ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ
З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

# ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄМНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

**ВОЛОДИМИР БАЛАНЮК**

**ВОЛОДИМИР МИРОШКІН**

**ОЛЕКСАНДР ГАРАСИМ'ЮК**

**ОЛЕГ ГІРСЬКИЙ**

**МОНОГРАФІЯ**

Під загальною редакцією доктора
технічних наук, доцента
**Баланюка Володимира Мірчовича**

Львів – 2025

УДК 504.055 + 614.841.1

Рецензенти:

Професор кафедри радіаційного та хімічного захисту
інституту інженерної та спеціальної підготовки
Національного університету цівільного захисту України
д.т.н. проф. О.О. Кирєєв

Професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища
Та охорони праці Київського національного університету
Будівництва та архітектури
д.т.н., проф. Ю.В. Цапко

Доцент кафедри цивільної безпеки
Навчально-наукового інституту сталого розвитку
ім. Вч. Чорновола НУ «Львівська політехніка»
к.т.н. доцент Ю.В. Кіт

Доцент кафедри охорони праці
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
навчально-наукового інституту цивільного захисту
к.т.н. доц. В.М. Марич

Рекомендовано до друку Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (протокол № від року)

**БАЛАНЮК ВОЛОДИМИР МІРЧОВИЧ**

ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ

ЕФЕКТИВНОСТІ ОБ’ЄМНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ: монографія/за загальною редакцією доктора технічних наук, доцента В.М. Баланюка. 2025 р. 303 с.

В монографії розкрито створення наукових основ підвищення ефективності гасіння пожеж на початковій стадії дією ударних хвиль або їх комбінацій з вогнегасними речовинами.

Виявлено синергічний ефект інтенсифікації процесу припинення горіння газового горючого середовища внаслідок одночасної дії на нього середовища вогнегасних речовин та ударних хвиль, який проявляється у зменшенні проміжку часу припинення горіння та зменшенні їх вогнегасної концентрації порівняно з їх індивідуальними значеннями. При цьому вогнегасна концентрація аерозолю зменшується до 5 разів, вогнегасна концентрація газових вогнегасних речовин зменшується до 6 разів, а вогнегасна концентрація компонентів бінарних газоаерозольних систем зменшується до 10 разів за одночасної дії на дифузійне гомогенне полум'я ударних хвиль з тиском у фронті від 360 Па до 5 кПа та частотою в діапазоні від 8 до 12 Гц. Вперше створені способи гасіння, виходячи з результатів роботи, забезпечують припинення горіння газових горючих середовищ без екологічно небезпечних вогнегасних речовин або з їх мінімальним вмістом до 10 разів. Час гасіння пожежі при цьому значно скорочується та приводить до створення умов надійної безпеки життя та діяльності людини, враховуючи критичні ситуації, що можуть виникати під час пожеж.

Для наукових, науково-педагогічних співробітників, докторантів, аспірантів (ад'юнктів), слухачів, курсантів та студентів, які займаються науковими дослідженнями в сфері пожежної безпеки.

ISBN978-617-95365-6-4
© В.М.Баланюк,2025
© В.С. Мирошкін 2025
© О.І. Гарасим'юк 2025
© О.І. Гірський 2025
© ЛДУБЖД 2025

ЗМІСТ

8

10

1.1 Світова та національна статистика пожеж та їх негативних наслідків… 10

1.2 Сучасне трактування процесів припинення горіння…… 29

1.2.1 Застосування води та водних вогнегасних речовин для пожежогасіння 29

1.2.2 Сучасний стан розроблення і умови застосування вогнегасних порошків та автоматичних систем порошкового пожежогасіння……... 35

1.2.3. Сучасний стан розроблення і умови застосування газових вогнегасних речовин і систем газового пожежогасіння…….. 39

1.3. Сучасний стан розроблення систем пожежогасіння на основі вогнегасних речовин об'ємної вогнегасної дії……... 46

1.3.1. Застосування газових вогнегасних речовин в системах протипожежного захисту об'єктів…….. 55

1.3.2. Аналіз наукової літератури і нормативних документів щодо вогнегасної ефективності газових та аерозольних вогнегасних речовин…… 59

1.4. Вогнегасна ефективність та екологічна прийнятность аерозолевих вогнегасних речовин…… 71

1.5. Фізико-хімічний вплив вогнегасного аерозолю на дифузійне полум'я... 98

РОЗДІЛ 2 МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ….. 104

2.1. Аналіз методик експериментального визначення вогнегасної ефективності суміші вогнегасних речовин…… 104

2.2. Методика визначення вогнегасної ефективності суміші вогнегасної речовини «Камера»…….. 106

2.3. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та об'ємною вогнегасною речовиною для дифузійного полум'я n-гептану $C_7H_{16}$ ……. 108
2.4. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та газовою вогнегасною речовиною дифузійного полум'я n-гептану..……... 111
2.5. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та бінарною сумішшю вогнегасного аерозолю та газової вогнегасної речовини дифузійного полум'я n-гептану……. 113
2.6. Методологія проведення досліджень…… 115
2.7. Висновки за розділом…… 117
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ ТА ЇХ КОМБІНАЦІЙ З ГАЗОВИМИ ТА АЕРОЗОЛЬНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ ДЛЯ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ…….. 119
3.1. Теоретичні основи гасіння дифузійного полум'я ударними хвилями…. 119
3.1.1. Вогнегасні чинники ударних хвиль…….. 131
3.1.2.Процес проходження ударної хвилі через газоаерозольне середовище.. 141
3.2. Механізм комбінованого пожежогасіння ударними хвилями та вогнегасними речовинами об'ємної дії……... 152
3.3. Підвищення ефективності гасіння бінарних газоаерозольних сумішей ударними хвилями…… 160
3.4. Визначення параметрів заряду необхідного для створення ударної хвилі заданої потужності на визначеній відстані……. 164

3.5.Висновки за розділом……. 170
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ УДАРНИМИ ХВИЛЯМИ У КОМБІНАЦІЇ З ГАЗОВИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ-РОЗРІДЖУВАЧАМИ ТА ВОГНЕГАСНИМИ АЕРОЗОЛЯМИ…….. 172
4.1. Експериментальні дослідження з визначення вогнегасної здатності бінарних сумішей вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин – розріджувачів……. 173
4.1.1. Визначення ефективності рецептури АУС для гасіння комбінованим способом…….. 173
4.1.2. Особливості впливу бінарних сумішей вогнегасного аерозолю та газів розріджувачів на дифузійне полум’я n-гептану……... 175
4.1.2.1. Вплив добавок $CO_2$ на температуру дифузійного н-гептанового полум’я…….. 182
4.1.2.2. Вплив співвідношення аерозолю та азоту на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-азотної суміші при гасінні дифузійного полум’я n-гептану……. 184
4.1.2.3. Залежність вогнегасної ефективності БААС при гасінні кінетичного полум’я n-гептану, від зміни концентрації $N_2$ при сталій концентрації аерозолю 45 г/м$^3$…….. 186
4.1.2.4. Обговорення результатів дослідження впливу добавок азоту на вогнегасну ефективність та особливості гасіння БААС кінетичного та дифузійного полум’я н-гептану…….. 189
4.1.2.5. Встановлення ефективних рецептур бінарних газоаерозольних сумішей з високою вогнегасною ефективністю…… 194
4.2. Застосування ударних хвиль для припинення та запобігання горінню газових горючих середовищ…… 195

4.2.1. Математичне планування експерименту для визначення тривалості часу гасіння пожежі ударними хвилями…… 195
4.2.1.1. Складання план-матриці експерименту…… 198
4.2.1.2. Реалізація плану експерименту…….. 198
4.2.1.3. Перевірка адекватності лінійної моделі…… 202
4.3. Визначення вогнегасної ефективності одинарних ударних хвиль…… 213
4.4. Визначення вогнегасної ефективності серій ударних хвиль……. 220
4.5. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем одинарних ударних хвиль та вогнегасних газів…… 225
4.6. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем гасіння серій ударних хвиль та вогнегасних газів…….. 233
4.7. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем на основі ударних хвиль та бінарних сумішей вогнегасного аерозолю та вогнегасних газів $CO_2$, $N_2$…….. 237
4.8. Обговорення результатів експериментів з визначення вогнегасної ефективності комбінованої тернарної системи на основі УХ……... 245
4.9. Висновки за розділом…… 251
Висновки…… 299
Список використаних джерел…… 303

# ВСТУП

Підвищення **е**фективності гасіння та запобігання пожежам та вибухам є актуальним зважаючи на тенденцію постійного зростання пожежного навантаження та розширення спектра горючих речовин, які є вибухопожежонебезпечними. До сучасних засобів пожежогасіння відносять газові, порошкові, пінні, водяні, аерозольні системи пожежогасіння та флегматизації, але їх ефективність та швидкість дії є недостатньою для забезпечення відповідного рівня екологічної та пожежної безпеки. Використання газоаерозольних сумішей та їх поєдання з ударними хвилями дасть змогу суттєво підвищити вогнегасну ефективність, швидкість гасіння такими засобами та відповідно значно зменшити кількість викидів продуктів горіння та засобів пожежогасіння.

Наукові результати з питань створення й удосконалення систем гасіння об'ємним способом висвітлено у роботах А.В. Антонова, В.М. Корольченко, В.Д. Захматова, О.М. Тищенка, В.М. Жартовського, В.Г. Куценко Л. М., Копистинського Ю.О. В їх роботах основна увага приділяється вирішенню питань гасіння горючих середовищ інертними розріджувачами, інгібіторами, їх сумішами та ударними хвилями, вибору оптимальних рецептур аерозольутворювальних складів для забезпечення ефективного гасіння горючого середовища в приміщенні та на відкритому просторі. Також розглядались питання удосконалення характеристик вогнегасних речовин об'ємної дії, які забезпечують високу вогнепригнічувальну ефективність та інші позитивні характеристики, в тому числі і екологічну безпеку зазначених засобів. Поряд з цим відсутність експериментальних даних про вогнегасну ефективність різних комбінацій вогнегасних речовин, зокрема бінарних сумішей вогнегасного аерозолю з добавками газів - розріджувачів та про залежність їх мінімальних вогнегасних концентрацій від їх співвідношень, є перепоною

на шляху створення нових поколінь вогнегасних засобів з можливістю ефективного та швидкого гасіння горючих газових середовищ. А питання вогнегасної дії та екологічної безпеки ударних хвиль та їх комбінацій з об'ємними вогнегасними речовинами взагалі не розглядалось та є недослідженим. Вогнегасний вплив ударної хвилі не передбачає використання хімічних засобів пожежогасіння і відповідно можна говорити про екологічно чистий спосіб пожежогасіння з відсутністю або мінімумом вогнегасних засобів

Таким чином, з позиції екологічної прийнятності питання взаємодії та сумісного впливу компонентів газоаерозольної суміші та ударних хвиль на їх вогнегасну ефективність та час гасіння ними є особливо актуальним, оскільки застосування ударних хвиль значно зменшує час гасіння, а при комбінованому застосуванні і кількість вогнегасної речовини (вогнегасні аерозолі, порошки вогнегасні гази їх комбінації). Ударні хвилі можуть гасити пожежу взагалі без хімічних компонентів, що вказує на їх особливу екологічну цінність при гасінні пожеж.

Розкриття особливостей впливу чинників на процеси гасіння у випадку одночасного застосування вогнегасних речовин об'ємної дії разом з ударними хвилями є актуальною науково технічною задачею, розв'язання якої є науковим підґрунтям підвищення вогнегасної ефективності комбінованих систем вогнегасних речовин об'ємної дії та ударних хвиль та підвищення протипожежного захисту об'єктів різного призначення з можливістю виникнення на них пожеж класів А, В, С, Е.

.

# РОЗДІЛ 1
# АНАЛІЗ СТАТИСТИКИ ПОЖЕЖ, ЇХ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТА СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ

## 1.1. Світова та національна статистика пожеж та їх негативних наслідків

За даними ДСНС України [1-5] щороку кількість пожеж в Україні збільшується і сягає вже понад 70 тис., зокрема, за останні три роки ця кількість зросла на 18 тис.: у 2013 році їх було 61114, у 2014 році – 68879, у 2015 році – 79581, у 2016 році – 74221, у 2017 році – 83116. Значна частка масштабних пожеж та загиблих припадає на промислові об'єкти зі зберіганням та обертанням горючих рідин та газів у великих кількостях.

Наймасштабнішою пожежею за часів незалежності України, що призвела до значних людських і матеріальних втрат, була пожежа, яка виникла 8 червня 2015 року на одному з резервуарів з пальним на території нафтобази групи компаній БРДСМ" у Васильківському районі Київської області [5], внаслідок якої загинуло п'ятеро людей, у тому числі троє рятувальників, та 16 – отримали травми різного ступеня важкості.



Рисунок 1.1 – Пожежа на нафтобазі БРДСМ

Пожежа тривала майже два тижні, на її ліквідацію було задіяно значну кількість особового складу та техніки Державної служби України з надзвичайних ситуацій з декількох областей.

Причиною пожежі став недолік конструкції електроустановок внаслідок чого відбулось коротке замикання електромережі. Витрати на гасіння пожежі оцінили у 50 мільйонів гривень [6].

Пожежі на нафтопереробних заводах виникають по всьому світу і зазвичай характеризуються великими масштабами розповсюдження пожежі та значними матеріальними збитками. Ось, наприклад, у травні 2001 року відбулася велика пожежа в нафтовій компанії "ЛУКОЙЛ" на території нафтопереробного заводу "Петротел-ЛУКОЙЛ" біля міста Плоєшті (Румунія). Вогонь охопив один з резервуарів з бензином, в безпосередній близькості від вогнища загоряння перебували ще п'ять стаціонарних ємностей з пальним, технологічні установки, селище працівників підприємства. Пожежа була ліквідована через 10 годин після її початку.

У серпні 2003 р. в м. Пуертольяно (провінція Сьюдад-Реаль, Іспанія) на нафтопереробному заводі компанії "Repsol YPF SA" стався вибух з подальшим горінням ємностей з нафтопродуктами. Пожежа, тривала близько трьох діб.

У грудні 2005 року сталося три вибухи з подальшим горінням на нафтосховищі Bansfield, яке розташоване за 40 км на північ від Лондона і забезпечує нафтопродуктами південний схід Англії, в тому числі аеропорт Хітроу. Bansfield – 5-е за величиною нафтосховище Великобританії, в якому міститься до 5% всіх нафтопродуктів країни. Пожежа виникла на 20-тьох основних резервуарах з паливом, її ліквідовували більше 60 годин.

У березні 2009 року в м.Мозирі (Білорусь) на території парку світлих нафтопродуктів ВАТ "Мозирський нафтопереробний завод концерну

"Белнефтехим" сталася пожежа в сталевому резервуарі об'ємом 10 тис. $м^3$ для зберігання бензину. В резервуарі зберігалося 3 тис. літрів бензину марки АІ-92. Гасіння тривало більше доби.

В серпні 2009 року в Ханти-Мансійському автономному окрузі на нафтобазі «Конда», яка належить підприємству ВАТ «Сибнефтепровод», сталася велика пожежа: горіли кілька резервуарів з нафтою площею близько 23 гектарів. У резервуарному парку станції розміщені вісім резервуарів типу РВС-20000. На момент виникнення пожежі загальний обсяг нафти, який зберігався на базі, дорівнював 160 тис. $м^3$. Гасіння тривало дві доби.

У жовтні 2009 року на нафтопереробному заводі Caribbean Petroleum поблизу міста Катано (Пуерто-Ріко) вибухнули кілька ємностей для зберігання нафти, що призвело до пожежі. Початковий вибух знищив 11 резервуарів, пожежа, що виникла швидко поширилася на прилеглі резервуари з бензином, авіаційним і дизельним паливом. З 40 резервуарів нафтопереробного заводу було повністю зруйновано 21. Пожежа тривала кілька діб.

В лютому 2011 року на нафтопереробному заводі в місті Байджі в 200 км від Багдада прогримів вибух, який призвів до припинення роботи найбільшого іракського НПЗ. Нафтопереробний завод міста Байджі (приблизно 180 км північніше від Багдада) щодня виробляє 11 млн. літрів бензину, 7 млн літрів бензолу і 4,5 млн літрів гасу. На заводі була сильна пожежа, яка тривала кілька днів.

Що стосується стану безпеки на об’єктах нафтогазового комплексу (підприємства НАК «Нафтогаз України»), то вони експлуатують газотранспортну систему, компресорні станції, газорозподільні станції, підземні сховища газу, систему магістральних нафтопроводів, до яких

входять нафтоперекачувальні станції та резервуарні парки, об’єкти буріння, видобування, переробки вуглеводнів та автозаправні станції.

Що стосується газотранспортної системи України, то до неї входять: магістральні газопроводи – 22,2 тис. км; газопроводи-відгалуження та газопроводи з тиском не більше 1,2 МПа – 14,9 тис. км, 74 компресорні станції, понад 1 600 газорозподільних станцій, 13 підземних сховищ газу та об’єкти інфраструктури, які забезпечують функціонування системи. ПАТ «Укртранснафта», включає в себе 4767 км нафтопроводів, 51 нафтоперекачувальну станцію, 11 резервуарних парків з 79 резервуарами загальною номінальною ємністю 1083 тис. $м^3$, системи електропостачання, захисту від корозії, автоматики, телемеханіки, технологічного зв'язку, протипожежні споруди.

Протягом 2014 року на об‘єктах ПАТ [6] «Укртрансгаз» зареєстрована 1 аварія, яка виникла в результаті стороннього втручання, що спричинило вибух з подальшим загорянням посівів пшениці та витік газу за межі охоронної зони магістрального газопроводу «Уренгой – Помари – Ужгород» та призвело до руйнування лінійної частини магістрального газопроводу. Обсяг витікання природного газу в навколишнє середовище – близько 3 млн $м^3$.

13 травня 2015 року на газорозподільному пункті (ГРП) на вулиці Соборній міста Ірпінь Київської області стався вибух газу. Біля ГРП №5 після проведення ремонтних робіт лопнула газова засувка з наступним загорянням газу. Причина пожежі – порушення правил техніки безпеки під час проведення ремонтних робіт.

