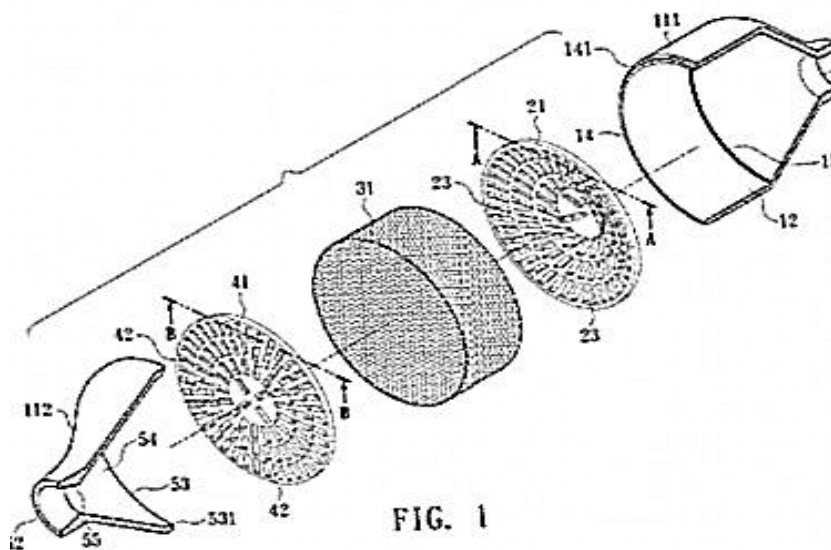


Рис. А.19 – Насадка пристрою генерування піни, пат. US 8231111



Змішувач для піни, води та повітря (рис. А.20), або пристрій для створення бульбашок, розглянуто у патенті US 8794600. Пристрій формування бульбашок включає корпус, який має передню кришку і задню кришку, з'єднану з передньою кришкою. Передня кришка має сопло, яке має прохід, визначений у ньому. Задня кришка має певний простір. Сполучна трубка з'єднана із задньою кришкою і має наскрізний отвір для з'єднання з розпилювачем. Блок формування бульбашок має перший сітчастий елемент і другий сітчастий елемент, обидва з яких розташовані у просторі, причому кожен із першого і другого мережевих елементів має напрямну пластину поперечної форми, розташовану на її поверхні, і в якому поперечні напрямні пластини першого і другого чистих елементів мають круглу центральну частину, що має діаметр, більший або рівний діаметру наскрізного отвору і відповідний положенню до наскрізного отвору. Простір визначається в області розширення, області тиску й області накопичення бульбашок першим і другим чистими елементами. Миючий засіб доставляється в зону розширення й утворює бульбашки в області накопичення бульбашок. Бульбашки накопичуються і розпорошуються повітряним потоком.