Що стосується зріджених вуглеводних газів (далі – ЗВГ), то у роботі [7] відзначається, що хоча при їх транспортуванні, як правило, в аварії бере участь менша кількість небезпечних речовин, ніж на об'єктах, пов'язаних з їх зберіганням, наслідки таких інцидентів, зокрема людські жертви, не

менші. Тому особливу пожежну небезпеку представляють зріджені гази, які миттєво утворюють вибухову газоповітряну суміш, або внаслідок порушення умов зберігання можуть утворювати вибухонебезпечні перекисні сполуки.

В роботі [8] наводиться опис пожежі на сировинному парку ЗВГ АТ «Синтезкаучук» м. Тольятті, яка сталася 4.05.1995 р. Слід зазначити, що вказана пожежа практично аналогічна події в м. Фейзен (Франція). Аварія сталася приблизно в 21 год 25 хв внаслідок витоку ЗВГ (ізобутилен-ізопентанова фракція).

В результаті витоку ЗВГ через запірну арматуру з наступним його займанням і факельним горінням імовірно сталося вигоряння прокладки на фланцевому з'єднанні, через яке почався бурхливий витік палаючого ЗВГ під тиском 0,38 МПа. Полум'ям охопило нижню частину аварійного резервуара і стінку сусіднього з ним резервуара на висоті 5 м.

До моменту прибуття перших пожежних підрозділів площа горіння уже становила приблизно 120 м$^2$. Струмінь палаючого факела виходив за межі обвалування з північної його частини приблизно на 40-45 м. Горіння супроводжувалося сильним гулом і тепловим випромінюванням в північному напрямку від складу. Існувала реальна загроза розриву стінки сусіднього резервуара, в якому зберігалися залишки ЗВГ. У палаючому резервуарі було приблизно 390 м$^3$ ЗВГ. Пожежа була локалізована о 23 год 00 хв і ліквідована о 7 год 15 хв 5 травня 1995 р. У ліквідації пожежі брало участь 130 пожежників.

Також значна загроза виникнення пожеж та вибухів є на хімічно-небезпечних об’єктах (ХНО). В Україні функціонує 931 ХНО, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності 308,07 тис. тон небезпечних хімічних речовин, у тому числі 4,08 тис. тон хлору, 20266 тис. тон аміаку та 101,33 тис. тон інших небезпечних хімічних речовин. Ці

об’єкти розподілені за ступенями хімічної небезпеки таким чином: I ступінь хімічної небезпеки – 65 об’єктів; II ступінь хімічної небезпеки – 128 об’єктів; III ступінь хімічної небезпеки – 178 об’єктів; IV ступінь хімічної небезпеки – 567 об’єктів.

Рівень небезпеки більшості хімічних, нафтохімічних та нафтопереробних виробництв характеризується як моральним старінням застосовуваних технологій, так і ресурсним зношенням, моральним і фізичним старінням основних фондів. Значна кількість технологічного обладнання та транспортних засобів хімічного комплексу не відповідають вимогам безпеки та вичерпали встановлений ресурс експлуатації.

На підприємствах хімічного комплексу значна кількість будівель і споруд потребують капітального ремонту, не всі будівлі і споруди відповідають вимогам будівельних норм. До зниження рівня безпеки хімічних виробництв приводить недосконаліть нормативно-правової бази, яка не забезпечує в нових економічних умовах стимулювання заходів щодо зменшення ризику виникнення надзвичайних ситуацій.

Головними причинами можливого виникнення надзвичайних ситуацій, пов’язаних із небезпечними хімічними речовинами, та незадовільної екологічної ситуації в місцях розташування ХНО є: високий рівень концентрації небезпечних хімічних речовин; високий рівень сировинно- і енергоємного виробництва; застарілі технології та низький рівень застосування прогресивних; ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій; зношення основних фондів підприємств; низька ефективність очисних споруд; низький рівень культури виробництва та порушення проектних; технологічних режимів; фінансові труднощі як ХНО, так і держави загалом.

Ще одними із складних є пожежі на трансформаторних підстанціях через високу напругу і наявність трансформаторного мастила. Так, 1

лютого 2015 року на території заводу ВАТ «Турбоатом» (м. Харків) [5] сталося загорання трансформаторної підстанції з подальшим розповсюдженням вогню на покрівлю ливарного цеху площею 200 м$^2$. На місці пожежі евакуйовано 111 людей. До гасіння пожежі залучалося 18 одиниць техніки та 90 чоловік особового складу ГТУ ДСНС України в Харківській області.

На Черкащині [9] 11 жовтня 2015 року на трансформаторній підстанції виникла пожежа, без світла залишилися частина міста Сміла та кілька населених пунктів. Внаслідок загорання на підстанції, яка перебувала під високою напругою, із трансформатора витекло близько 100 літрів мастила, яке також загорілося на площі 100 м$^2$. Причиною виникнення пожежі стало коротке замкнення у трансформаторі.

У селі Кінецьпіль Первомайського району Миколаївської області на автозаправці загорілися три бензовози. Щоб запобігти вибуху, рятувальники подали два водяних стволи на охолодження цистерн, в яких був бензин. За допомогою пінного та двох водяних стволів ліквідували загоряння на машинах [10].

Аналіз пожеж на об’єктах суб’єктів господарювання, профілактику на яких здійснює державний нагляд у сфері пожежної та техногенної безпеки, свідчить про зменшення кількості пожеж на підприємствах, в організаціях, закладах упродовж 2015 року проти аналогічного періоду 2014 року на 14,9 %, та становить 2168. Унаслідок пожеж на підприємствах, в організаціях, закладах загинуло 28 людей (1,4 % від загальної кількості загиблих унаслідок пожеж).

Що стосується пожеж на підприємствах, організаціях та закладах загальнодержавної власності, то в Україні у 2019 році їх виникло 362 [4], що становить 14,3% від загальної кількості пожеж; прямі збитки складають 29 млн 840 тис. грн, 5,9% від суми прямих збитків на підприємствах, в

організаціях, закладах; побічні збитки – 2 млрд. 938 млн 839 тис. грн, 81,1% від суми побічних збитків на підприємствах, в організаціях, закладах. Внаслідок пожеж на об'єктах загальнодержавної власності загинуло 10 осіб (за 2013 рік – 5 осіб).

Найбільш масштабною пожежею у 2019 році на підприємствах, організаціях та закладах загальнодержавної власності, була пожежа, яка виникла 25 березня 2019 року в Полтаві [4], на вул. Жовтневій, 23, у чотирьохповерховій будівлі академічного обласного українського музично-драматичного театру ім. М. Гоголя. Сталосязагоряння сценічного комплексу театру площею 200 м$^2$. У гасінні пожежі було задіяно 8 одиниць техніки та 32 чоловіка особового складу Управління ДСНС України у Полтавській області. Травмованих та загиблих немає. Внаслідок пожежі вогнем знищені декорації, колосники, освітлювальні прилади, пошкоджене покриття сцени. Прямий збиток від пожежі склав 5 млн 643 тис. грн; побічний – 8 млн 332 тис. грн.

Аналіз причин виникнення пожеж (табл. 1.1) у 2019 році на підприємствах, організаціях та закладах загальнодержавної власності показав, що найбільша їх кількість на зазначених об'єктах виникла від порушення правил улаштування та експлуатації електроустановок – 99 (27,3% від пожеж на об'єктах загальнодержавної власності), внаслідок підпалів – 84 (23,2%) та від необережного поводження з вогнем – 74 (20,4%) [4].

У 2019 році на торговельно-складських спорудах кількість пожеж зменшилась на 16,2 % порівняно з 2015 роком. Загалом на цих об'єктах виникло 828 пожеж. Прямі збитки склали 137 млн 979 тис. грн (+16,3 %). Побічні збитки на цих спорудах склали 213 млн 644 тис. грн (+3,7 %) [5].

Серед транспортних засобів найчастіше горіли легкові (3204 або 75,0% від пожеж на транспорті) та вантажні автомобілі (487 або 11,4%).

Об’єктами пожеж також були 290 автобусів, 71 трактор, 62 причепи, 38 комбайнів іноземного та 20 комбайнів вітчизняного виробництва, 33 одиниці мототранспорту, 17 одиниць спеціальної техніки, 13 трамваїв, 5 тролейбусів тощо.

На одному з об’єктів транспорту [4] 30 травня 2014 року в місті Дніпропетровськ виникла пожежа на території гаража автотранспортного підприємства. Вогнем були охоплені автобуси на території гаража. Для ліквідації пожежі були направлені 5 одиниць пожежно-рятувальної техніки та 22 чоловіки особового складу. Внаслідок пожежі було знищено вогнем 18 транспортних засобів, а саме – 15 автобусів марки «Антон-3250», 1 автобус «Івеко», 1 мікроавтобус «Форд-транзит» та 1 автобус «ПАЗ». Два автобуси марки «Хазар» було врятовано від знищення. Причину пожежі кваліфіковано як підпал.

Таблиця 1.1

Аналіз статистики пожеж на промислових підприємствах
та будівлях і спорудах громадського призначення [1-6]

| **Об’єкти /рік** | **2011** | **2012** | **2013** | **2014** | **2015** | **2016** | **2017** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Споруди виробничого призначення | 508 | 466 | 449 | 517 | 462 | 485 | 502 |
| Торговельно-складські споруди | 816 | 916 | 839 | 987 | 828 | 798 | 806 |
| Соціально-культурні, громадські та адміністративні споруди | 453 | 491 | 395 | 703 | 522 | 514 | 469 |

Прямі збитки від пожеж на цих об’єктах у 2015 році [5] склали 544 млн 568 тис. грн (+6,6 %), 37,4 % від загальної суми прямих збитків;

побічні збитки склали 1 млрд 104 млн 813 тис. грн (-69,6 %) або 26,2 % від загальної суми побічних збитків.

Відповідно через невиконані заходи пожежної профілактики, особливості технологічних процесів, неякісне виконання цих заходів та з інших причин, кожного року виникає близько 2000 пожеж на промислових об’єктах, які завдають лише прямих збитків на понад 500 млн грн..

Відповідно статистика свідчить про динаміку зростання кількості пожеж на заправних станціях, компресорних, трансформаторних підстанціях, резервуарах, електропідстанціях, а також вибухів як результатів, так і внаслідок пожеж. При цьому існує ще цілий ряд так званих складних пожеж, які характеризуються непридатним для дихання середовищем, несприятиливим середовищем, при браку води, а також умовах особливої небезпеки для особового складу – (склади боєприпасів, об’єкти нафтогазової промисловості та ін.).

Згідно з оприлюдненими на сайтах Державної служби з надзвичайних ситуацій України та Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту даними (рис. 1.2), в Україні за період з 2003 по 2016 рік щороку траплялось до 60 000 пожеж, а найбільше їх значення, без урахування окупованих територій Донбасу та АР Крим, а також лісових пожеж, досягнуло у 2015 році – близько 80 000. У 2015 та 2016 роках на пожежах загинуло 1948 та 1872 осіб, а тільки прямі збитки сягнули значень 1458141 та 1626531 тис. грн відповідно.

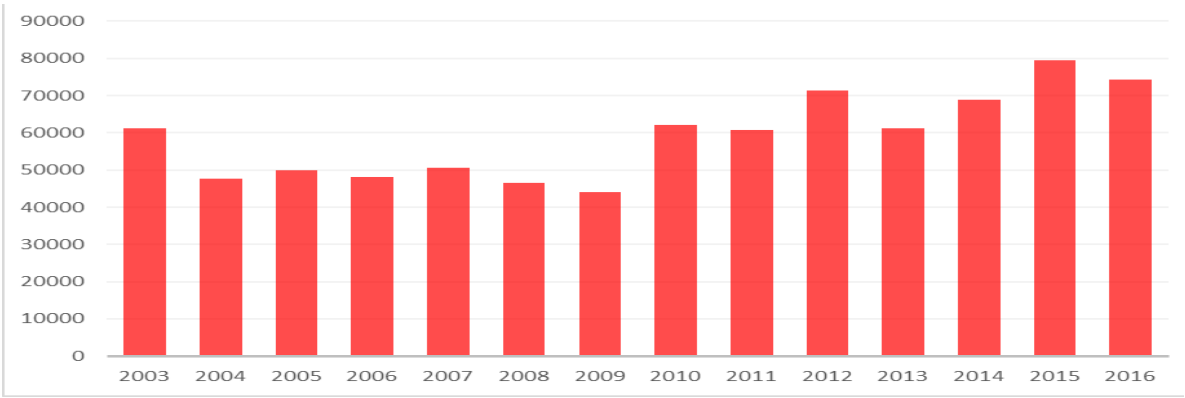


Рисунок 1.2 - Динаміка пожеж в Україні за період з 2003 по 2016 рік за даними сайту УкрНДІЦЗ

Аналіз наведених статистичних даних (табл. 1.2) свідчить, що боротьба з пожежами є світовою проблемою, яка за масштабами втрат може бути порівняна з воєнними діями.

Таблиця 1.2

Динаміка кількості пожеж у деяких країнах світу за 2012-2014 рр. [11]

| | | Кількість пожеж | | | | | в рік |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Країна | Населення, тис. чол. | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | |
| США | 318 907 | 1331 500 | 1 389 500 | 1 375 000 | 1 240 000 | 1 298 000 | 1 326 800 |
| РФ | 144 000 | 179 500 | 168 205 | 162 900 | 152 959 | 150 437 | 162 800 |
| Німеччина | 82 218 | 189 400 | 205 386 | - | - | - | 197 393 |
| Франція | 66 030 | 336 867 | 317 909 | 306 871 | 281 908 | 270 900 | 302 891 |
| Велика Британія | 61 370 | 299 300 | 288 000 | 272 800 | 192 700 | 212 500 | 253 060 |
| Італія | 61 000 | 197 166 | 230 244 | 241 232 | 196 196 | 189 375 | 210 843 |
| **Україна** | **43 001** | **62 207** | **60 790** | **2 443** | **61 144** | **68 879** | **64 893** |
| Польща | 38 492 | 135 555 | 171 839 | 183 888 | 125 425 | 145 237 | 152 389 |
| Казахстан | 17 000 | 19 058 | 15 194 | 16 145 | 13 926 | 14 477 | 15 760 |
| Угорщина | 9 877 | 16 756 | 29 920 | 37 106 | 20 177 | 19 536 | 24 699 |
| Швеція | 9 556 | - | 24 806 | 22 657 | 25 392 | - | 24 285 |
| Білорусь | 9 481 | 10 023 | 35 322 | 34 505 | 7 151 | 7 489 | 18 898 |
| Австрія | 8 544 | 34 363 | 57 994 | 42 213 | 40 395 | 43 336 | 43 660 |
| Швейцарія | 8 238 | - | 13 523 | 14 304 | 12 893 | 11 658 | 13 095 |
| Болгарія | 7 245 | 25 030 | 41 890 | 44 939 | 32 903 | 23 199 | 33 592 |
| Фінляндія | 5 398 | 15 208 | 14 737 | 11 803 | 13 421 | 14 027 | 13 839 |
| Норвегія | 5 109 | 9 480 | 8 146 | 7 369 | 7 318 | 8 672 | 8 197 |
| Литва | 2 943 | 13 411 | - | 11 257 | 11 333 | 13 324 | 12 331 |
| Словенія | 2 063 | 3 770 | 5 198 | 5 570 | 4 175 | 5 917 | 4 926 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Латвія | 2 001 | 8 175 | 8 812 | 8 536 | 9 821 | 12 873 | 9 643 |
| Естонія | 1 313 | 6 439 | 6 321 | 4 973 | 5 745 | 6 871 | 6 070 |

Всього в світі (табл.1.2) трапилось у 2015-2019 рр., 18,3 млн пожеж, при цьому загинуло 178,8 тис. осіб. Щодо розподілу, то близько 24 % пожеж трапляються в житловому секторі, на решті об'єктів та місць – 54,4 %. Причому Україна займає верхні позиції списку щодо кількості пожеж. Так, у 2010 році трапилось 62207 пожеж, а в 2019 – 68879 пожеж. Загалом кількість пожеж як в Україні, так і в світі загалом, коливається і спостерігається невелика тенденція до їх збільшення.

Аналіз причин більшості аварій і пожеж на промислових об'єктах з зберіганням та обертанням горючих рідин та газів показав, що основними з них є: порушення правил техніки безпеки та пожежної безпеки, неякісний монтаж і ремонт електрообладнання, порушення технологічного режиму. З таких причин виникає близько 77% пожеж і вибухів.

При цьому основними причинами виникнення пожеж у 2015 році на промислових об'єктах, були: порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок – 914 пожеж, що становить 36,2% від загальної кількості пожеж на підприємствах, в організаціях, закладах. Необережне поводження з вогнем – 428 пожеж, підпали – 604, що становить 23,9% від загальної кількості пожеж на підприємствах.

В роботі [12] виділено такі статистичні дані про аварійні ситуації (в %), що викликають пожежі, вибухи і аварійну загазованість:

1. Використання несправного обладнання – 59,1%;
2. Порушення технологічного режиму – 26,8%;
3. Пуск несправної технологічної лінії – 7,5%;
4. Порушення правил ремонтних робіт – 4,7%;
5. Недотримання правил зупинки технологічної установки – 1,9%.

Під час пожеж та вибухів за участю горючих газів (ГГ) можуть відбуватися вибухи, закипання, викиди палаючого продукту, розливи рідкої фази ЗВГ, деформація ємностей, аварії комунікацій.

Опис і аналіз характерних пожеж на об'єктах з газобалонним обладнанням, що сталися як у нас в країні, так і за кордоном, дає загальну картину розвитку можливих аварійних ситуацій на об'єктах з газобалонним обладнанням. У статті [13] повідомляється про вибух автоцистерни із зрідженим газом, що стався під час перекачування газу в стаціонарний резервуар. Причиною вибуху став витік газу і його загоряння від працюючого двигуна. Через п'ять хвилин після початку пожежі автоцистерна вибухнула. Дослідження показало, що руйнування сталося при підвищенні температури стінки автоцистерни до 600-650 °С, при цьому тиск досягав 2,9 МПа. Над місцем вибуху протягом 10 с спостерігалася «вогняна куля» діаметром 40 м.

Отже, зважаючи на причини аварій, розглянуті вище та у роботі [12], можна сформулювати основні з них:

1. Механічні пошкодження захисного покриття зовнішніх поверхонь металевих стінок ємностей і подальша електрохімічна корозія, або небезпечний вплив блукаючих струмів.
2. Наявність наскрізних шпар в зварних з'єднаннях.
3. Неякісне затягування фланцевих з'єднань, забоїни і подряпини на ущільнюючих поверхнях.
4. Невідповідність типу, недовговічність і неякісне виготовлення ущільнюючих матеріалів.
5. Неякісна набивка і затяжка сальникових ущільнювачів.
6. Викривлення штоків або забоїни і подряпини на їх поверхні.
7. Невідповідність типу, недовговічність і неякісне виготовлення сальникових ущільнювачів.

Питання пожежної безпеки об’єктів визначаються їх геометричними параметрами, величиною пожежного навантаження, технічним оснащенням системами протипожежного захисту, які повинні забезпечувати швидке виявлення пожежі, увімкнення сигналізації та ліквідацію пожежі в найкоротші терміни з мінімальними матеріальними втратами. Для гасіння пожеж у важкодоступних місцях, наприклад, в кабельних тунелях, зазвичай використовують повітряно-механічну піну, розпилену воду, водяну пару, порошки, інертні гази (азот, діоксид вуглецю, хладон) [7]. Останнім часом почали широко використовувати вогнегасні аерозолі завдяки їхній високій ефективності [14].

Опис випадків пожеж у важкодоступних місцях на промислових об’єктах, реалізовані інженерні підходи щодо протипожежного захисту на них, зроблено у [15-20]. В цих же роботах наведено рекомендації та практичні приклади захисту трансформаторів, від виникнення промислових пожеж та вибухів технологічних установок.

В роботах [21 - 24, 12] зроблено аналіз джерел займання на промислових об’єктах та реалізацію найбільш ефективних заходів для зниження горючості та основних характеристик вогненебезпечності. Наведено найбільш дієві методи гасіння та вогнегасні речовини для гасіння пожеж промислових підприємств різних галузей.

Для гасіння пожеж в гірничих копальнях і тунелях як правило застосовують хладон, азот, двоокис вуглецю [25] та ін. При цьому виникають такі питання, як час і інтенсивність подачі залежно від протяжності та поперечних розмірів пожежного об'єкта, тривалість гасіння і режим вентиляції. Поява високих концентрацій метану поблизу вогнища горіння створює загрозу вибуху і значно ускладнює ліквідацію подібного виду аварій.

Протягом останніх п'ятнадцяти років у шахтах України щорічно реєструється від 6 до 36 ендогенних пожеж [26]. Активним способом було погашено 36%, ізолювальним – 59%, комбінованим способом ліквідовано 5% пожеж. Вони стабільно залишаються на другому місці за кількістю, після екзогенних пожеж і на першому за розмірами заподіяних збитків. Вони завдали від 12 до 40% від втрат, в результаті аварій у вугільній промисловості (наприклад, в 1999 році втрати склали близько 21,4% (8 млн. гривень)). Ендогенні пожежі виникають через самонагрівання вугілля в важкодоступних місцях, таких як вироблений простір, в целіках, за кріпленням підготовчих виробок. Придушення осередків горіння в таких умовах дуже складне, чим і обумовлена найвища тривалість ліквідації цього виду підземних аварій. Визначилася тенденція до збільшення тривалості і трудомісткості їх гасіння. У цій ситуації запобігання або обмеження до безпечних параметрів самонагрівання вугілля – найперспективніший шлях боротьби з ендогенними пожежами.

Також необхідно виділити серед пожежонебезпечних об’єктів ті, де може бути ускладнене гасіння пожеж, об’єкти видобутку нафти і газу, які традиційно характеризуються високим рівнем пожежної небезпеки, що залежить від ряду факторів, з певними параметрами [27]. Ці фактори необхідно враховувати під час розробки заходів ефективного захисту сусідніх об’єктів і особового складу, задіяного на ліквідації палаючих аварійних фонтанів. Процес розвитку пожеж на подібних об’єктах визначається умовами виникнення горіння, які мають імовірнісний характер. Оперативно-тактична обстановка на пожежах газових і нафтових фонтанів обумовлюється інтенсивністю проявів небезпечних факторів, що виникають при аварійному фонтануванні свердловини. Пожежна небезпека бурових майданчиків обумовлена несприятливими метеорологічними умовами, сейсмічними і геотехнічними умовами районів розташування

бурових майданчиків, значною концентрацією технологічного і бурового обладнання, застосуванням бурових розчинів на нафтовій основі, важкодоступністю розташування бурових майданчиків, у зв'язку з чим на бурових майданчиках перебуває значна кількість палива, хімреактивів, обладнання і.т.д.

Одними з складних аварій є пожежі в резервуарах, в більшості випадків вони починаються з вибуху пароповітряної суміші [28]. На утворення вибухонебезпечних концентрацій всередині резервуарів істотно впливають фізико-хімічні властивості нафти і нафтопродуктів, конструкція резервуара, технологічні режими експлуатації, а також кліматичні і метеорологічні умови. Вибух в резервуарі призводить до підриву (рідше зриву) даху з наступним горінням всієї поверхні горючої рідини. При цьому, навіть в початковій стадії, горіння нафти і нафтопродуктів в резервуарі може супроводжуватися потужним тепловим випромінюванням в навколишнє середовище, а висота частини полум'я становить 1-2 діаметра палаючого резервуара. Відхилення факела полум'я від вертикальної осі при швидкості вітру близько 4 м/с становить 60-70 °С.

Таким чином гасити пожежі горючих рідин, особливо їх розливів, газів та газорідинних сумішей проблематично, а процес підготовки потребує тривалого часу, сил та засобів. Щодо екологічних наслідків для біосфери від викидів продуктів горіння, то можна зазначити таке. Вплив на людину відбувається в основному від продуктів горіння Основні чинники впливу на людину показано в табл.1.3.

Таблиця 1.3

Небезпека для людини та навколишнього середовища наслідків гасіння пожеж

| Вид вогнегасних речовин | Горіння та гасіння горючих рідин | Горіння та гасіння твердих горючих речовин | Горіння / гасіння газових речовин | Горіння та гасіння пожеж A,B,C,E комбінованими системами на основі УХ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Забрудення атмосфери | $CO_2$, CO, NxOx, C, $H_2S$, $SO_2$, HCN, HCHO, $CH_3COOH$, $H_2SO_4$, Хладонів, $CL_2$ $Br_2$, $F_2$. | Викид $CO_2$, CO, NxOx, C, $H_2S$, $SO_2$, HCN, HCHO, $CH_3COOH$ тверді мінеральні аерозольні частинки. | Викид $CO_2$, CO, NxOx, C, $H_2S$, $SO_2$, HCN, HCHO, $CH_3COOH$, / Хладонів, $CL_2$ $Br_2$, $F_2$. | В невеликих кількостях викид $CO_2$, $N_2$, $H_2O$ та менші в 5-10 разів концентрації вогнегасних речовин. |
| Забруднення грунтів | ПАР Продукти взаємодії вогнегасних речовин та продуктів | ПАР | ПАР Органічні продукти взаємодії, невикористана вогнегасна речовина | ПАР Органічні продукти взаємодії Невикористана вогнегасна речовина |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | горіння | | | |
| Забруднення грунтових вод | ПАР<br>Органічні забрудники продукти взаємодії вогнегасних речовин та продуктів горіння | ПАР | ПАР<br>Органічні продукти взаємодії, невикористана вогнегасна речовина | ПАР<br>Органічні продукти взаємодії, невикористана вогнегасна речовина |
| Забруднення водних ресурсів | ПАР | ПАР | ПАР | ПАР<br>Органічні продукти взаємодії, невикористана вогнегасна речовина |

В таблиці 1.3 наведено дані щодо питомих викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря у разі згоряння нафти та нафтопродуктів на поверхні згідно з методичними вказівками «Розрахунок викидів шкідливих речовин в атмосферу у разі вільного горіння нафти і нафтопродуктів», розробленими до практичних робіт за курсом.

Таблиця 1.4

Питомі викиди шкідливих речовин у разі горіння
нафти і нафтопродуктів на поверхні [ 29]

| Забруднювач атмосфери | Хімічна формула | Питомі викиди шкідливої речовини, кг/кг$^{-1}$ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | нафта | дизельне паливо | бензин |
| Діоксид вуглецю | $CO_2$ | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| Оксид вуглецю | CO | 0,0840 | 0,0071 | 0,3110 |
| Сажа | C | 0,1700 | 0,0129 | 0,0015 |
| Оксиди азоту (у перерахунку на $NO_2$) | $NO_2$ | 0,0069 | 0,0261 | 0,0151 |
| Сірководень | $H_2S$ | 0,0010 | 0,0010 | 0,0010 |
| Оксиди сірки (у перерахунку на $SO_2$) | $SO_2$, $SO_3$ | 0,0278 | 0,0047 | 0,0012 |
| Синильна кислота | HCN | 0,0010 | 0,0010 | 0,0010 |
| Формальдегід | HCHO | 0,0010 | 0,0011 | 0,0005 |
| Органічні кислоти в перерахунку на $CH_3COOH$ | $CH_3COOH$ | 0,0150 | 0,0036 | 0,0005 |

З урахуванням наведених питомих викидів шкідливих речовин у разі горіння нафти і нафтопродуктів на поверхні та беручи до уваги, що під час пожежі на нафтобазі ТОВ «БРСМ-нафта» 8-20 червня 2019 р за оприлюдненими даними згоріло приблизно 18000 т нафтопродуктів, можна зробити висновок, що в атмосферне повітря при цьому було емітовано

орієнтовно 18 000 тон $CO_2$; 126 тон CO; 234 тон сажі; 468 тон $NO_2$, 18 тон $H_2S$, 84,6 тон $SO_2$, 18 тон HCN, 20 тон HCHO, 84,6 тон CHCOOH.

## 1.2. Сучасне трактування процесів припинення горіння

### 1.2.1. Застосування води та водних вогнегасних речовин для пожежогасіння

На сьогодні найчастіше для гасіння твердих горючих матеріалів, горючих рідин та газів використовують воду, її розчини, та пінні системи на її основі. Це пов'язано з її доступністю, значною теплоємністю, високою теплотою випаровування, нетоксичністю та відносно високою вогнегасною ефективністю. Аналіз науково-технічної та патентної літератури свідчить про те, що постійно ведуться дослідження, спрямовані на отримання альтернативної воді вогнегасної речовини, яка б не поступалася в універсальності, дешевизні, зручності у використанні та транспортуванні і була відносно екологічною та безпечною.

Відомі установки газоводяного пожежогасіння типу АГВТ досить позитивно себе зарекомендували під час гасіння газових фонтанів, але вони не придатні як генератори інертного середовища для замкнених технологічних об'ємів різного призначення, віддалених від установки більше ніж на 15-25 м [30].

На даний час в підрозділах ДСНС України відсутні мобільні високопродуктивні установки дистанційного гасіння пожежі в закритих та напівзакритих приміщеннях. Використання такої технології гасіння

пожежі газоводяними сумішами стримувалося через відсутність визначення необхідних параметрів їх утворення та подачі, які забезпечували б ефективність припинення горіння.

Вода стала найбільш широко використовуваною вогнегасною речовиною [31], оскільки її ефективність під час гасіння пожеж важко перевершити. Теплові характеристики води роблять її ідеальною вогнегасною речовиною. Зміна фази з рідкої на пару може додатково сприяти гасінню пожежі завдяки зниженню концентрації кисню в навколишній атмосфері, зокрема, коли вогонь є в закритому об’ємі.

Прогрес в області досліджень і застосування систем водяної пари для гасіння пожеж значно пришвидшився за останнє десятиліття. Огляд вогнегасних механізмів і чинників, що впливають на продуктивність водяної пари [32], таких як дисперсні характеристики, вплив на корпус, динамічне змішування, використання добавок і методів генерації водяної пари, проведений в роботі [32].

Огляд [32] показує, що вогнегасні механізми і роль аерозольних характеристик у гасінні пожеж є добре зрозумілі і визначені. Водяна пара не поводиться як газоподібний агент в гасінні пожеж. Ефективність системи водяної пари в гасінні пожеж залежить від характеристик розпилення (розподілу та розміру крапель).

Підвищення ефективності гасіння за допомогою води може бути досягнуто як завдяки поліпшенню диспергування води, так і шляхом введення в неї різних добавок [33]. Як добавки для досліджень використовують такі сполуки: NaCl, KCl, LiI, $CH_3COOK$, $COCl_2$, $NiCl_2$, NaOH, $NaHCO_3$, $MgCl_2$, $CaCl_2$, $MnCl_2$, $FeCl_2$ і інші. Встановлено, що деякі із сполук є більш ефективними інгібіторами горіння, ніж фреони, зокрема $CF_3Br$. Тому вони розглядаються як перспективні добавки до води для збільшення ефективності при гасінні полум'я. Як показали результати

лабораторних експериментів, найбільш ефективними є комплексні сполуки калію і заліза [32]. Однак, ефективність лабораторних експериментів, не завжди відповідає ефективності при гасінні великомасштабних вогнищ пожеж.

Вогнегасна ефективність води як правило залежить від довжини струменя, дисперсності, концентрації добавок неорганічних солей у воді в якості добавок. Та основне при гасінні водою – це необхідність забезпечення так званої вогнегасної витрати, яка однакова для більшості горючих матеріалів, які перебувають на об'єктах – 0,05 л·с/м$^2$-0,3 л·с/м$^2$ [34]. А при гасінні легкозаймистих та горючих рідин становить навіть 0,5 л·с/м$^2$ і більше.

При гасінні стволами пожеж в резервуарних парках ефективно можна використовувати воду лише для охолодження стінок резервуарів, загасити полум'я струменями води при цьому не вийде, але їх можна використовувати для захисту і охолодження сусідніх резервуарів та особового складу, використовуючи розпилені струмені води.

Також для формування захисних завіс під час проведення оперативних дій на технологічних установках хімічної, нафтохімічної, нафтопереробної промисловості та на деяких інших підприємствах, застосовують турбінні та щілинні розпилювачі НРТ-5, НРТ-10, НРТ-20, РВ-12, а також стволи Protec 366. Насадки-розпилювачі НРТ-5, НРТ-10 та РВ-12 встановлюють на ручні стволи РС-70 замість стандартної насадки. Насадку-розпилювач НРТ-20 встановлюють замість стандартної на лафетний ствол ПЛС-П20.

Дисперсна вода може подаватись і через насадки – розприскувачі, які забезпечують утворення крапель мікронних розмірів.

Характеристики дисперсних водних систем наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Загальні характеристики вогнепригнічувальної ефективності вогнегасних речовин [35-37]

| Вид вогнегасних речовин | Хімічна основа | Приклади | Вогнегасна концентрація Час гасіння | Клас небезпеки |
|---|---|---|---|---|
| Твердофазові (вогнегасні порошки)<br>АВС<br>ВС<br>АВСD<br>ЦП | ФАС<br>ГН, СК, ССК<br>ФАС+ХК<br>Спец. композиції | П-2АПМ; Р-11-24; Вексон АВС; Пірант-А; Пірант-АН<br>Фактор АВС-40<br>ПСБ-3; Вексон ВС; Monnex; Карате<br>П-2АК<br>ПГС; МГС; $CaF_2$; СИВК; ПС-1; ПХ; ПМГС; РС; Си-2; СаО | 100-200 г/м$^3$<br>При досягненні вогнегасної концентрації | 3-4 |
| Рідиннофазові неводні | $C_2F_4Br_2$<br>$C_6F_{12}O$ | Хладон2402<br>NOVEC1230 (хладон ФК-5-1-12, «СВ») | 5-20% | 1-3 |
| Рідиннофазові водні $H_2O$+ПАР | $H_2O$+ПАР | Дослідні зразки Вода зі змочувальниками | 500 -900 г/м$^3$ | 3-4 |
| Рідиннофазові водопінні | $H_2O$+піноутворювачі | Пірена 1; Пірена2; Пірена 3; Альпен; Альпен М; Пегас; Сніжок; Пайрокул; ПО-63РЗ; ПО-63М (Морпен); ПО-РЗФ; ПО-РЗП «Заполярний» | 50 - 200 г/м$^3$ | 2-3 |

Деякі резервуари обладнують сухотрубами, через які подають розчин піноутворювача. Але пожежа в резервуарі з горючою рідиною як правило починається з вибуху, при якому ці сухотруби нерідко руйнуються. При цьому пожежу загасити стає ще складніше. Також нерідко при тривалому зберіганні піноутворювача він втрачає свої робочі характеристики через протермінування та відсутність заміни. При подачі на гасіння такий піноутворювач не забезпечує потрібної вогнегасної ефективності. Таким чином, для забезпечення надійного гасіння пінними засобами існує так званий момент пінної атаки, коли піна подається з декількох пристроїв одночасно щоб випередити її руйнування в результаті дії вище перелічених факторів.

При цьому ситуація з прийомами та засобами гасіння резервуарів з горючими рідинами могла би бути кращою, оскільки існує ряд факторів, які на даний час заважають досягненню таких параметрів гасіння цих пожеж, як швидкість, надійність, дешевизна, відсутність супутніх втрат та збитків. Крім цього, процес гасіння потребує постійного дієвого контролю за цими процесами, а тут основну роль відіграє людський фактор, оскільки пожежні підрозділи забезпечують гасіння у відповідних місцях, створюючи відповідну інтенсивність подачі вогнегасного засобу.

Час початку гасіння водою або піною, як правило, становить в кращому випадку від 10 хвилин і більше – що складає час прибуття та бойового розгортання пожежних підрозділів. За цей час деякі пожежі значно збільшують свою площу і гасіння подеколи потрібно проводити більшою кількістю підрозділів.

Засоби та прийоми гасіння при цьому є незручними, трудомісткими, потребують присутності людей в небезпечних зонах пожежі – горіння, теплового випромінювання, задимлення. При цьому гасіння відбувається особовим складом в умовах, коли для людей необхідний захист органів

дихання, обмеження дії теплової радіації. Такі умови майже завжди межують з небезпекою отримання травм різноманітного походження, особливо коли гасіння проводиться за наявності токсичних продуктів горіння, сильного теплового випромінювання або елементів під електричною напругою.