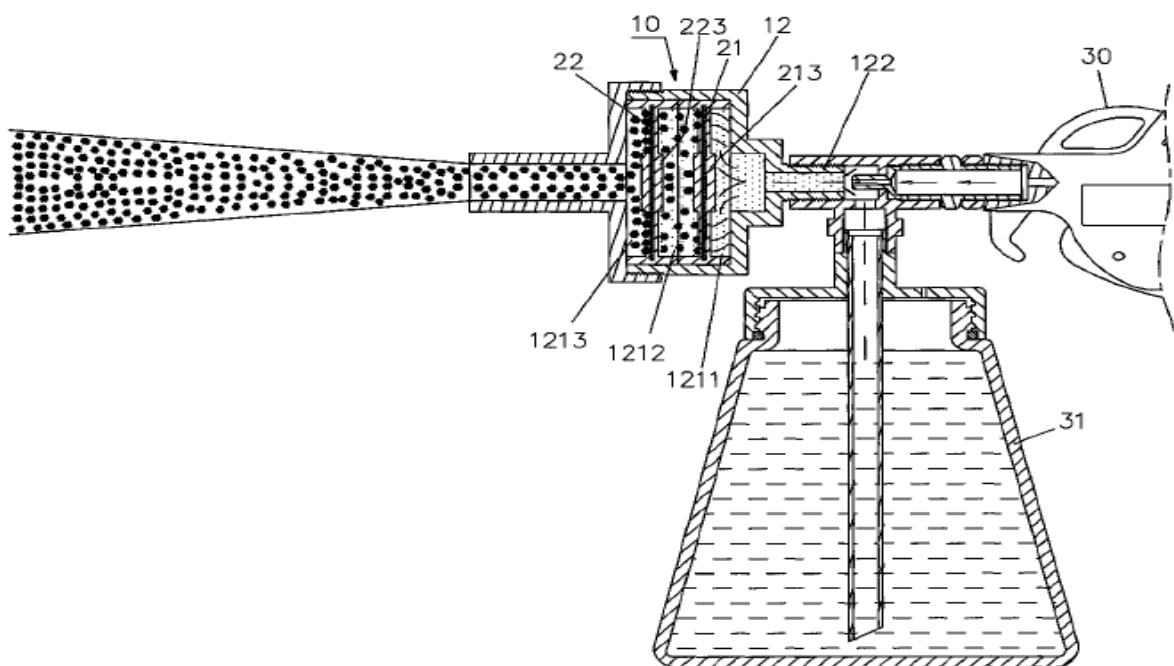


Рис. А.20 – Змішувач для піни / води / повітря, пат US 8794600

Спосіб і пристрій для виробництва піни стисненого повітря для пожежогасіння та знезараження викладено у патенті WO 2006000177 АЗ й відносяться до виробництва піни стисненого повітря, в якому спеціальну добавку для гасіння пожежі або дезактивації вводять безпосередньо в потік формування піни, що подається в основний потік води. Змішуваль-

ний насос для піноутворювача виділяє допоміжний рухомий потік води, в який спочатку вводять добавку, а потім спінювальний компонент. Суміш «піноутворювач-добавка-вода», яка виробляється безпосередньо на місці, добре перемішується разом з основним потоком води, забезпечуючи точний рівномірний розподіл добавок у компресійній піні. Отримана таким чином піна для стисненого повітря забезпечує оптимальне, економічне і екологічно чисте пожежогасіння і дезактивацію.

Пристрій для генерування піни (рис. А.21), патент US 8919745, забезпечує високоякісне перемішування розчину і повітря для отримання піни без обмеження потоку рідини через пристрій. Повітряний колектор має канали, через які забезпечується потік води або розчину через пристрій, а також має отвори, які вводять стиснене повітря в паралельному потоці з водою або розчином, що вводиться у вихідну камеру. Площа поперечного перерізу проходів, щонайменше, така ж сама, як і вхід для води або розчину, і, отже, пристрій не обмежує потоку рідини навіть у тому випадку, коли потрібен прямий потік води або розчину без змішаного повітря.

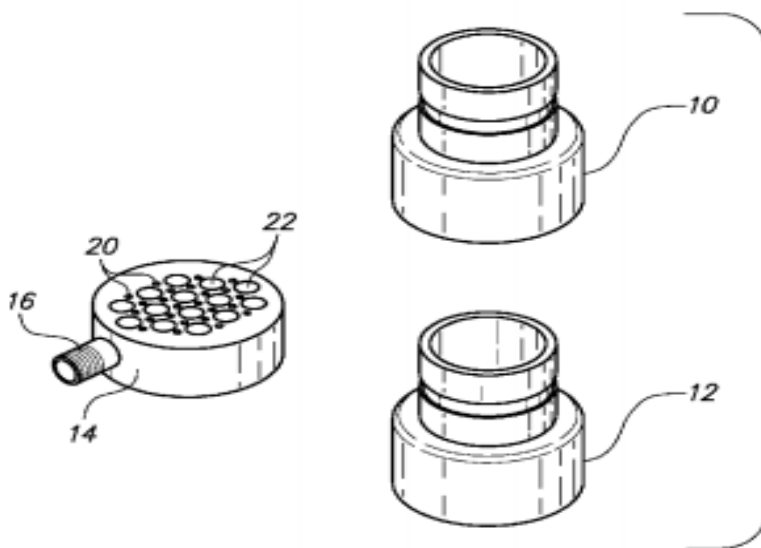


Рис. А.21 – Пристрій для генерування піни, пат. US 8 919 745

Патент US 20120306108A1 (рис. А.22), пропонує пристрій формування бульбашок, який генерує бульбашки за допомогою детергента, а бульбашки розпорошуються через сопло. Винахід включає корпус, який має передню кришку і задню кришку, з'єднану з передньою кришкою. Передня кришка має сопло, яке має прохід, визначений у ньому. Задня кришка має визначений простір. З'єднувальна трубка з'єднана із задньою кришкою і має наскрізний отвір.