Гасіння пожеж горючих рідин, струменів газів, твердих горючих речовин на відкритому просторі є ще проблематичнішим, оскільки жоден із сучасних вогнегасних засобів не забезпечує швидкого та ефективного гасіння. Деякі винятки щодо швидкості подачі, а відповідно і гасіння, можна зробити для порошкових, газових, пінних та водних вогнегасних засобів, для невеликих об’ємів та площ. При цьому в більшості випадків, вода використовується в дисперсному стані та також потребує досягнення необхідної інтенсивності витрати, яка б забезпечила необхідну ефективність гасіння. Негативними властивостями води є її мала в'язкість і високий поверхневий натяг. Тому на практиці для пожежогасіння широкого застосування набувають порошки і піни.

Зокрема для гасіння пожеж на промислових, торгових підприємствах, складах, транспортних засобах та у житловому секторі широко застосовують піноутворювачі загального призначення.

Піноутворювачі загального призначення придатні для отримання піни низької, середньої та високої кратності, а також змочувальних розчинів. Такі піноутворювачі призначені для гасіння пожеж класів А (підкласи А1, А2) та В (підклас В1) [35], тобто твердих горючих речовин і матеріалів (за винятком тих, які вступають у хімічну взаємодію з водою) та водорозчинних горючих рідин.

Згідно зі стандартами [36, 37] встановлюється номенклатура показників якості піноутворювачів, а також технічні вимоги до них та методи їх випробувань. Основою піноутворювачів є поверхнево активні

речовини (ПАР), які забезпечують можливість генерування піни і зниження поверхневого натягу водних розчинів, а також можуть забезпечувати здатність утворювати плівку на поверхні горючої рідини, яка зменшує дифузію горючих парів з неї. За хімічним складом піноутворювачі поділяються на такі, що виготовлені із синтетичної сировини, і такі, що виготовлені переважно із сировини природного походження (з добавками синтетичних ПАР та інших речовин чи без них) [38]. На етапі гасіння вогнегасну ефективність піни можна покращувати шляхом підвищення її кратності. Практика підрозділів ДСНС [39] свідчить, що вогнегасна ефективність піни середньої кратності в 2–5 разів більша від вогнегасної ефективності піни низької кратності.

Але у більшості випадків піноутворювачі мають слабку морозостійкість і досить малий термін експлуатаційних властивостей при значній вартості.

Вогнегасну піну застосовують для гасіння великих займань, а в решті випадків переважно для малих об’єктів чи технологічних устаткувань використовується порошок.

### 1.2.2. Сучасний стан розроблення і умови застосування вогнегасних порошків та автоматичних систем порошкового пожежогасіння

В забезпеченні пожежної безпеки промислових [40] об’єктів помітне місце займають установки порошкового пожежогасіння. Незважаючи на те, що вони мають високу ефективність дії, їх застосування є обмеженим, тому що існує ймовірність відмови в роботі, яка сягає 30%. Відмови установок з збереженням газу під тиском відбуваються через його витікання з балона чи резервуара установки. Наявність газу під тиском

накладає особливі вимоги щодо монтажу, обслуговування і температурного режиму під час експлуатації установок. Це у певних випадках обмежує їхні функціональні можливості і область застосування. Існуючі схеми підготовки порошку не завжди забезпечують необхідну якість відновлення його текучості, тому що після підготовки в ньому містяться включення газових бульбашок і грудок порошку. Це призводить до порушення параметрів його витиснення з резервуара і транспортування по трубопроводу, знижує надійність і ефективність дії установки.

В роботі [41] зроблено цікаве порівняння вогнегасної дії надтонких порошків гідроксиду магнію і комерційних сухих порошків та їх ефективностей під час гасіння пожеж. Аналізуючи результати, можна зробити висновок про те, що тиск, розмір часток, і мікроскопічна структура поверхні порошків – саме ці фактори беруться до уваги під час гасіння пожежі. Порівнюючи дисперні порошки з гідроксиду магнію із комерційними вогнегасними порошками можна вказати на їх кращі вогнегасні властивості під час засіння пожеж, при цьому час гасіння становить менш ніж 10 секунд.

Засоби пожежогасіння на основі порошків є універсальними за своїм активним впливом на різні матеріали: електрообладнання (навіть під напругою), мінеральні масла, вугілля, дерево, шахтну конвеєрну стрічку і т.д. Крім того, дрібнодисперсний порошок при високій температурі розплавляється і спікається, утворюючи тверде склоподібне покриття типу плівки, що перешкоджає проникненню кисню до осередку горіння. Як встановлено [42], частки порошку, перебуваючи в потоці повітря в завислому аерозольному стані, утворюють хмару з вмістом порошку 70-150 г/м$^3$, при якому не можливе горіння полум'я. На сьогодні ще не сформовано єдиної думки щодо механізму вогнегасної дії порошків. Автори роботи [43] при дослідженні великої групи солей у вигляді

порошку встановили, що одні порошки слабо впливають на швидкість горіння, а інші, навіть при незначній концентрації, різко знижують швидкість поширення полум'я. Порошки першої групи, так звані термічні порошки, а саме силіцій, алюміній, купрум оксиди, алюміній сульфат, магній карбонат та ін., діють тільки як холодна стінка, знижуючи кінетичну енергію активних частинок. Інша група порошків (сульфати, галогеніди лужних металів та ін.) діє значно ефективніше завдяки значній інгібувальній здатності.

В роботі [44] при визначенні ефективності гасіння полум'я метану порошками солей лужних металів виявлено, що дія порошків проявляється в охолодженні палаючих газів завдяки відведенню тепла. Але цієї кількості відведеного тепла недостатньо для того, щоб повністю припинилося горіння. Часто недостатнє ознайомлення з основними факторами дії порошків на вогнища пожеж різних класів часто призводить до неправильного застосування тих чи інших марок порошків в умовах реальних пожеж [45]. Зокрема низька охолоджувальна здатність більшості порошків є одним із основних недоліків, що унеможливлює їх використання для успішного гасіння пожеж класу А 1. Реальний охолоджувальний ефект порошку становить не більше 10-20% від загальної кількості тепла, що виділяється при горінні [46]. При порошковому пожежогасінні порошок подається, як правило, протягом 5-30 секунд, гасіння пожежі відбувається вже через 2-8 секунд після подачі вогнегасного порошку. Надалі відбувається самостійне охолоджування конструкцій. Вогнегасна концентрація порошку утримується не більше 5 секунд, а потім знижується і за наявності конструкцій, які мають температуру вищу за температуру займання горючих матеріалів або прихованих осередків тління, можливе повторне займання [47]. В умовах розвинутої пожежі на ділянках, які були загашені порошками, вже через

20-30 секунд може виникнути повторне горіння і пожежа буде розвиватися з попередньою інтенсивністю [48].

Досвід експлуатації та випробувань показує, що одним із суттєвих недоліків конструкції порошкових вогнегасників є, що офіційно закріплено нормативним документом, неповнота виходу вогнегасної порошкового складу (ВПС), на рівні не більше 15% [49]. Є підтверджені факти, коли залишок ВПС в корпусі вогнегасника досягав у середньому близько 30% [49]. На жаль, це не поодинокі випадки, тому вони потребують самостійного вивчення, оскільки підривають довіру споживача до первинних засобів пожежогасіння, покликаних захищати людину і його майно на початковому етапі загоряння.

Оскільки, як зазначалося вище, однією з необхідних умов припинення гетерогенного безполуменевого горіння твердих горючих матеріалів є ізолювання та охолодження їх поверхні, то при виборі порошку необхідно врахувати також його здатність поглинати тепло під час нагрівання та фазових фізико-хімічних перетворень. За твердженням авторів [31,41,44,45] найкращими показниками у цьому відношенні характеризуються фосфати та форміати амонію. Результати проведених розрахунків показали, що охолоджувальна дія порошків визначається в основному теплотою, яка поглинається при ендотермічному розкладі компонентів вогнегасних порошків. Вклад теплоємності невеликий і становить всього 11,6-18,1%.

В таблиці 2.1 представлені результати розрахунків теплопоглинальної здатності цих речовин в діапазоні температур 25-600°С [31,40,43,44].

Таблиця 1.6

Теплопоглинання вогнегасних порошків при 25-600°С [31,40,43,44,45]

| Вогнегасн | Теплопогл | Сумарне | Вклад в | Вогнегасн | Екологічна |
|---|---|---|---|---|---|

| ий порошок | инання в результаті фізико-хімічних перетворень, кДж/кг | теплопоглинання при нагріванні до 600°С, кДж/кг | теплопоглинання завдяки теплоємності, % | а концентрація г/м$^3$ | небезпека |
|---|---|---|---|---|---|
| ПСБ-3 | 750 | 890* | 15,0 | До 150 | Помірна |
| П-1А | 1420 | 1620 | 12,6 | До 150 | Помірна |
| Пирант-А | 1450 | 1770 | 18,1 | До 150 | Помірна |
| ПФ | 1500 | 1700 | 11,6 | До 150 | Помірна |

* нагрівання до 230°

Отже, для забезпечення високого рівня гасіння в компонентах вогнегасних порошків необхідно використовувати речовини, які мають не лише високу теплоємність, а й схильні в інтервалі температур 26-600°С до фізико-хімічних перетворень зі значними ендотермічними ефектами. Та оскільки теплоємність твердих речовин невисока (наприклад, у порівнянні з водою) і температурний інтервал обмежений (умови нагрівання твердих речовин в полум'ї), першу умову виконати складно. Тому для забезпечення високого рівня теплопоглинання необхідно вибирати речовини, які легко розкладаються, фізико-хімічні перетворення яких протікають з великими ендотермічними ефектами. Сучасні вогнегасні порошки містять такі компоненти.

### 1.2.3. Сучасний стан розроблення і умови застосування газових вогнегасних речовин і систем газового пожежогасіння

Набагато вищу вогнегасну ефективність та тривалість захисту проявляють вогнегасні гази – $CO_2$, $N_2$, Ar, He та їх суміші.

Ефективність застосування автоматичних систем газового пожежогасіння загально відома [50]. Сучасні газові вогнегасні речовини, які набули широкого застосування, сааме: в автоматичних системах газового пожежогасіння об'ємним способом, розподіляються за своїм агрегатним станом на зріджені, рідинні та стиснені. До першої групи належать: хладон 125 ($C_2F_5H$); хладон 227еа ($C_3F_7H$), хладон 23 ($CF_3H$), хладон 218 ($C_3F_8$), хладон ТФМ-І (хладон 23, $CF_3H$ – 90 % (мас.) + йодистий метил, $CH_3I$ – 10 % (мас.)), хладон 1311 ($CF_3I$), шестифториста сірка ($SF_6$), діоксид карбону ($CO_2$). До другої групи належать: хладон 2402 ($C_2F_4Br_2$), хладон 21711 ($C_3F_7I$), ФК-5-1-12 ($CF_3CF_2C(O)CF(CF_3)_2$) (торгова назва Novec 1230). До групи стиснених газових вогнегасних речовин належать: галон 1301 ($CF_3Br$); азот ($N_2$). аргон (Ar), аргоніт (азот-50 % (об.)+аргон – 50 % (об.)), інерген (азот – 52 % (об.)+аргон – 40 % (об.)+8 % (об.) $CO_2$).

Наприкінці 20 сторіччя було виявлено, що такі ефективні за вогнегасною та флегматизувальною здатністю хладони, як галон 1301 ($CF_3Br$), хладон 2402 ($C_2F_4Br_2$), мають високий озоноруйнівний потенціал, що призводить до руйнування озонового шару Землі у разі їх проникнення до верхніх шарів атмосфери [51-53]. У зв'язку з цим, у всьому світі поширились дослідження стосовно пошуку альтернативних екологічно прийнятних вогнегасних речовин.

На даний час накопичено як позитивний, так і негативний досвід застосування таких засобів пожежогасіння. Практика висвітлила

специфічні особливості аерозольного пожежогасіння, які слід враховувати, щоб не отримати протилежний до бажаного результату. З метою розширення сфери застосування таких засобів пожежогасіння та кваліфікованого їх застосування на ринку України актуальними залишаються дослідження з поглиблення знань щодо флегматизувальних та вогнегасних властивостей аерозольних вогнегасних речовин.

Як відомо, однією з переваг такого виду вогнегасної речовини над іншими є досить тривалий проміжок часу, протягом якого в об’ємі, який є об’єктом протипожежного захисту, концентрація вогнегасного аерозолю суттєво не змінюється. Ця особливість відкриває перспективу використання такої дисперсної системи як «газ – тверда фаза» для перетворення горючих газових середовищ на негорючі, тобто їх флегматизування. Поряд із високою економічною ефективністю, яка полягає в значному зниженні матеріальних збитків від пожеж на захищених об'єктах, збільшуються витрати на технічне обслуговування систем протипожежного захисту.

На сьогодні важливе місце в дослідженнях і розробках у сфері протипожежного захисту займає напрямок, пов'язаний з вдосконаленням об'ємного способу пожежогасіння. В індустріально розвинених країнах об'ємний спосіб гасіння з використанням газів, хладонів домінує у захисті обчислювальних центрів, машинних залів, транспортних засобів, багатьох промислових об'єктів. Об'ємний спосіб гасіння пожеж забезпечує не тільки швидке припинення процесу горіння в будь-якій точці об’єму, що захищається, але і розбавлення його горючого газового середовища. В роботі [54] запропоновано підвищення рівня протипожежного захисту технологічних процесів шляхом розбавлення горючих середовищ азотом, отриманим з повітря методом його розділення мембранними установками. Але такий спосіб отримання азоту є дорогим і має обмежене застосування.

В роботі [24] запропоновано запобігати займанню горючих середовищ, які можуть виникнути на компресорних станціях, газотурбінними приводами – газовими вогнегасними речовинами. Також автор вказує, що застосування газів- розріджувачів підвищує температуру самозаймання, що робить процес безпечнішим. Автор [55] пропонує створювати інертне середовище в приміщеннях кораблів видаленням із приміщень частини газового середовища, яке містить кисень, працюючими енергетичними установками, включеними в режим забору повітря.

Іноді спосіб об'ємного гасіння застосовують для протипожежного захисту локальної ділянки у великих об’ємах, але при цьому передбачається підвищена витрата вогнегасних речовин.

Вищенаведені способи гасіння та запобігання горінню є досить складними та вартісними і потребують на об’єктах запасів газів-флегматизаторів.

Поряд з тим, на теперішній час набули широкого застосування аерозольні системи пожежогасіння, застосування вогнегасного аерозолю в якості флегматизатора розглядається переважно на рівні експериментальних досліджень.

Як відомо, горіння більшості вуглеводневих речовин припиняється у разі зниження вмісту кисню у горючому середовищі до 12-15 %, а для речовин, які характеризуються широкою областю займання (водень, ацетилен), металів (калій, натрій та ін.), деяких гідридів металів і металоорганічних з'єднань, тліючих матеріалів – до 5 % і менше. У табл. 1.6 наведено граничний вміст кисню, за якого ще підтримується горіння горючих речовин при розбавленні середовища інертними розріджувачами.

Таблиця 1.7

Граничний вміст $O_2$ при розбавленні газоповітряного середовища (%) [56]

| Горюча речовина | % вміст в атмосфері газового компонента | |
|---|---|---|
| | Вуглекислий газ | Азот |
| Метан | 16,0 | 13,0 |
| Бутан | 16,0 | 13,0 |
| Пропілен | 14,0 | 12,0 |
| Ацетилен | 9,0 | 6,5 |
| Бавовна | 6,0 | 4,0 |
| Водень | 7,0 | 5,0 |
| Калій | - | 5,0 |
| Натрій | - | 5,0 |

У хімічних перетвореннях, що супроводжують горіння органічних речовин, інертні розріджувачі участі не беруть. Вогнегасна ефективність їх тому невисока. Для більшості горючих речовин і матеріалів вогнегасна концентрація газових вогнегасних речовин- розріджувачів за об'ємного способу гасіння становить 0,6-0,8 кг/м$^3$ [23]. У разі застосування діоксиду карбону летальна концентрація його становить близько 10 %. Разом з тим, вогнегасні концентрації азоту і діоксиду карбону становлять відповідно 33 % (від.) і 22 % (від.), тобто виявляються вище небезпечних для людей концентрацій [21].

Усім вогнегасним речовинам, у тому числі газовим вогнегасним речовинам-розріджувачам, притаманні як переваги, так і недоліки.

До недоліків газових вогнегасних речовин-розріджувачів, насамперед, слід віднести такі:

- для забезпечення протипожежного захисту об’єкта потрібна значна кількість балонів, отже, значні витрати на їх обслуговування;
- вогнегасна концентрація зазначених вогнегасних речовин у 3-5 разів вища, ніж небезпечна для людей, тому потрібна наявність витяжної вентиляції.

Не рекомендується застосовувати установки газового пожежогасіння при гасінні волокнистих, сипучих і пористих матеріалів, у яких можливе горіння всередині шару у вигляді тління; хімічних речовин, здатних окислюватися без доступу повітря; хімічно активних металів; пірофорних матеріалів.

На даний час установки газового пожежогасіння за поширеністю стоять на третьому місці після водяних і пінних систем і складають близько п’ятої частини від загального числа автоматичних установок пожежогасіння. За кордоном газові установки поступаються тільки водяним установкам, випереджаючи за загальним числом і темпами розвитку застосування систем порошкового і пінного пожежогасіння.

Для більшості горючих речовин вогнегасна концентрація двоокису вуглецю становить 20-30 % (об.), при практичному гасінні пожежі вона приймається не менше 30% по об’єму або 0,637 кг/м$^3$ для приміщень категорії В та 0,768 кг/м$^3$ для категорій А і Б [57]. Випадки застосування твердого $CO_2$ для охолодження горючої речовини до температури, нижчої за температуру запалювання, настільки рідкісні, що враховуючи ефективність гасіння, ними можна знехтувати [58, 59].