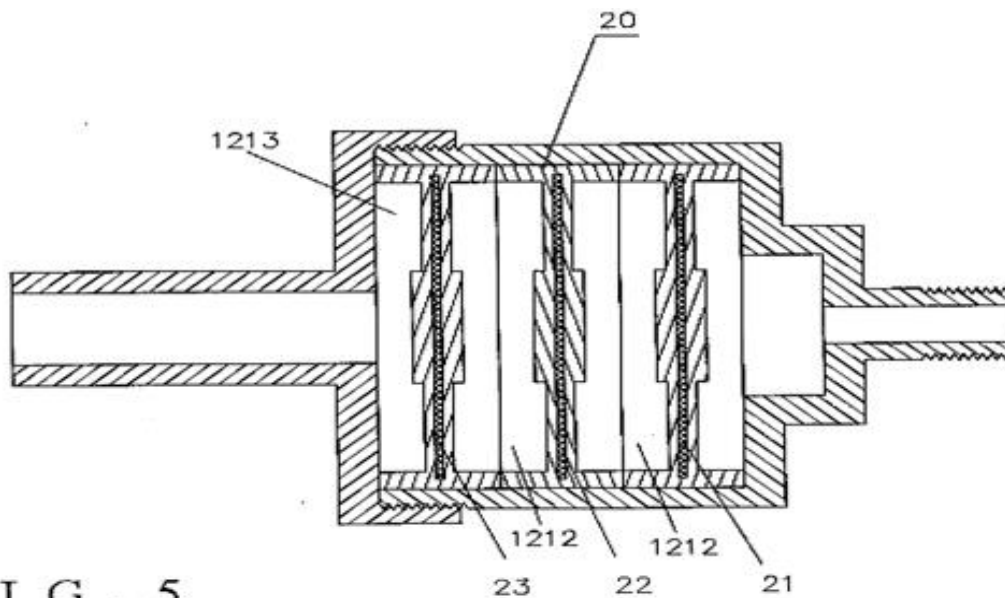


FIG. 5

Рис. А.22– Пристрій для формування бульбашок

Сполучна трубка має різьбу для з'єднання з розпилювачем. Блок формування бульбашок (рис. А.23) має перший сітчастий елемент і другий сітчастий елемент, обидва з яких розташовані у просторі. Кожен із першого і другого елементів сітки має напрямну пластину, розташовану на її поверхні, щоб направляти потік повітря для розширення радіально.

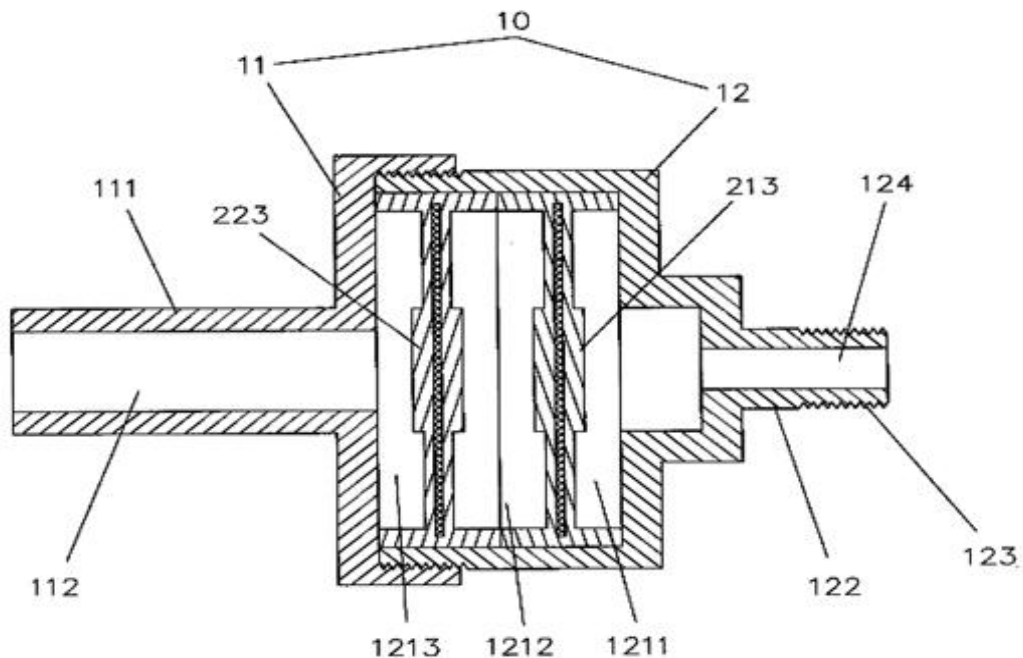


Рис. А.23 – Пристрій для формування бульбашок

Простір визначається в області розширення області тиску й області бульбашки першим і другим чистими елементами. Можливе розташування сітчастого елемента, загальну схему пристрою подано на рис. А.24.

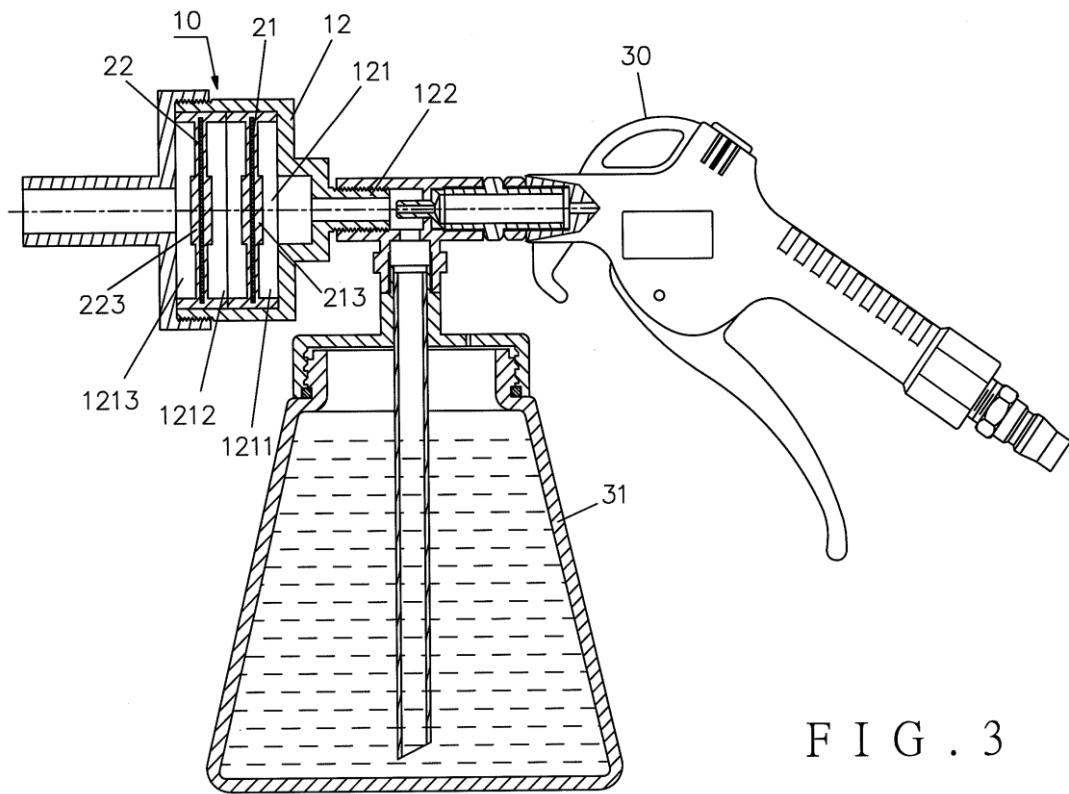


FIG. 3

Рис. А.24 – Пристрій формування бульбашок

Звичайно пристрій для створення бульбашки пневматичного створення по'язаний з пістолетом високого тиску, і піноутворюючий засіб перетворюється в туман, який всмоктується у пристрій для утворення бульбашок, (рис. А.25). Пристрій генерування бульбашок включає в себе губки або неткані тканини, які включають у себе кілька отворів, і піноутворюючий засіб проходить через губку або неткані тканини для отримання бульбашок, які потім розпилюються під високим тиском. Однак генерація бульбашок не виконується, тому що отвори розташовані випадковим чином, а зламані бульбашки і туман залишають значну кількість детергенту в отворах, і піноутворюючий засіб тече між отворами, утворюючи бульбашкову плівку з іншим детергентом в інших отворах. Плівка вдувається в бульбашки, які легше повітря, так що бульбашки доставляються на велику відстань. Піноутворюючий засіб розпорошується повітряним потоком високого тиску і утворює крихітні бульбашки, які мають меншу поверхню, які не можуть бути прикріплені іншими бульбашками для утворення великих бульбашок. Маленькі бульбашки легко випаровуються і ламаються, тому їх не можна прикріпляти до робочих об'єктів. Губки або неткані тканини з декількома отворами, як правило, деформуються ударом потоків високого тиску, а деформовані губки або неткані тканини роблять отвори нерівними, які впливають на потік повітря і