Одним із поширених флегматизаторів- розріджувачів є азот, на базі якого створено сучасні системи пожежогасіння. Це обладнання ефективне для запобігання і ліквідації вибухів, пожеж на об'єктах нафтогазового комплексу, на хімічних, нафтохімічних і інших підприємствах. У багатьох випадках вони являють собою єдиний тип обладнання, що застосовується для гасіння важкодоступних вогнищ пожежі, як наприклад, в шахтах [58].

Азот використовується для гасіння горючих парів та газів, для продувки і осушення ємностей і апаратів від залишків газоподібних або рідких горючих речовин. Балони зі стисненим азотом в умовах розвиненої пожежі становлять небезпеку, оскільки можливий їх вибух внаслідок

зниження міцності стінок за високої температури і підвищення тиску газу в балоні при нагріванні. Азот не можна застосовувати для гасіння магнію, алюмінію, літію, цирконію та інших матеріалів, які утворюють нітриди, що здатні вибухати. У цих випадках в якості інертного розріджувача застосовують аргон, значно рідше – гелій [59].

Застосування в пожежогасінні інертного газу аргону вважається одним з найбільш екологічно чистих способів захисту. Аргон особливо добре підходить для гасіння пожеж, пов'язаних з електрикою. Його характеристики особливо підходять для використання в серверних залах та інших подібних приміщеннях.

Аргон не чинить руйнівного впливу на озоновий шар і не сприяє процесу глобального потепління. Аргон застосовується для гасіння пожеж класу A, B, C та E і вважається одним з найбільш екологічно прийнятних газів для гасіння. Цей газ відносять до чистих речовин, які не залишають слідів і не призводить до утворення шкідливих продуктів розкладання при контакті з полум'ям [60,61].

Аргон усуває горіння шляхом зниження концентрації кисню в повітрі. Принцип роботи інертних газових систем полягає у зниженні концентрації кисню в атмосфері до рівня, який не підтримує горіння (нижче 14%). Кількість цієї речовини завжди точно розраховується, щоб не перевищити допустимі норми при зниженні кисню, бо це може призвести до загибелі персоналу. Використовують газ в закритих приміщеннях. Аргон звільняється і рівномірно розподіляється по всьому простору. Для того, щоб аргон подіяв ефективно, необхідний точний розрахунок необхідних кількостей, при якому враховують площу приміщення та інші чинники; для рівномірного розподілу газу використовують систему труб. За розподіл газу відповідає спеціальне обладнання, яке виступає в ролі не

лише регулювальника пожежогасіння, але і як системи виявлення вогню [62].

На основі позитивних результатів досліджень в Україні, для застосування в шахтах був виготовлений експериментальний зразок генератора інертних газів ГІГ-1, згодом було розроблено генератори інертних газів з продуктивністю від 340 $м^3$/хв інертного газу до 1500 $м^3$/хв [63].

Такі генератори призначені для продукування газової вогнегасної суміші у будь-які замкнені приміщення (шахти, склади, тунелі, житлові приміщення, телевежі і т.ін.) [63].

Існує ряд проблемних моментів, які не дозволяють повною мірою використовувати вогнегасну ефективність вогнегасної газоаерозольної суміші, як засобу пожежогасіння об'ємним способом. До них належать: недостатня концентрація аерозолю в так званих «мертвих зонах»; гасіння у важкодоступних, для проникнення вогнегасного аерозолю зонах; нерівномірний його розподіл [64].

Таблиця 1.8

Вогнегасна ефективність об'ємних вогнегасних речовин

| Вогнегасна речовина | Вогнегасна концентрація | Флегматизувальна концентрація | Небезпечна концентрація для людини |
|---|---|---|---|
| АУС, г/$м^3$ | 22 | 65 | Від 30 |
| ВП П-2АПМ, г/$м^3$ | 65 | 200 | Від 50 |
| $CO_2$, % об. | 22 | 33 | Від 4 |
| $N_2$, % об. | 33 | 43 | Від 30 |
| Інерген | 52 | - | - |

Гази $CO_2$ , $N_2$ та інші вперше набули широкого використання в галузі газового пожежогасіння у 60-х роках минулого століття завдяки їх виключній вогнегасній здатності і відповідним фізичним властивостям. Але потім була виявлена їх причетність до руйнування стратосферного озону – після вивільнення деякі хладони вступають в реакції каталітичного руйнування озону, при цьому самі не витрачаються. Загалом про токсичну небезпеку хладонів написано багато наукових праць.

### 1.3. Сучасний стан розроблення систем пожежогасіння на основі вогнегасних речовин об’ємної вогнегасної дії

Темпи обладнання об'єктів народного господарства автоматичними установками протипожежного захисту залишаються ще невисокими. Поряд із високою економічною ефективністю, яка полягає в значному зниженні матеріальних збитків від пожеж на захищуванихї об'єктах, збільшуються витрати на технічне обслуговування систем протипожежного захисту. Залишаються невирішеними екологічні питання, які пов′язані з застосуванням у цих системах озоноруйнівних фреонів. Тому пошук рішень наукових задач, спрямованих на підвищення ефективності протипожежного захисту об′єктів, є актуальним. Це підтверджується прийняттям державної концепції експлуатації об′єктів [65], яка передбачає розвиток наукових напрямків із запобігання пожежам, яка передбачає вивчення можливих аварій, їх кількості та тривалості, можливих наслідків та причини ускладення пожеж через наявність важкодоступних місць.

При цьому пожежі та аварії, які стаються останнім часом, характеризуються постійною тенденцією до збільшення їх маштабів та збитків. Особливо ця проблема стосується пожеж, які виникають на

промислових об’єктах із зберіганням легкозаймистих горючих рідин та твердих речовин. Так наприклад, пожежі, які виникають на автозаправних станціях, коли горить паливо в розливі чи в резервуарі, характеризуються високою динамікою зростання температури та максимальною швидкістю поширення полум’я вже з перших секунд пожежі. Інколи такі пожежі починаються або супроводжуються вибухами газопароповітряних сумішей, а наявні засоби для первинного пожежогасіння (вогнегасники) на об’єктах можуть припинити горіння лише на початковій стадії і зазвичай не є дієвими під час розливу горючих рідин. Найефективнішими для гасіння на початковій стадії пожежі є аерозольні системи гасіння [66], через що їх використовують в якості складової цілої системи протипожежної безпеки. Часто цей тип вогнегасників встановлюють на промислових об'єктах, різних виробничих цехах або складах. Основна перевага аерозольних генераторів – їх автоматизація, своєчасне реагування на загоряння і їх невелика ціна. Наприклад, «Огнетушитель аэрозольный ОВ-1» – вогнегасник використовується для гасіння джерел загоряння з твердих горючих матеріалів (пожежі класу А), включаючи електрообладнання під напругою до 1000 В (клас Е), а також рідких матеріалів (клас В). Його часто використовують для гасіння комп'ютерів, загоряння в автомобілі або електродвигунах, паперу, текстилю, дерева, пластику. За допомогою такого вогнегасника на поверхні матеріалу, який гасять, створюється захисний вогнеперешкоджуючий шар, який запобігає подальшій можливості повторного займання горючого матеріалу.

Переваги аерозольного вогнегасника:

• нові технології, що застосовуються для гасіння локальних пожеж;

• інтенсивне охолодження джерела займання і зони горіння;

• висока димоосаджувальна здатність в зоні гасіння пожежі;

• не створює непридатного для дихання середовища;

• екологічно чистий вогнегасний склад.

Одним з вогнегасників аерозольного типу є «PFE-1» [67]. Вогнегасники «PFE» не бояться вологи, корпус з діелектричного матеріалу. Вогнегасна речовина безпечна для електрообладнання, для людей і тварин, для навколишнього середовища.




Рисунок 1.3 – Вогнегасник «PFE-1»

У 2014 році в Україні продукція пройшла випробування і сертифікована згідно з НАПБ А.01.001-2004 та ДСТУ 3675-98 (Сертифікат № UA1.166.0004865-14).

Основні параметри PFE-1:

1. Дистанція гасіння: 1-3 м;
2. Час роботи: менше 12 с;
3. Висота вогнегасника: 242 мм;
4. Діаметр вогнегасника: 53 мм;
5. Вага: 500 г +/- 20 г.

Сфера застосування:

1. Розподільні електромережі – захист трансформаторів, підстанцій, електрощитових, кабельних тунелів, апаратних, електростанцій, генераторів та ін.

2. Телекомунікації – захист апаратних, серверних, сховищ і центрів даних та ін.

3. Морська галузь – захист машинних відділень суден, компресорних, вантажних відсіків, катерів, яхт, вітрильників, великих комерційних суден і причалів.

4. Будівництво – захист машинного обладнання, складів, гаражів, кухонних приміщень, офісів, висотних будівель та ін.

5. Нафтогазова галузь – захист пунктів управління, електрощитових, насосних станцій, енергосистем і розподільних систем, нафтохімічних і трубопровідних систем та ін.

Якщо розглядати інші види сучасних вогнегасних засобів для гасіння складних пожеж, то серед них необхідно відмітити «BiZone 5000» [68] – установка газопорошкового пожежогасіння (УГПП) «BiZone», яка призначена для захисту резервуарів з легкозаймистими речовинами в якості альтернативи традиційним системам пінного пожежогасіння. Нова технологія для гасіння пожеж на початкових етапах в резервуарах з нафтопродуктами, що використовує при цьому стаціонарну установку масою 1 т порошкової суміші.



Рисунок 1.4 – Стаціонарна установка «BiZone 5000»

Перевагою цієї установки перед стаціонарними установками пінного гасіння є мала інерційність (близько 15 с), що дає змогу за 3-4 с

локалізувати та ліквідувати пожежу, а спрацювання стаціонарних установок пінного гасіння становить біля 3 хв. Також установка «BiZone 5000» може використовуватися в сховищах з артилерійськими бойовими снарядами, для захисту архівних приміщень та для захисту установок нафтової промисловості.

Одним з сучасних методів гасіння є «Натиск» [69] – високоефективна технологія гасіння пожеж з використанням технології компресування піни. Переваги компресійної піни над іншими установками подачі піни:

- зменшує час гасіння до семи разів;
- дальність струменя піни – до 30 м;
- час затримки компресійної піни на поверхні 1-1,5 год,
- екологічність компресійної піни (піноутворювач м'який та розкладається на 100%).

Використовується для гасіння пожеж в багатоквартирних будинках будь-якої поверховості, будівлях громадського призначення та на промислових підприємствах, зокрема нафтової-газової галузі.

Також одним з ефектиних методів гасіння, який поширений в країнах Європи, є «Кобра». В даний час існує вже понад 700 установок пожежогасіння з гідро-абразивною різкою «Кобра» [70], встановлених як на невеликих оперативних машинах, так і на великих вантажопідйомних пожежних машинах (автоцистернах) більш ніж в 30 країнах світу.

Метод гідроабразивного різання полягає в змішуванні води і абразиву, що викидається через спеціальний вихідний отвір під високим тиском (> 250 бар) і здатного пробити всі типи стандартних будівельних матеріалів і конструкцій з них, включаючи бетон, цеглу, цемент, дерево,



метал, покрівельні матеріали, скло, композитні матеріали і їх похідні. Застосування установки «Кобра» дозволяє знизити ризики роботи рятувальників, оскільки гасіння ведеться з безпечної позиції, ззовні будівлі. Таким чином, знижується ризик травми через вплив теплового випромінювання та вибуху горючих газів.

Рисунок 1.5 – Автономна установка гасіння ШАР-1

Також заслуговує на увагу порошковий самоспрацьовуючий вогнегасник «ШАР-1» [71], який виготовляється компанією Siam Safety Premier Co. Ltd (Тайланд). Пристрій використовується для протипожежного захисту промислових і с/г об'єктів і споруд, для квартир житлових будинків і приватних будинків, транспорту, гаражів, автомайстерень та важкодоступних місць.

Принцип спрацювання пристрою полягає в його активації, під впливом полум'я. У цьому – абсолютна унікальність даного вогнегасника. Склад – порошок Furex770, основним компонентом якого (91%) є фосфат моноамонію в тонкодисперсному стані (не менше 60% часток не перевищує 40 мкм).

Подібним способом гасіння характеризується «Спасатель-1» – вогнегасник, призначений для ефективного гасіння вогнища пожежі на початковій стадії людиною шляхом вкидання капсули в осередок пожежі. Об’єм, який захищається однією капсулою – 8-15 м$^3$. Діапазон температур зберігання становить від -20 С° до +80 С°. Маса капсули – 630 г. Гарантійний термін зберігання – 5 років.

«Спасатель-1» [72] – призначений для гасіння пожеж класів – А, В, С, Е та може використовуватися в житлових, офісних, виробничих і складських приміщеннях в якості первинного засобу пожежогасіння.

Вогнегасний склад, для вогнегасника «Спасатель-1» – розроблений і виробляється японською компанією Bonex.

«Спасатель-1» складається з травмобезпечної циліндричної капсули для зберігання вогнегасної речовини. При руйнуванні контейнера виділяються гази і вода. Вода випаровується і охолоджує поверхню горіння. Вуглекислий газ перекриває доступ кисню до вогнища пожежі. Пари амонію зупиняють реакцію горіння. На палаючій поверхні створюється захисна плівка з поверхнево-активних речовин – що запобігає повторному загорянню.

Аналогом «Спасатель-1» є «Bonex FR911» [73] (виробник США) – призначений для гасіння пожеж класу A, B і C. За ефективністю «FR911» є покращеною технологією свого попередника SAT119.

Принцип роботи «FR911»: вогнегасна речовина викидається в атмосферу, при попаданні ампули у вогонь. Від тепла вогню буде випаровуватися вогнегасна речовина, що призведе до хімічної реакції. Речовина вивільняє певну кількість вуглекислого газу, який придушить вогонь, тим самим загасить його. В результаті хімічної реакції охолоджуючий агент покриває плівкою горючий матеріал, охолоджує температуру горіння матеріалу, що запобігає повторному загоранню. Хімічна реакція триває всього кілька секунд. «FR911» є дуже ефективним для гасіння початкових загорянь.

Аналізуючи масштабні пожежі на газових та нафтових родовищах, можна прийти до висновку що на теперішній час немає ефективних засобів для їх гасіння. Цікава програма для гасіння масштабних пожеж на газових та нафтових родовищах була реалізована ще в СРСР починаючи з 1965 року. Вонаполягала у використанні ядерних вибухів в інтересах народного господарства. З 124 мирних ядерних вибухів 117 технологічних вибухів

було проведено поза межами ядерних полігонів (Семипалатинського і на Новій Землі) [74-79].

Загалом за результатами робіт науковців вогнегасну дію, притаманну поширеним на даний час вогнегасним засобам, можна звести в одну таблицю.

Таблиця 1.9

Вогнегасні чинники впливу засобів пожежогасіння [80]

| Вид вогнегасних речовин | Чинники впливу на процеси припинення горіння | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | охолод-ження | інгібу вання | розбав лення | ізолю вання | флегма тизування | класи пожеж |
| Твердофазові (вогнегасні порошки) | | | | | | |
| АВС | 1 | 4 | 1 | 3 | 1 | A,B,C |
| ВС | 1 | 4 | 1 | 0 | 1 | (E,F) |
| ABCD | 1 | 3 | 0 | 3 | 0 | B,C (E,F) |
| D | 1 | 1-2 | 0 | 1-2 | 0 | A,B,C,D |
| ЦП (цільового призначення) | 1-2 | 1-3 | 0-2 | 0-3 | 0-1 | (E) D ЦП |
| Рідиннофазові неводні | 1-2 | 4 | 2 | 0 | 2 | B,C (E) |
| Вода | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | A |
| Рідиннофазові водні (вода+ПАР) | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | A,B,C (E,F) |
| Рідиннофазові водопінні | 1 | 0-1 | 0-1 | 3-4 | 0-1 | B,A |
| Рідиннофазові водоемульсійні | 2 | 0-2 | 0-2 | 0 | 0-2 | B,C |
| Рідиннофазові гелеутворювальні | 3 | 0 | 0 | 2 | 0 | A |
| Рідиннофазові комбіновані | 2-3 | 1-4 | 1-4 | 1-4 | 1-4 | A,B,C |
| Підігріта вода | 2 | 0 | 2 | 0 | 2 | A,B,C |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Газофазові розріджувачі | 1 | 0 | 4 | 0 | 4 | B,C (E, F) |
| Газофазові інгібітори горіння | 1 | 4 | 2 | 0 | 4 | B,C (E, F) |
| Вогнегасні аерозолі (тверда та газова фази) | 1 | 4 | 2 | 0 | 4 | B,C (E, F) |

Отже, навіть враховуючи різноманітність застосовуваних вогнегасних речовин, достатню їх кількість, широкий спектр та велику кількість застосовуваних технічних засобів пожежогасіння та постійну готовність пожежно-аварійних підрозділів до гасіння пожеж, ліквідація таких пожеж залишається великовитратним та небезпечним процесом. І при цьому жоден вогнегасний засіб, навіть комбіновані, не забезпечують «повноцінного» гасіння (табл. 1.7). Причини цього ми вбачаємо в постійному погіршенні економічних та організаційних умов для профілактики та гасіння пожеж, а також в постійному ускладненні ситуації в зв'язку з застарілим аварійно-рятувальним обладнанням, яке потребує заміни. При цьому інтенсивність його використання постійно зростає.

### 1.3.1. Застосування газових вогнегасних речовин в системах протипожежного захисту об'єктів

Як відомо, до сучасних засобів запобігання пожежам та вибухам на об'єктах відносяться автоматичні системи аерозольного, а також газового пожежогасіння.

Дослідження рецептур сучасних зарядів АУС і властивостей одержуваних із них вогнегасних аерозолів, показало, що сучасні аерозоль утворювальні сполуки мають високі експлуатаційні характеристики, наприклад, вогнегасна концентрація у 3-5 разів нижча за концентрацію

хладону 13В1, а коефіцієнт озоноруйнівної дії аерозолю при вогнегасних концентраціях дорівнює нулю. Також продукти згоряння АУС безпечні для людей, не руйнують обладнання, що захищається. Разом з тим температура продуктів згоряння має достатньо високі значення.

Вивчення особливостей побудови та функціонування сучасних систем об'ємного пожежогасіння показало, що найперспективнішими є автоматичні системи аерозольного пожежогасіння, основним елементом яких є генератор вогнегасного аерозолю.