піноутворюючого засобу. Крім того, губки або неткані тканини легко зношуються і не можуть бути повністю очищені. Губки або неткані тканини поступово перетворюються на шматки, які не можуть утворити достатньої кількості бульбашок.

У патенті US 2004/0177975 розкрито систему створення піни зі стисненим повітрям (CAFS), що містить контролер системи, призначений для управління клапаном-регулятором витрати повітря в залежності від сигналів, які забезпечуються витратоміром води і витратоміром повітря, з метою збереження співвідношення між потоком повітря і потоком піни на підставі введеного їх співвідношення, регульованого користувачем.

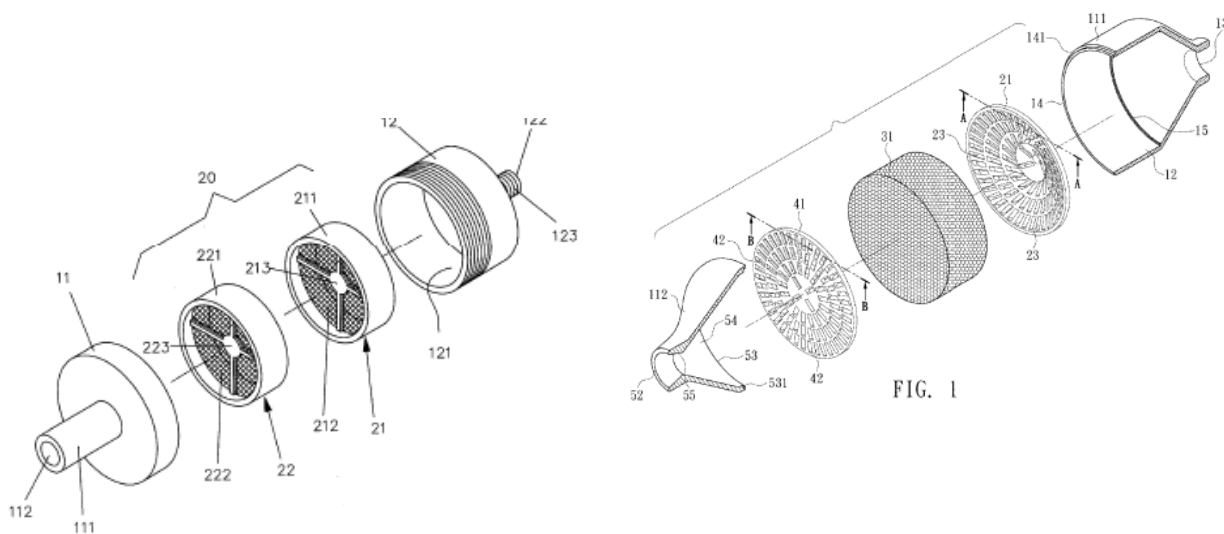


Рис. А.25– Схема розташування елементів утворення бульбашок

У європейському патенті EP-A-1632272 розкрито систему створення піни зі стисненим повітрям (CAFS) для тунелю, призначеного для руху авто-мобільного та вантажного транспорту. У патенті розглянуто проблему забезпечення можливості викиду піни, що має добру якість, незважаючи на те, що піну транспортують по довгих трубопроводах, але не розглянуто проблему оптимізації режимів роботи камери змішувача. Викладена в цьому документі ідея полягає в автоматичному регулюванні тиску піни таким чином, щоб він дорівнював заданому тиску після камери змішувача, що запобігає падінню тиску піни нижче певного значення у пристрої викиду піни, забезпечуючи тим самим густу піну, що володіє високими властивостями. Тиск піни після змішувальної камери встановлюють за допомогою регульованого звуження поперечного перерізу труби, реалізованого за допомогою клапана, що керується з урахуванням показань датчика тиску. У патенті також було проігноровано проблему регулювання різних параметрів, зокрема тиску, об'ємної витрати і швидкостей / часу вистою

повітря, води і піни, для того щоб гарантувати безперервне створення в камері змішувача піни високої якості для пожежогасіння.