Виявлені переваги систем пожежогасіння з використанням ГВА порівняно з традиційними, а саме: відсутність посудин під тиском для зберігання вогнегасної речовини та мережі трубопроводів для її доставки, як наслідок цього – низька металоємність системи, простота технічного обслуговування та тривалий строк експлуатації системи. Час роботи системи аерозольного пожежогасіння, порівняно з аналогічною характеристикою систем об'ємного гасіння, залишається досить великим. Значною мірою на це впливає тривалість роботи ГВА.

Наукові результати з питань розроблення таких систем та їхніх елементів, а також дослідження механізму дії вогнегасних аерозолів та вогнегасних газових речовин висвітлено у А.М. Баратова [81] В.М. Баланюка [82], з яких можна зробити висновок, що вогнегасні суміші мають дещо вищі вогнегасні властивості ніж окремі їх елементи.

У роботах В.В. Агафонова та М.П. Копилова [83-85] відмічено, що вогнегасна ефективність аерозолів напряму залежить від їх дисперсності та відповідно від складу гетерогенної фази.

Що стосується аерозольних та порошкових засобів гасіння, то в роботах В.В Азатяна Л.П. Вогмана [86, 87], Беликова А.С. [88, 89], А.В. Антонова [90-92], В.І. Горшкова [93], Ю.М. Шебеко [94] висвітлено та проаналізовано рецептури вогнегасних порошкових сумішей,

експериментально встановлено їх вогнегасну ефективність. Проаналізовано їх переваги та недоліки а також способи їх використання. Автор праці С.М. Бондаренко [95, 96] обґрунтував позитивні та негативні сторони використання аерозольних вогнегасних генераторів та встановив конструктивні особливості їх використання. Автори праць – В.М. Алікін [97], О.В. Тарахно [98] О.А., О.О. Сізіков [99-104], В.О. Дунюшкін [105, 106], В.П. Тарадайка [64], Ю.А. Мишак, С.О. Радченко [107, 108], А.Я. Корольченко та Д.А. Корольченко [108, 109] досліджували взаємодії дифузійного полум'я з вогнегасмними речовинами та визначали їх вогнегасні концентрації.

Праці С.Г. Цариченка, М.Н. Мешмана [110, 111], Вайсмана М.Н., [112], Д.А. Журбинського [113, Ю.О. Копистинського [114, 115] та ін., [116-120] присвячені розробці комбінованих систем пожежогасіння. В працях [12 -129] описано технологічні особливості виготовлення піротехнічних зарядів.

В роботах [130-135] висвітлено загальні фізико-хімічні основи розвитку та припинення горіння, умови матеріального та теплового балансу процесу горіння, описано фізико-хімічні властивості та засоби гасіння для найбільш поширених хімічних речовин, процесів горіння, які взаємопов’язані з науковими дослідженнями, щодо способів та засобів гасіння комбінованими системами вогнегасного аерозолю газів та ударних хвиль.

В цих роботах [130 - 135] основна увага приділяється вирішенню таких проблем: зниження пожежної небезпеки процесу отримання вогнегасної речовини, вибору оптимальних схем розміщення ГВА для забезпечення рівномірного розподілу аерозолю в захищуваному приміщенні. Питанням удосконалення таких характеристик ГВА, як

тривалість роботи, швидкодія, інтенсивність аерозолеутворення, практично не приділяється уваги.

Протягом останніх десятиліть зросла потреба у змінах вимог щодо контролю за безпекою в переробній промисловості. Існує потреба у ідентифікації потенційних небезпек за наявними небезпечними матеріалами, які обертаються в технологічних установках. Нові аварійні ситуації все більше спонукають до створення нових методів захисту, в основному для технічного аналізу. В даний час пожежі майже завжди є результатом поєднання організаційних питань, відсутності або слабкої компетентності та технічних збоїв (старіння) обладнання. Тому існує необхідність в удосконаленні характеристик вогнегасних засобів, швидкодії, інтенсивності подачі вогнегасних засобів ефективності аерозолеутворення та ін.

Аерозолі [136-140] мають більш низькі об'ємні концентрації, низьку токсичність, відсутність відомих глобальних атмосферних впливів на навколишнє середовище, а також потенціал для широкого спектра застосувань. Використання твердої суміші, гелю або порошку в якості відправної точки для генерування аерозолю усуває необхідність трубопроводів і циліндрів під тиском та створює потенціал для широкого спектра застосувань для пожежогасіння на різноманітних об'єктах, літаках, вантажних контейнерах, мобільних притулках швидкого розгортання, резервуарах для зберігання палива, батареях, необслуговуваних телекомунікаційних засобах, а також броньованих відсіках двигунів транспортних засобів.

В Україні над створенням систем аерозольного пожежогасіння працюють, ТзОВ «Експерт 112» (м. Київ), СП "Паралакс", НВФ "Бранд-Майстер" (м. Київ), ТОВ "Крайз" (м. Полтава), ТОВ "Проектний інститут "Електропром".

До розробки засобів аерозольного гасіння виявляють інтерес і закордонні фірми. Фірмою Kidde Walter (США) виконано цикл експериментальних досліджень з гасіння пожеж в двигунах та багажних відсіках літаків за допомогою аерозольних сполук. Фірма Dinamit Nobel (Німеччина) налагодила випуск аерозольних генераторів для європейського споживача. Виробник Fire Pro розробив та випускає лінійку генераторів вогнегасного аерозолю, які володіють високою екологічною чистотою вогнегасних продуктів, та не утворюють форсу полумя при гасінні.



Рисунок 1.6 – Генератори вогнегасного аерозолю Fire Pro [141]

Фірмою Kidde Deugra (Німеччина) створено рецептури аерозолеутворювальних сполук (АУС), які не утворюють токсичних продуктів та мають невелику температуру горіння. Ще одна іноземна розробка – порошковий аерозоль А (SFE) [67] являє собою новий тип хімічної вогнегасної речовини, що складається з надзвичайно малих твердих частинок (<1μ), які сутворюються від хімічної реакції окиснення і випускаються у вигляді аерозолю. Цей високоефективний аерозоль містить до 40% твердих частинок і 60% газоподібних молекул, має характеристики потоку газу, який легший за повітря, а гетерогенні частинки є стійкими у повітрі протягом тривалого часу. Через високе об'ємне розширення і малий розмір частинок аерозолю SFE досягає і перевершує приблизно в 3 рази

пожежогасіння галоном (на ваговому співвідношенні). Установка не потребує балонів під тиском, не має труб і сопл, не потрібні окремі будівлі для зберігання [67].

Виходячи з проведеного аналізу можна зробити висновок, що в світі активно ведеться пошук ефективних рецептур та засобів пожежогасіння і запобігання горінню на початкових і не тільки етапах його виникнення.

### 1.3.2. Аналіз наукової літератури і нормативних документів щодо вогнегасної ефективності газових та аерозольних вогнегасних речовин

За нормальних умов аерозольутворювальні сполуки (АУС) характеризуються високою хімічною стабільністю, але здатні інтенсивно згоряти і забезпечувати бажаний ефект утворення вогнегасних аерозолів з прийнятними для практики пожежогасіння властивостями.

Горіння твердопаливних композицій є окисно-відновним процесом. Як окисники використовують солі неорганічних кислот, оксиди металів, а також кисень повітря (або їх комбінації), а відновниками є горючі неорганічні та, здебільшого, органічні речовини. В результаті горіння АУС із елементів горючих речовин і кисню мінерального окисника утворюються газоподібні продукти, а із залишку мінерального окисника – тверді дрібнодисперсні солі і оксиди металів. Сполуки металів, що утворюються в результаті газофазних хімічних реакцій і перебувають у полум’ї в газоподібному стані, потрапляючи в холодне навколишнє середовище охолоджуються в газовому просторі. Відбувається їх конденсація з утворенням у потоці газу твердих частинок мікронних і субмікронних розмірів – аерозолю.

Ефективність дії вогнегасного аерозолю залежить насамперед від складу твердопаливних композицій, а також умов їх згоряння. При виборі

окисника враховують в першу чергу здатність його підтримувати горіння завдяку кисню, який вивільняється при термічному розкладі цього окисника. Окрім того окисники, які використовуються в АУС, мають бути мінімально гігроскопічними і токсичними, стійкими при температурах 50-70°С і до дії води, а їх розкладання не повинно супроводжуватися вибухом. Найчастіше як окисники застосовують калій нітрат чи калій перхлорат або їх суміші, тому відомі аерозольутворювальні вогнегасні засоби відрізняються в основному типом горючої речовини та співвідношенням її і окисника, вмістом добавок різного призначення.

Горючі компоненти потрібно обирати враховуючи можливість легкого окислення їх киснем повітря чи окисника, здатність виділяти при згорянні достатню кількість газів. Горючою основою АУС здебільшого є такі органічні синтетичні речовини, як фенолформальдегідна новолачна смола (ідітол), епоксидіанові та поліефірні смоли, синтетичні каучуки та нітроцелюлоза з різноманітними пластифікаторами. Окрім згаданих характеристик ці речовини володіють одночасно властивостями притаманними як горючій речовині, так і зв'язному-цементатору, що забезпечує високу міцність вогнегасних зарядів [14, 64, 120-126]. Найпоширенішими на сьогодні є нестехіометричні аерозольутворювальні композиції, тобто з надлишком горючого. Повнота згоряння таких складів можлива лише за участі кисню повітря. На повітрі вони горять з факелом полум'я, в якому виділяється значна частина тепла. Такий факел може мати високу температуру навіть на значній віддалі від поверхні горіння, оскільки залучене повітря не є ефективним охолоджувачем. Для зменшення температури таких факелів запропоновано використовувати спеціальні охолоджувачі, що призводить до зростання як ваги усієї конструкції генератора, так і його габаритів. До того ж, як показує

практика, спостерігається зниження вогнегасної ефективності аерозолю та екологічної чистоти АУС [137].

Загалом, основною перевагою таких складів є висока ефективність гасіння полум'я. Це пов'язано, насамперед, зі збільшенням ступеня розбавлення зони горіння інертними газами, зокрема $N_2$ з повітрям, яке відбувається в дифузійному факелі [138]. В роботі [139] зазначено, що використання таких складів для гасіння пожеж з питомою витратою 50-100 г/м$^3$ і більше призводить до зниження вмісту кисню в об'ємі, що захищається, в середньому на 1-4%. Крім цього відбувається розбавлення горючої суміші негорючими газами ($CO_2$, $N_2$, пари $H_2O$), які утворюються при згорянні твердопаливної композиції, що викликає деяке зниження швидкості окиснення в полуменевій зоні і, як наслідок, зниження швидкості і температури горіння. Однак автори роботи [136, 137] висловлюють думку, що впливом розбавлення зони горіння варто знехтувати, оскільки фактична концентрація інертних газів при гасінні аерозолем приблизно дорівнює 0,025кг/м$^3$, що в 16 разів менше, ніж потрібно для гасіння методом розбавлення горючого середовища. Але попри те добавляння інертних газів приводить до суттєвого підвищення вогнегасної ефективності бінарних систем [137]. Не зважаючи на суттєві переваги таких складів при гасінні пожеж об'ємним способом, вони неефективні при гасінні тління.

Згоряння нестехіометричних складів, яке відбувається без доступу повітря, супроводжується виділенням метану, вуглекислого газу, вуглеводнів та надлишкового власного кисню [140]. Перевагою таких складів, як зазначено в роботі [143], є їх можливість придушувати тління. Проте для повного окислення продуктів згоряння таких складів власного кисню недостатньо. Велика кількість горючих газів в продуктах згоряння є легшими за повітря, що очевидно призводить до поступового зменшення їх

концентрації внизу приміщення. Спливаючи вгору, вони захоплюють з собою найдисперсніший аерозоль, що зменшує ефективність пожежогасіння в нижній частині приміщення.

Стехіометричні склади здатні горіти безполуменево або з невеликим факелом. Але на практиці такі склади застосовуються не часто в зв'язку з невисокою ефективністю, в тому числі при гасінні тління, і високою температурою горіння.

Змінюючи співвідношення цільових добавок, а зокрема, каталізатора, інгібітора та охолоджуючого агента, можна також регулювати процес термічного розкладу аерозолеутворюючих засобів від полуменевого горіння до переведення його в безполуменеву газифікацію.

Умови практичного застосування аерозолевих вогнегасних засобів висувають суперечливі вимоги до параметрів аерозолеутворення: вогнегасна ефективність і швидкість аерозолеутворення повинні бути досить високими, а температура вогнегасного аерозолю – низькою. Та, як правило, саме високотемпературний аерозоль найбільш дрібнодисперсний і характеризується більш високою вогнегасною ефективністю і швидкістю аерозолеутворення. Безполуменевий низькотемпературний аерозоль має дещо меншу вогнегасну ефективність і більш низьку швидкість аерозолеутворення. Однак кожен з варіантів має свої переваги, які реалізуються на практиці.

Одним з перспективних засобів, які використовують для гасіння пожеж на нафтосховищах та під час розливів легкозаймистих рідин, є імпульсна аерозольна система, яка спрацьвує при запаленні твердопаливного заряду газогенератора, продукти його згоряння створюють досить високий тиск, під впливом якого відбувається компактування і рух частинок вогнегасної суміші всередині корпусу [144]. Після їх виходу з приладу, продукти згоряння формують балістичну хвилю

низької інтенсивності, котра збиває полум'я, а також розпорошує і диспергує вогнегасну суміш, яка у вигляді аерозольної хмари дрібнодисперсних частинок, утворює пару, що витісняє кисень повітря з вогнища горіння, оскільки продукти згоряння газогенератора його не містять. Поєднання всіх цих факторів (дія балістичної хвилі, охолодження газу в зоні хмари частинок, наявність парів і витіснення з цієї зони кисню повітря), а також підбір потрібного співвідношення маси заряду газогенератора і вогнегасної суміші, дозволяють гасити різні типи масштабних пожеж великої інтенсивності.

Системи пожежогасіння об’ємним способом, у яких використовують газові вогнегасні речовини, можна застосовувати для гасіння пожеж певних класів з урахуванням обмежень, описаних у нормативних документах [145-148]. Цими стандартами передбачено необхідні концентрації вогнегасних речовин, виходячи з розрахунку на одиницю об’єму захищуваних приміщень.Такі концентрації визначаються за методами, описаними у 7.6 ISO 14520-1. В Україні чинний ДСТУ 4466-1:2008 Системи газового пожежогасіння. Проектування, монтування, випробування, технічне обслуговування та безпека. Частина 1. Загальні вимоги (ISO 14520-1:2006 MOD), який встановлює альтернативний метод визначення мінімальної вогнегасної концентрації.

Зазначеним стандартом встановлено мінімум вимог до визначення мінімальної вогнегасної концентрації газових вогнегасних речовин з використанням установки, оснащеної «чашковим пальником». Дифузійне полум’я горючих речовин, які горять у круглому пальнику «чаші», поміщеному у центрі коаксіального повітряного потоку, гасять додаванням газової вогнегасної речовини до повітря. Концентрацію вогнегасної речовини, виражену у відсотках, як об’ємну частку розраховують за формулою:

$$C_{ВА} = \frac{q_{ВР}}{q_{П} + q_{ВР}} \quad (1.1)$$

де $C_{ВА}$ – концентрація вогнегасної речовини, виражена у відсотках, як об'ємна частка;

$q_{П}$ – об'ємна витрата повітря, л/хв;

$q_{ВА}$ – об'ємна витрата вогнегасної речовини, л/хв.

Визначення нормативної концентрації газової вогнегасної речовини для пожежогасіння об'ємним способом проводять за результатами лабораторних випробувань.

В науковій літературі крім зазначених вище застосовуються дослідні методики, які можна умовно поділити на методи «камери» та «циліндра» [115-117, 146-151].

Результати досліджень ефективності вогнегасного аерозолю за розробленими методиками опубліковано у роботах [149-151]. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння, їх проектування, монтування та експлуатація [152].

Оскільки основний склад АУС – це такі солі, як $K_2CO_3$, KOH, KCl та інші, то деякі дослідники [81-83, 88, 82], схильні вважати, що механізм дії аерозолю подібний до механізму дії вогнегасних порошків, а підвищити ефективність аерозолю можна шляхом збільшення газифікації вихідних компонентів рецептур АУС з максимально можливим вмістом інертних газових розріджувачів (азот, $CO_2$, водяна пара) причому збільшення газифікації аерозолю [150- 55] сприяє підвищенню його вогнегасної ефективності.

Основним загальним недоліком для більшості аерозольутворювальних сумішей є їх порівняно високі вогнегасні концентрації та досить високі температури горіння. Більшість з цих складів являють собою багатокомпонентні суміші, що збільшує

собівартість складу, та ускладнює їх виготовлення і зберігання. Наприклад, відомий склад [156], який містить в основі нітрат калію (38 – 80 %), перхлорат калію (30 – 45 %), в якості горючого – сажу (10 – 19,5 %), ідітол (0,5 – 1,5 %), гіпс (5 – 13 %), портландцемент (10,5 %), рідке скло (17 – 45 %), натрію бутилнафталін, КМЦ (0,6 – 0,1 %), оксид міді (2 %), оксид цинку (4 %), оксид заліза (0,5 – 1 %). Вогнегасна концентрація аерозолю, отриманого з таких АУС, становить 59 – 133 г/м$^3$, що є на рівні деяких вогнегасних порошкових засобів. Зараз паралельно з вогнегасними аерозолями для об'ємного гасіння застосовують інертні розріджувачі. Інертні розріджувачі – група газових вогнегасних речовин, до яких, зокрема, входять діоксид вуглецю, азот, аргон та їх суміші, – нетоксичні, які не утворюють токсичних продуктів термічного розкладу, не руйнують озоновий шар та є більш доступними і дешевими, ніж хладони та деякі інгібітори горіння. Оскільки в рамках Монреальського протоколу [157] виробництво хладонів було припинено у всіх розвинених країнах, питання заміни їх постало в багатьох дослідних центрах та інститутах світу. Однією з перших газових вогнегасних речовин, яку було запропоновано, як альтернативу хладонам, – був діоксид вуглецю ($CO_2$).