Спосіб і пристрій для виробництва піни стисненого повітря для пожежогасіння та знезараження, патент WO 2006000177 АЗ, відноситься до виробництва компресійної піни, в якому спеціальну добавку для пожежі або дезактивації вводять безпосередньо в потік формування піни, що подається в основний потік води. Розкрито систему створення піни зі стисненим повітрям (CAFS), в якій стиснене повітря в лінію піноутворення вводять через регулятор тиску повітря і клапан-регулятор об'ємної витрати повітря. Крім того, створена піна зі стисненим повітрям (CAF) протікає через датчик тиску піни і клапан з електропневматичним управлінням, які утворюють схему регулювання зі зворотним зв'язком для регулювання консистенції піни і, отже, якості піни, яка подається у пристрій подавання піни. Воду подають у систему через регулятор тиску води і змішують із піноутворюючою речовиною і добавками. Суміш із піноутворюючої речовини, добавок і води протікає через клапан-регулятор об'ємної витрати води і лінію піноутворення, в яку вводять стиснене повітря, що має заздалегідь заданий тиск і заздалегідь задані параметри об'ємної витрати, через клапан-регулятор об'ємної витрати повітря. Змішувальний насос для піноутворювача виділяє допоміжний і рухомий потік води, в який спочатку вводять добавку, а потім спінювальний компонент. Суміш «піноутворювач-добавка-вода», яка виробляється безпосередньо на місці, добре перемішується разом з основним потоком води, забезпечуючи точний рівномірний розподіл добавок у компресійній піні. Отримана таким чином піна забезпечує оптимальне, економічне і екологічно чисте пожежогасіння.

Однак у цьому патенті не викладено будь-яких подробиць про те, яким чином слід регулювати різні параметри, зокрема тиск, об'ємну витрату і швидкість / час відстою повітря, води і піни, для того щоб гарантувати безперервне створення в камері змішування піни високої якості. Крім того, регулювання зі зворотним зв'язком може бути складним у реалізації.

Пропонується вдосконалена технологія створення піни зі стисненим повітрям, патент RU №2456037. Винахід відноситься до способу безперервного створення піни зі стисненим газом, зокрема піни зі стисненим повітрям, і до системи створення піни зі стисненим газом, зокрема до системи створення піни зі стисненим повітрям, особливо для пожежогасіння, а також до камери піноутворення, спеціально пристосованої для цього, і ставить завдання створення удосконаленої технології безперервного створення піни зі стисненим повітрям (CAF), або, в більш загальному викладі, – піни зі стисненим газом, з високою і постійною якістю за умов спрощення процесу її реалізації. Це завдання досягнуто шляхом подачі обох компонентів: стисненого газу, яким переважно є повітря, і

суміші з рідини, якою переважно є вода, і, щонайменше, піноутворюючої речовини, в камеру піноутворення, що має випускний отвір для виведення піни, що містить наступні операції:

- в камеру піноутворення безперервно подають суміш із піноутворюючої речовини і рідини за першого постійного тиску і з першою постійною об'ємною витратою;

- в камеру піноутворення безперервно подають стиснений газ за другого постійного тиску і з другою постійною об'ємною витратою;

- регулюють тиск піни у випускному отворі камери піноутворення для підтримки постійного тиску змішування піни в камері піноутворення.

Згідно з іншим об'єктом винаходу в ньому запропоновано систему створення піни зі стисненим газом, зокрема систему створення піни зі стисненим повітрям, що містить:

- камеру піноутворення, яка містить:

- перший впускний канал, призначений для подачі стисненого газу, яким переважно є повітря, в камеру піноутворення;

- другий впускний канал, призначений для подачі суміші з рідини, якою переважно є вода, і, щонайменше, однієї піноутворюючої речовини в камеру піноутворення;

- випускний канал, призначений для випуску піни;

- пристрій регулювання тиску, поєднаний з випускним каналом, який призначений для підтримки постійного тиску піни у випускному отворі камери піноутворення.

Згідно із ще одним об'єктом винаходу в ньому запропонована камера піноутворення, пристосована для створення піни зі стисненим газом, яка може переважно використовуватися в системі створення піни зі стисненим повітрям (CAFS).