Але згідно з Монреальським та Кіотським протоколом [158, 159], $CO_2$ відноситься до парникових газів, викид яких регламентується, а дослідження щодо інноваційних екологічно безпечних технологій є пріоритетними та відповідають пункту 4 статті 2 протоколу. Тому, з метою зменшення викиду цього газу в атмосферу, для забезпечення вогнегасної ефективності газоаерозолів доцільно використовувати азот $N_2$, який широко використовується в якості екологічно чистого флегматизувального та вогнегасного агента. Треба зазначити, що на даний час створено досить велику кількість альтернативних хладонам засобів гасіння [151-161]. Однак, більшість з них все ж не дають можливості

говорити про абсолютну простоту експлуатації, дешевизну, а головне екологічну чистоту гасіння, а також значне зменшення часу та, як наслідок, і викидів продуктів горіння пожежі. Азот, як вогнегасний агент володіє «цінними» характеристиками – хімічно нейтральний до більшості речовин, недорогий, не дефіцитний, молярна густина –28.01 г/моль, що дає змогу рівномірно заповнювати об'єм, при цьому вогнегасна концентрація $N_2$ для n–гептану ($C_7H_{16}$) становить 33 %, [162]. Азот широко застосовується, для різноманітних систем пожежогасіння. Зокрема, існують установки як на території України, так і за кордоном, в яких цей газ покладений в основу за принципом витіснення кисню. В роботі [163] автори пропонують використовувати азот в суміші з хладоном, для гасіння пожеж при катастрофах літаків, а в роботі [160] – для продувки внутрішніх технологічних об'ємів. Розробники [162] використовували для пожежогасіння азоту разом з дисперсною водою, так само як і в роботі [163], де автори пропонують сумісно подавати азот з водою в спринклерних системах. У роботі [164] також пропонують спільно подавати азот і воду, але вже у вигляді водяного туману. У всіх випадках азот використовували для зменшення концентрації кисню, що приводить до підвищення ефективності гасіння другим компонентом, як правило інгібітором.

Аналіз загальних закономірностей процесів інгібування показує, що підвищити ефективність інгібувальних засобів можна, знизивши вміст окислювача в горючій суміші. Знизити концентрацію окислювача достатньо не у всьому приміщенні, а тільки в зоні горіння. Таким чином, негорючі газоподібні компоненти додатково розбавляють горючу систему, знижують концентрацію кисню і тим самим різко підвищують ефективність вогнегасної дії інгібітора. Наприклад, розбавлення суміші «природний газ + повітря» на 10 % азотом знижує вогнегасну

концентрацію хладону в 2 рази, а при розбавленні на 20 % вогнегасна концентрація хладону становить всього 0,5–0,6 % [162].

Крім цього, при добавлянні теплових флегматизаторів до хімічних інгібіторів вогнегасна ефективність останніх різко збільшується, як заявляють автори робіт [165 - 167]. Подібний ефект спостерігається і при використанні $CO_2$ де автори пояснюють це тим, що із зменшенням концентрації кисню в повітрі різко збільшується ефективність дії інгібіторів, і в результаті флегматизувальна концентрація $CO_2$ зменшується до 8 % при концентрації аерозолю в 15 г/м$^3$ [168]. Отже, механізм об'ємного гасіння аерозолем з добавкою газів доречно розглядати за принципом комбінованої дії вогнегасних засобів, які поєднують в собі ефекти охолодження та інгібування, що приводить до значного кінцевого вогнегасного ефекту.

Аналіз щодо сумісної дії газових розріджувачів та твердих дисперсних інгібіторів, які утворюють аерозоль, підтверджує сумарну синергетичну дію компонентів бінарної газоаерозольної системи. Таким чином, вплив азоту на вогнегасну ефективність аерозолів є відкритим питанням, яке потребує теоретичного аналізу характеристик аерозолю та експериментального визначення вогнегасної ефективності бінарних сумішей аерозолю та азоту.

Азот, як вогнегасний компонент, досліджено багатьма вченими зокрема авторами роботи [169, 170]. Вони перевірили ефективність придушення вогню газоподібним азотом за допомогою різних повномасштабних вогневих випробувань. Об'єм випробувальної камери становив 102 м$^3$. Випробування проводилися за концентрації азоту $C_{гас}$ =33,6 об. %  та мінімальної концентрації кисню 13,9 %. У жодному з 10 тестів не відбулося повторного загоряння зразка. Тести проводили на

зразках – представниках кожного з класів пожеж. В табл. 1.9 представлені дані з гасіння класу С – на кабелях з поліетиленовою ізоляцією.

Таблиця 1.10

Результати тесту гасіння [167]

| Агент | $C_{гас}$, % об. | Час, с | Фіксація повторного загоряння | Час догорання, с |
|---|---|---|---|---|
| Nitrogen IG–100 | 39,1 | 11 | Так | 3 |
| IG–541 | 40,2 | 13 | Так | 6 |
| m–200 | 1,6 | 6 | Так | Кілька сек. |
| HFC–23 | 15,9 | 6 | Так | Кілька сек. |

Слід зазначити, що у випадку подавання інертного розріджувача у замкнене герметичне приміщення, повітряне середовище може залишатися придатним для дихання і збереження життя людей аж до гасіння пожежі. Забезпечити життєбезпечну концентрацію кисню може застосування комбінованих аерозольно–газових систем, концентрація газу та аерозолю в яких має бути на порядок меншою за необхідну вогнегасну.

Відомо [168], що при спалюванні АУС з кожного його грама утворюється 0,3 – 0,5 л аерозолю, який складається з дисперсних частинок неорганічних солей калію, натрію, кальцію та інш., та суміші інертних газів-флегматизаторів – $CO_2$, $N_2$, водяної пари та інш. При взаємодії цих частинок утворюється складна система, структура і склад якої постійно змінюється в часі. Так, в момент утворення газоаерозольної системи вона складається з ультрадисперсних часточок солей калію, які можуть формувати структури з вмістом води та $CO_2$. Такі структури будуть чинити набагато ефективнішу вогнепригнічувальну дію завдяки

комбінованій дії інгібіторів та флегматизаторів.

В роботі [155] результати досліджень показали, що вогнегасна ефективність аерозолів не залежить від порядку введення інертних газів, а залежить тільки від їх концентрації, і навіть незначна кількість введеного інертного газу в об'єм твердофазового аерозолю суттєво знижує вогнегасну концентрацію останнього.

На користь комбінованого характеру гасіння, як приклад, можна також привести дані роботи [158] про те, що наявність інертних газових розріджувачів значно підвищує ефективність аерозолю. Результати дослідів [149, 155] показали ще один досить вагомий ефект від додаткового використання інертних розріджувачів сумісно з аерозолем, а саме – наявність $CO_2$ чи $N_2$ збільшує оптичну проникність аерозолю, тобто збільшується видимість. Особливо це відчутно при концентраціях $CO_2$ чи $N_2$ від 2 % і більше. З практичної точки зору це має важливе значення. При вирішенні питання, який інертний газ краще використовувати, стає очевидним те, що азот, в силу його малої токсичності, має безумовну перевагу над $CO_2$, хоча його допоміжна дія дещо нижча від $CO_2$. Якщо ж стоїть питання про гасіння в безлюдних об'ємах, то, без сумніву, застосування $CO_2$ має переваги перед $N_2$.

Питання пошуку нових вогнегасних речовин та синергізму між хімічними та фізичними вогнегасними агентами також вивчалось, які шукали нову екологічно чисту вогнегасну речовину, в якій хотіли зберегти всі «корисні властивості» Галона –1301 [171], але цей пошук не був успішним, оскільки отриманий вогнегасний агент 1–бром–3,3,3–трифторпропан не відповідав заявленим вимогам – мав низьку вогнегасну концентрацію, низьку температуру кипіння, високу вартість, і т. д. З метою отримання «екологічно» чистих вогнегасних агентів дослідники пропонують використовувати зріджений азот [172, 173], який, як вони

вказують, може використовуватись для гасіння будівель та пожеж в резервуарах. Щодо вогнегасної ефективності азоту, то його необхідно використовувати як газ, що знижує концентрацію кисню, причому подавати його можна різними способами, але загалом необхідно, щоб газ потрапляв в зону горіння. Так, автори [174] проводили дослідження ефективності гасіння мильними бульбашками – капсулами, які на їхню думку призведуть до зменшення витрат газу на гасіння. Таким чином, як видно з проведеного аналізу, дослідники працюють над завданням зменшення вогнегасної концентрації газу, який подається на гасіння, причому задіюють різні способи та прийоми, які мають свої відповідні зазначені вище недоліки.

Таким чином, вплив добавок $N_2$ та $CO_2$ на вогнегасну ефективність аерозолів на основі неорганічних солей калію, особливості гасіння та характеристики бінарних аерозольно-азотних сумішей є недостатньо вивченим питанням, яке підтверджує необхідність проведення досліджень у вказаному напрямку.

Відомо, що вогнегасна концентрація становить близько 22 % для $CO_2$ і 33 %р – для $N_2$ для гасіння n-гептану [175, 176]. Для створення вогнегасної концентрації цих газів потрібна досить велика кількість резервуарів і трубопроводів для їх зберігання та подачі на гасіння. Відповідно, це призводить до значного подорожчання самої установки і її монтажу, і як правило потребує окремих приміщень, і значних додаткових витрат. При цьому гасіння і флегматизація забезпечується тільки завдяки заповненню об'єму та тепловідведенню від полум'я газами-флегматизаторами і при більш низьких концентраціях гасіння неможливе. Враховуючи зазначене, для підвищення вогнегасної ефективності вуглекислого газу і азоту дослідники пропонують різні способи, але в

основному вони полягають у змішуванні газу з іншими газами, хладонами або дисперсними вогнегасними речовинами, зокрема аерозолями [82]. При цьому вогнегасна концентрація вихідного газу зменшується, але загальний обсяг газової суміші залишається майже таким же, або незначно зменшується, що не забезпечує підтримання достатньої концентрації $O_2$.

## 1.4. Вогнегасна ефективність та екологічна прийнятність аерозольних вогнегасних речовин

Тактико-технічні характеристики деяких типових серійних генераторів вогнегасних аерозолів (ГВА) та мінімальну питому масову вогнегасну витрату АУС наведено у таблицях 1.3.1-1.3.2 [64, 84, 96, 137, 141, 168, 177], а у таблицях 1.3.4 – 1.3.5 наведено характеристики аерозольутворювальних складів (АУС) та їх рецептур на основі органічних палив.

Таблиця 1.11

Тактико-технічні характеристики деяких типових серійних ГВА [84]

| Позначення ГВА | Вага АУС, кг | ∑ Вага ГВА, кг | Розміри ГВА, мм | Захищувальний об'єм при гасінні пожеж класу А2, В*, $м^3$ | Час роботи ГВА, с | Розміри зон аерозолю, м, з температурою, $^0$С, більше | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 75 | 200 | 400 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| МАГ-3 | 0,19 | 0,8 | D=75; L=151 | 1,5…2,2 | 5…9 | 1 | 0,4 | 0,2 |
| МАГ-14 | 5,4 | 25 | D=402; L=260 | 40…60 | 7…12 | 4 | 1,5 | 0,3 |
| АГАТ-2** | 9<br>2,5 | 82<br>75,5 | D=181; L=1250 | До 180<br>До 50 | 30 | 1,6 | 0,5 | 0 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| АГС-6 | 3,4 | 12.5 | D=167; L=420 | 52 | 35±6 | 0,5 | 0,25 | 0,05 |
| АГС-8/2 | 6,7 | 18 | D=220; L=350 | 124 | 140±21 | 1,5 | 0,25 | 0,1 |
| ОСАм-20/40 | 2,7<br>4,8 | 9,1<br>11,2 | D=200; L=260 | 31<br>57 | 35…100 | 0,32 | 0,12 | 0,04 |
| ОСАм-60 | 6,9<br>9,2 | 22,7<br>25 | D=260; L=290 | 81<br>108 | 35…100 | 0,32 | 0,12 | 0,04 |
| Пурга-К002 | 0,02 | 0,1 | D=28; L=140 | 0,15 | 7…10 | 0,2 | 0,1 | 0 |
| Пурга-МХ | 1 | 5,6 | D=100; L=623 | 8,5 | 20…25 | 0,9 | 0,2 | 0 |
| СПТС-80Х | 4,5 | 20 | D=220; L=350 | 80 | 185±15 | 0,5 | 0 | 0 |
| ФП-200 | 0,20 | 1,45 | D=80; L=110 | 2 | 13…20 | 0,5 | 0,3 | 0,05 |
| ФП-6300 | 6,3 | 18,5<br>+1,5 | a=315; b=250; l=195 | 70 | 31…41 | 3 | 1,5 | 0 |

Примітка *Класифікація пожеж за ДСТУ 27331

Таблиця 1.12

Мінімальна питома масова вогнегасна витрата АУС [64, 84, 96, 137, 141, 168, 177]

| Пальне | $C_{T0}$ АУС, г/м$^3$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | СТК – 5 – 1 | СТК – 2 МД | СБК | Л | ТЧ | Хладон 114В2 |
| Ацетон | 48 | 28-32 | 28-30 | 34-38 | 28-30 | 238 |
| Гептан | 65 | 38-42 | 36-40 | 48-56 | 33-39 | 278 |
| Толуол | 44 | 28 | 26-27 | 32-34 | 26 | 162 |
| Етанол | 46 | 33-35 | 30-32 | 36-38 | 32-34 | 267 |
| Бензин А- | 48 | 35-36 | 34-36 | 42-44 | 35-37 | 215 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 76 | | | | | | |
| Гас | 58 | 36 | 30-32 | 40-42 | 33-36 | 220 |
| $CH_4$ | 70 | 38-40 | 38 | 52 | 37 | 320 |
| $H_2$ | 220 | 150-160 | 140-150 | 165-170 | - | 1600 |
| ПММА | 54-60 | 30-36 | 28-36 | 44-48 | 27-35 | 283 |
| Гума | 54 | 30-31 | 30 | 38-40 | 29 | 270 |
| Деревина | 63 | 42-45 | 36-39 | 48-49 | 36-41 | 340 |

В таблицях 1.8 та 1.9 наведено результати випробувань автоматичних систем аерозольного пожежогасіння в умовах, максимально наближених до реальних, а також результати оцінки працездатності електротехнічної і радіоелектронної апаратури та виробів після впливу на них вогнегасних аерозолів. Результати вказаних робіт свідчать про ефективність застосування засобів пожежогасіння об'ємної дії для протипожежного захисту та відсутність шкідливого впливу вогнегасних аерозолів з вмістом неорганічних солей-інгібіторів горіння на працездатність електрообладнання та мінімальний вплив на навколишнє середовище зазначених компонентів аерозольних вогнегасних речовин [84, 97, 177].

Розроблена сьогодні велика кількість аерозолеутворювальних сумішей для гасіння пожеж в більшості випадків складається з типових компонентів. В якості окисників використовуються: нітрат калію, перхлорат калію, хлорнокислий калій (40-80%); в якості палива та одночасно зв'язуючого в більшості випадків виступають: епоксидні та фенол-формальдегідні смоли, каучуки, та інші органічні та неорганічні горючі компоненти; як додаткові компоненти-газоутворювачі: вуглець, диціандиамід, дифеніламін, гуанідин, сечовина, органічні полімери та інші речовини, а також спецдобавки, каталізатори та інгібітори горіння, які

призначені для усунення форсу полум’я, прискорення чи гальмування процесу горіння аерозольутворювальних складів.

За результатами аналізу патентної інформації слід зазначити таке. Композиційно аерозольні склади схожі на порохоподібні тверді матеріали, які готують шляхом змішування горючого зв'язувального, окисників, каталізаторів (регуляторів) горіння, пластифікаторів, які сумішам надають пластичних властивостей, наповнювачів, технологічних добавок, затверджувачів і охолоджувачів.

Горюче зв'язувальне з однієї сторони виконує роль горючої речовини, яка згоряє і при цьому утворюється висока температура, а з іншої сторони – це речовина, що полімеризується і утворює монолітну масу, яка зв'язує усі компоненти аерозольного складу і дає можливість проводити технологічну обробку – формувати вироби різної форми і маси.

Окисник є джерелом кисню для реакції горіння, а продукти розкладу окиснювача є інгібіторами реакцій горіння.

Каталізатор, або регулятор горіння, регулює швидкість згоряння горючого зв'язувального, щоб не виникло вибухового горіння та зменшилось виділення токсичних продуктів горіння.

Пластифікатори надають суміші пластичних властивостей, що дає змогу формувати вироби різної форми і розмірів.

Затверджувачі сприяють затвердінню горючого зв'язувального у сформованому виробі під час його термічної обробки, після затвердіння виріб можна різати, свердлити, шліфувати і т.п.

Технологічні добавки сприяють формуванню більш щільного виробу, а з іншої сторони вони є горючими речовинами і сприяють додатковому газоутворенню.

Вогнегасні аерозолі отримують здебільшого шляхом розкладання твердопаливних аерозольгенерувальних матеріалів – аерозолевих

вогнегасних речовин. Ці речовини являють собою спеціальні структурні композиції, основою яких є гетерогенні конденсовані суміші горючих (базових) компонентів та окисників з добавками (або без них) цільових і технологічних компонентів. За нормальних умов твердопаливні композиції характеризуються високою хімічною стабільністю, але під час нагрівання (від електричної спіралі, піропатрона, вогнища пожежі) здатні інтенсивно реагувати (згоряти) і забезпечувати бажаний ефект – утворювати вогнегасні аерозолі з прийнятними для ефективності пожежогасіння властивостями [178].

Горіння аерозольутворювальних сполук являє собою окисно-відновний процес. Як відновники зазвичай використовують горючі органічні або неорганічні речовини (метали, неметали, комплексні сполуки тощо), а окисниками є солі неорганічних кислот (наприклад, перхлорат або нітрат калію), оксиди металів, а також кисень повітря (або їх комбінації). Горіння твердопаливних композицій відбувається за високої температури (800-1000 °С і вище).