Камера піноутворення, відповідно до даного винаходу з трубопроводу, що містить:

- впускний отвір для стисненого газу, яким переважно є повітря;

- впускний отвір для рідини, якою переважно є вода, що містить, щонайменше, одну піноутворюючу речовину; і

- вихідний отвір для випуску піни; і, щонайменше, одну сітку, розташовану таким чином, що вона проходить через весь поперечний переріз трубопроводу.

Камеру піноутворення відповідно до даного винаходу доцільно використовувати для безперервного створення піни зі стисненим газом, зокрема піни зі стисненим повітрям, особливо для пожежогасіння або знезараження. На рис. А. 26 схематично показано систему створення піни зі стисненим повітрям (CAFS) відповідно до одного з варіантів здійснення даного винаходу.

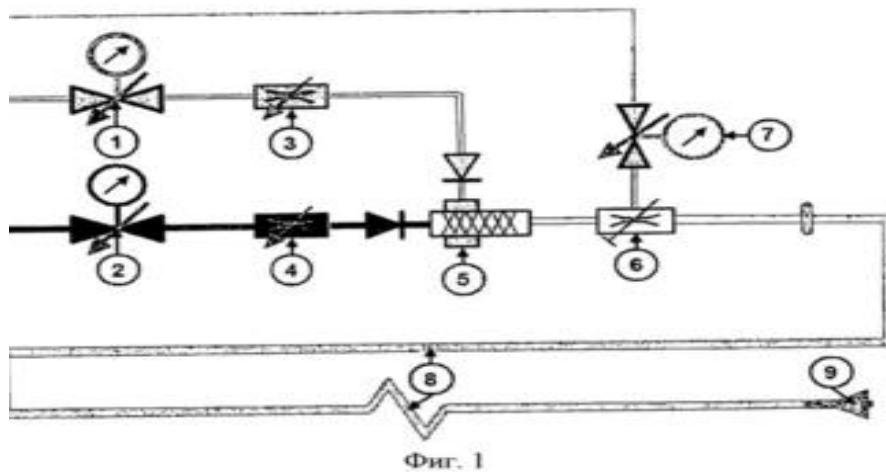


Рис. А.26– Схема створення піни зі стисненим повітрям (CAFS).

Система створення піни зі стисненим повітрям (CAFS) містить камеру 5 піноутворення, в яку через регулятор 2 тиску і регулятор 4 об'ємної витрати безперервно подаються суміш з води і, щонайменше, однієї піноутворюючої речовини будь-якого типу, придатної для пожежогасіння.

В камеру 5 піноутворення через регулятор 1 тиску и регулятор 3 об'ємної витрати також безперервно подається стиснене повітря. Регулятори тиску 1,2 і регулятори об'ємної витрати 3,4 призначені для подачі в камеру 5 піноутворення повітря і суміші піноутворюючої речовини та води під постійним тиском і з постійною об'ємною витратою, незважаючи на можливі зміни у джерелі повітря і / або у джерелі води. У камері 5 здійснюється піноутворення.

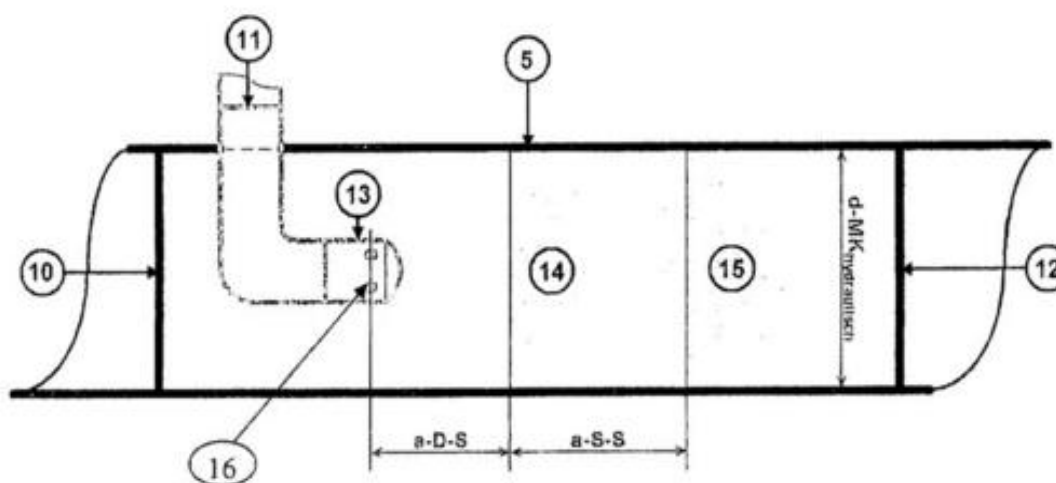
Камерою 5 піноутворення може бути камера піноутворення будь-якого відомого типу. У кращому варіанті камерою 5 піноутворення є статична камера змішувача. Регулятори 1, 2 тиску і регулятори 3, 4 об'ємної витрати можуть бути, відповідно, виключені в тому випадку, коли кожне із джерел: джерело повітря і / або джерело води, – подає відповідній потік із потрібним необхідним тиском і постійною об'ємною витратою. Для створення піни однорідної, високої якості, що складається з дуже маленьких бульбашок, які наприклад, мають середній еквівалентний діаметр в інтервалі від 0,5 до 1 мм, швидкість потоку суміші з піноутворювача і води в камері 5 піноутворення дорівнює, по меншій мірі, 0,3 м/с; кращим є варіант, щонайменше, 2 м / с.

Швидкість не повинна перевищувати 3 м / с. Аналогічним чином швидкість потоку стисненого повітря в камері 5 піноутворення повинна дорівнювати, щонайменше, 0,3 м / с; у кращому варіанті, – щонайменше, 2 м / с, та не має перевищувати 3 м / с. Згадані швидкості не є дійсними швидкостями, а відповідають так званим наведеним швидкостям.



На рис. А. 27 схематично показано камеру піноутворення відповідно до даного винаходу. Співвідношення можна змінювати в межах діапазону від 1: 5 до 1:21, за допомогою згаданої зміни настановних параметрів.

Камера піноутворення виконана у формі труби, що має впускні канали 10, 11 і випускний канал 12. У поперечному перерізі камера 5 піноутворення може бути круглою, що має заданий діаметр  $d$ -МК. В альтернативному варіанті поперечний переріз може мати іншу форму, наприклад, форму трикутника або будь-якого багатокутника. Камера 5 піноутворення має такий поперечний переріз, щоб наведені швидкості повітря і суміші з піноутворюючої речовини та води не виходили за згадані вище межі.



Фиг. 2

Рис. А.27– Схема доцільної конструкції камери піноутворення

Камера 5 піноутворення містить першу сітку 14, що проходить через весь поперечний переріз камери 5 піноутворення на розрахунковій відстані від випускних отворів сопла 13 нижче за течією потоку. Вона переважно містить другу сітку 15, що проходить через весь поперечний переріз камери 5 піноутворення на розрахунковій відстані від першої сітки 14 нижче за течією потоку. Відстань між сітками 14, 15 переважно вибрано в інтервалі від 10-кратного до 30-кратного, у кращому варіанті – в інтервалі від 15-кратного до 25-кратного, а в найбільш оптимальному варіанті вона дорівнює 20-кратному розміру отворів сіток 14, 15. Сітки можуть мати різні розміри осередків або отворів сітки. Але доцільно, щоб вони мали однаковий розмір осередків або отворів сітки. Осередки або отвори сіток задають з урахуванням розміру бульбашок створюваної піни, причому гідравлічний діаметр сітки повинен бути менше, ніж середній еквівалентний діаметр бульбашок у піні, яку буде створено. Розмір отворів сіток зазвичай доцільно поставити таким, щоб отримати середній еквівалентний діаметр бульбашок в піні в інтервалі від 0,5 до 1 мм, особливо в тих випадках, коли її застосовують для пожежогасіння.

*Наукове видання*

**Шахов** Станіслав Михайлович  
**Виноградов** Станіслав Андрійович  
**Кодрик** Анатолій Іванович  
**Тітенко** Олександр Миколайович

**ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А**

*Монографія*

Підписано до друку 04.09.23. Формат 60x84 1/16.  
Папір офсетний 80 г/м<sup>2</sup>. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 10,8  
Тираж 11 прим. Вид. № 39/23. Обл. вид арк. 6,7.

Підготовано до друку:  
Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94  
[www.nuczu.edu.ua](http://www.nuczu.edu.ua)



Видавець і виготовлювач ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18  
Тел.: 0800336762

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)