У результаті горіння можуть утворюватись такі продукти: суміші твердих і газоподібних речовин (наприклад, під час горіння сумішей фенолформальдегідної смоли з перхлоратом калію): $I5KClO_4 + 2C_{13}H_{12}0_2 = 15KC1_{(ТВ)} + 26C0_{2(газ)} + 12H_20_{(пара)}$; тверді речовини (наприклад, під час горіння терміту) $Fe_20_3 + 2A1$ -» $A1_20_{3(ТВ)} + 2Fe_{(ТВ)}$; газоподібні речовини (наприклад, під час горіння сумішей нітрату амонію з вуглецем або органічними речовинами): $4NH_4NO_3 + C = 3N_{2(газ)} + 2NO_{(газ)} + C0_{2(газ)} + 8H_20_{(пара).}$

Горіння різних за складом і хімічною природою компонентів твердопаливних композицій – складний процес, який можна умовно поділити на три стадії: ініціювання, займання і власне горіння (поширення вглиб). Для початку горіння необхідна зовнішня теплова дія (ініціювання),

тобто нагрівання хоча б частини речовини до температури займання. Після займання правильно підібраної композиції немає необхідності в подальшому її нагріванні, оскільки теплоти, що виділяється під час згоряння, достатньо для займання сусідніх шарів і самостійного горіння. Горіння твердопаливних композицій являє собою сукупність багатьох екзо- та ендотермічних процесів, а також дифузії і теплообміну. Воно починається в конденсованій, а закінчується в газовій фазі (полум'я).

Сполуки металів, що утворюються в результаті газофазових хімічних реакцій і перебувають у полум'ї в газоподібному (пароподібному) стані, потрапляючи в холодне навколишнє середовище, охолоджуються і перенасичують газовий простір. Відбувається їх конденсація з утворенням у потоці газу твердих частинок мікронних і субмікронних розмірів. Таку двофазову систему, що утворюється під час горіння, називають твердофазовим аерозолем. Найбільш перспективними композиціями для отримання вогнегасних аерозолів є твердопаливні, наприклад такі, що складаються з нітрату (або перхлорату) калію та фенолформальдегідної смоли. Вони згоряють практично повністю, утворюючи твердофазові аерозолі, тобто суміші негорючих газоподібних (азот, діоксид вуглецю, водяна пара тощо) і твердих речовин, головним чином сполук лужних та (або) лужноземельних металів (оксидів, гідроксидів, карбонатів, бікарбонатів, хлоридів та ін.).

Аерозольні вогнегасні речовини застосовують у вигляді вогнегасних зарядів, сформованих із попередньо подрібнених або розчинених компонентів, з використанням різних технологій (пресування, лиття та ін.). Вогнегасні заряди можуть бути різної маси, розмірів і конфігурації, але найчастіше мають циліндричну форму. Вони призначені для отримання і подавання вогнегасних аерозолів у вогнище пожежі та застосовуються,

головним чином, у замкнених (обмежених) просторах приміщень, споруд або окремих елементів стаціонарних чи пересувних об'єктів.

Вибір рецептур аерозолевих вогнегасних речовин для практичного застосування здійснюється з урахуванням 16-24 показників, серед яких є фізико-хімічні, балістичні, вибухові, механічні, експлуатаційні та показники вогнегасної ефективності. Під час вибору рецептур, призначених для застосування в установках аерозольного пожежогасіння, враховують також токсичні, оптичні, електричні властивості аерозолю, можливість руйнування озонового шару, корозійну активність тощо.

Усі сполуки, що входять до складу вогнегасних аерозолів, мають бути безпечними для довкілля, але деякі з них можуть бути небезпечними для людей, які перебувають у захищуваному приміщенні. Тому забороняється застосування автоматичних установок аерозольного пожежогасіння у приміщеннях, які не можуть бути залишені людьми до початку роботи генераторів вогнегасного аерозолю, з масовим перебуванням людей (більше 50 осіб), а допуск персоналу в приміщення, що захищається дозволяється після провітрювання та зниження концентрації аерозолю, коли видимість становить не менше 5-6 метрів. Застосування АУАП для гасіння пожеж в приміщеннях з електроустановками та електрообладнанням до зняття з них напруги допускається за умови, якщо її значення не перевищує гранично допустимої величини напруги, яка наведена в технічній документації на ГВА.

Проте більшість з цих складів мають недоліки, зокрема вони є багатокомпонентними сумішами, що збільшує собівартість складу, мають високу температуру горіння, під час горіння виділяють багато токсичних речовин. Крім цього виробництво відомих АУС потребує застосування складного обладнання та використання високовартісних складових

компонентів, які використовуються як каталізатори або інгібітори горіння. Основним загальним недоліком для більшості аерозольутворювальних складів є їх порівняно високі вогнегасні концентрації. Крім того, продукти горіння, згідно з термодинамічним розрахунком, містять від 0,8 % до 2,2 % чадного газу, температура горіння при цьому становить 1512 К. Вогнегасна концентрація аерозолю – 20-133 г/м$^3$, що є на рівні деяких вогнегасних порошкових засобів [178].

Вогнегасні аерозолі – вогнегасні речовини, які містять одночасно як теплові флегматизатори, ($CO_2$, $N_2$ $H_2O$), так і хімічні інгібітори ($K_2CO_3$, $KHCO_3$ KCL), які утворюються при згорянні аерозолеутворювальних сполук. Також при їх горінні утворюється ряд солей інгібіторів, а саме: $K_2CO_3$, $NH_4HCO_3$, KOH, $KHCO_3$ KCl, $KNO_2$ та інші. Склад аерозолю наведено в таблиці 1.12. В роботі авторів [179] зазначено, що дисперсність утворюваних частинок становить близько 1 мкм.

Таблиця 1.13

Характеристики АУС [84, 82]

| № з/п | Компоненти АУС | Хімічний склад АУС | Розмір частинок аерозолю | Вогнегасна концентрація, г/м$^3$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | СТК-5-1. (Ідітол, $KNO_3$ (техн..) добавки, ⌀ 160 мкм) | $K_2CO_3$*2$H_2O$, KOH, $KNO_2$, $CO_2$ $N_2$. | <2 (42)<br>2-5 (38)<br>>5 (20) | 65-68 |
| 2 | СТК-2МД. (МГИФ) (Ідітол, $KNO_3$(техн.) ДЦДА техн. добавки, ⌀ <160 мкм) | $K_2CO_3$*2$H_2O$, $KHCO_3$ KnOm, KOH, $NH_4HCO_3$ $CO_2$, CO, $N_2$. | <1 (52)<br>1-2 (24)<br>2-5 (16)<br>>5 (8) | 38-42 |
| 3 | СТК-НТ. (СТК-24МФ) | $K_2CO_3$*2$H_2O$, | <2 (32) | 140-155 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | (Ідітол, $KNO_3$ (техн..) добавки, ⌀ 200 мкм) | KOH, $KNO_2$ $CO_2$, $N_2$. | 2-5 (42)<br>>5 (26)<br>>5 (8) | |
| 4 | Л(ПАС -11-8, Е-1) (ЄД/пласт./затв., ) $KNO_3$, $KCLO_4$,± Mg, техн. добавк ⌀ <160 мкм. | $K_2CO_3*2H_2O$ $KHCO_3$, C, KOH, KCL, ,± MgO, $CO_2$ $N_2$ | <1 (40)<br>1-2 (22)<br>2-5 (20)<br>>5 (18) | 45-52 |
| 5 | ПАС47М (ПЄ /пласт./затв. $KNO_3$ $KCLO_4$, ±NaCL)техн. добавк ⌀ <160 мкм. | $K_2CO_3*2H_2O$, C, KOH, KCL ±NaCL $CO_2$ $N_2$ | <1 (36)<br>1-2 (20)<br>2-5 (24)<br>>5 (20) | 54-56 |
| 6 | ТЧ (ПТ-4, ПТ-50) НЦ/пласт. $KNO_3$, техн. доб, ⌀ <160 мкм | $K_2CO_3*2H_2O$, C, $KHCO_3$, $KNO_2$ KOH $CO_2$ $N_2$ CO, N, $*O^y$ | <1 (60)<br>1-2 (22)<br>2-5 (10)<br>>5 (8) | 33-39 |
| 7 | Багр -1 (Сахароза, $KNO_3$(техн.) $KCLO_4$, ДЦДА техн. добавки, ⌀ <160 мкм)) | | | 18-22 |
| 8 | Ідітол $KNO_3$, техн. [82] | | | 18-26 |

Кінцевий склад вогнегасного аерозолю визначається вихідною рецептурою аерозолеутворювальної речовини. В деякій мірі він також залежить від конструкції ГВА. Відповідно до нормативних актів в технічній документації для ГВА повинні бути вказані кількість і склад продуктів, що утворюються при роботі генератора [178].

Як відомо аерозолеутворювальна сполука (АУС) – твердопаливна композиція, здатна до самостійного горіння з утворенням вогнегасного аерозолю, застосовуваного для об'ємного пожежогасіння. АУС являє собою хімічну систему, основою якої є конденсована суміш окислювачів і горючих компонентів з цільовими і технологічними добавками. Окислювачами в типових АУС є в основному кисневмісні солі калію: нітрат (селітра) $KNO_3$ і (або) перхлорат $KClO_4$, рідше – нітрати натрію $NaN0_3$, барію Ba ($N0_3$) і деякі ін. Горючою основою більшості АУС є органічні речовини: сажа, смола, каучук, нітроцелюлоза, сахароза та ін. Для забезпечення необхідних характеристик в якості цільових компонентів широко застосовуються: азотовмісні органічні сполуки – для підвищення газоутворюваності, вогнегасної здатності АУС та зниження температури аерозолю; металевий магній – для інтенсифікації процесу одержання аерозолю); карбонати калію, магнію, кальцію, хлориди калію, натрію, – для зниження температури утворюваного аерозолю; хромати калію і амонію для інтенсифікації процесу аерозолеутворення, та ін. Масова частка частинок розмірами від 0,1 до 5 мкм може становити 90%.

Внаслідок малих розмірів часток (від 0,01 мкм до 10 мкм) вогнегасний аерозоль здатний тривалий час перебувати в завислому стані, займаючи весь об'єм, що захищається. У газовій фазі продуктів горіння АУС як правило переважають азот і діоксид вуглецю. На базі компонентів такого типу створено і застосовуються модифікації твердопаливних АУС різного призначення. Ефективність і механізм об'ємного аерозольного гасіння визначається такими основними явищами, як: інгібування хімічних реакцій в полум'ї новоутвореними високодисперсними твердими частинками аерозолю ($K_2CO_3$, KCL, KOH, $KHCO_3$); розбавлення горючого середовища двоокисом (діоксидом) вуглецю, азотом, парами води, охолодження зони горіння аерозолем.

Саме одержання аерозолю безпосередньо в момент гасіння пожежі сприяє підвищенню його вогнегасної здатності завдяки ефекту «свіжої», тобто активної, поверхні часток, що беруть участь у процесі рекомбінації радикалів полум'я [180]. Висока дисперсність аерозолю, який утворюється, сприяє різкому збільшенню часу витання, а отже і часу перебування часток у полум'ї. Час «життя» аерозолю може становити 40-50 хвилин.

Як видно з таблиці 1.13, об’єм газів, які утворюються при горінні АУС, становить до 0,5 л з 1 г, що достатньо для створення концентрації газу в 1 $м^3$ до 90 л, що становитиме до 0,9 % і є зовсім недостатнім для створення флегматизаційної концентрації для $CO_2$, $N_2$ та водяної пари, які є значно більші і лежать в районі від 33% до 45 %. Виходячи з цього приходимо до думки, що вогнегасна ефективність бінарної суміші буде визначатись сумарною дією компонентів, основними з яких будуть інгібуючий та теплопоглинаючий ефекти. Відповідно можна передбачити, що АУС з різним коефіцієнтом газоутворення будуть володіти і різною вогнегасною концентрацією. Отже виникає необхідність експериментально підтвердити вогнегасну ефективність вказаних аерозольутворювальних сумішей та теоретично розглянути фактори взаємного впливу газів та аерозольних частинок на процес гасіння горючих газових систем. Так, в таблиці 1.14 вказано характеристики та співвідношення компонентів твердої та газоподібної фаз.

Таблиця 1.14

Характеристики рецептур АУС на основі органічних палив [168]

| Співвідношення компонентів АУС [% масс] | | | Продукти горіння | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | тверда фаза, г/г АУС | | газова фаза, Vл/г АУС | | | V газів, л/г АУС |
| Пальне | $KNO_3$ | $KClO_4$ | $K_2O$ | KCl | $CO_2$ | $H_2O$ | $N_2$ | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ідітол | 17 | 83 | - | 0.3832 | - | 0.2522 | 0.1164 | 0.0916 | 0.4604 |
| Лактоза | 32 | 68 | - | 0.3186 | - | 0.2354 | 0.2354 | 0.075 | 0.5468 |
| Вуглець | 16 | 84 | - | 0.3910 | - | 0.2982 | - | 0,0932 | 0,3913 |
| Ідітол | 15 | 69 | 16 | 0,3219 | 0.0875 | 0.2118 | 0.0977 | 0.0767 | 0.3862 |
| Лактоза | 27,6 | 60 | 12,4 | 0,2793 | 0,0250 | 0,2063 | 0,2063 | 0,0666 | 0,4792 |
| Вуглець | 13 | 70 | 17 | 0,3254 | 0,0904 | 0,2481 | - | 0,0775 | 0,3256 |

Аерозоль у завислому стані здатний підтримувати вогнегасну концентрацію у всьому захищуваному об’ємі близько 30 хвилин [168].
Таким чином, в газоаерозольній системі реалізуються переваги вогнегасної дії аерозолів та газових засобів при гасінні об'ємним способом, а аерозоль при поглинанні $CO_2$ і $H_2O$ стає транспортером цих газів, зокрема до місця гасіння – полум’я. Відповідно, представляє цікавість взаємна зміна концентрацій цих газів при зміні концентрації аерозолю [168,137], при цьому співвідношення дисперсних частинок та газової фази для різних аерозольутворювальних складів буде різним і становитиме від 0,5 л до 3 літрів.

Щодо застосування згаданих газів, то згідно з Монреальським протоколом [157], $CO_2$ відноситься до парникових газів, викиди яких регламентуються, а дослідження інноваційних екологічно безпечних технологій є пріоритетними і відповідають пункту 4 статті 2 Протоколу. З метою зменшення викиду $CO_2$ в атмосферу і досягнення придатного для життєдіяльності середовища, доцільно також використовувати азот $N_2$, який широко застосовують в якості екологічно чистого вогнегасного агента [179, 160]. Азот, як вогнегасний агент, має такі цінні характеристики: хімічно нейтральний до більшості речовин, недорогий, поширений, молярна густина – 28,01 г/моль, що дає можливість рівномірно заповнювати об’єми. Вогнегасна концентрація $N_2$ становить для етанолу

($C_2H_5OH$) 36,8%, гексану ($C_6H_{14}$) – 30,6% і для n-гептану ($C_7H_{16}$) – 33,6 %, [170]. Розрахункова флегматизувальна концентрація $N_2$ становить 43,9 %, що вище від значення мінімальної флегматизувальної концентрації для хладонів в 3-4 рази [180, 181].

Існують і суміші газів, які розробники представляють, як екологічно чисті, так, наприклад, автори [182, 183] вказують, що суміш газів, яка містить 52 % азоту, 40 % аргону і 8 % діоксиду вуглецю, не залишає хімічних похідних, не токсична у будь-яких концентраціях. Зазначена суміш при введенні в об’єм, гасить полум'я шляхом зменшення концентрації кисню нижче рівня підтримання горіння (12,5%), і це при одночасному збільшенні концентрації кисню $CO_2$ до 4 % в закритому об'ємі. Відповідно таке газове середовище небезпечне для життєдіяльності людини, хоча і є відносно екологічно чистим. Як видно, зазначені концентрації газу, є достатньо високими і забезпечують вогнепригнічення тільки завдяки теплофізичним характеристикам і розбавленню горючого середовища. Підвищити ефективність припинення горіння можна шляхом додавання до газу флегматизатора вогнегасного аерозолю, беручи до уваги результати досліджень дисперсних сумішей інгібіторів і газів.

Відомо [184, 185], що аерозолеутворювальна суміш (АУС ) складається з окисника – як правило $KNO_3$, $KClO_4$ , $KClO_3$, пального-пластифікатора – ідітолу, епоксидно-діанової смоли, лактози та ін, і в окремих рецептурах газифікуючих добавок – диціандіаміду ($(NH_2)_2C=N—C=N$) дифеніламіду ($(C_6H_5)_2NH$) та ін. При горінні АУС, в атмосферу викидаються ультрадисперсні неорганічні солі калію – $K_2CO_3$ •2 $H_2O$, КОН, $KHCO_3$, та ін., а також у невеликій кількості – $CO_2$, $N_2$ та інші гази. Утворюваний аерозоль може бути стійким у повітрі і забезпечує вогнегасну концентрацію в 40-50 г/м$^3$ до 0,5 год.[186]. Але враховуючи розміри частинок аерозолю, які становлять в середньому близько 5 мкм,

вогнегасна ефективність аерозолів відповідно на кілька порядків вища за вогнегасну концентрацію порошків і становить для вуглеводнів 30-70 г/м$^3$ [187], а це – межа безпечних концентрацій для людини. В роботах багатьох авторів висвітлюється залежність вогнегасної ефективності від розміру частинок вогнегасної речовини. Так в роботі [187] показано, що зі зменшенням розміру частинок від 100 до 20 мкм вогнегасна ефективність гасіння дисперсними частинками солі KCl , NaCl, $K_2CO_3$, $KHCO_3$ та ін., різко зростає, як припускають автори, завдяки теплопоглинанню і випаровуванню цих частинок в полум'ї. В роботі [187] також показано, що вогнегасна ефективність усіх вогнегасних порошків збільшується із зростанням ступеня дисперсності, а автор [189] вказав, що чим дрібніші частинки, тим швидше і більше вони будуть прогріватися і відбирати тепло від зони хімічної реакції за одиницю часу і тим швидше буде вистигати полум'я. Однак розбавлення зони горіння і відведення тепла частинками порошку є недостатнім для того, щоб повністю припинити горіння. Так, у роботах [190, 191] було показано, що вогнегасний ефект порошків, завдяки інгібуванню на основі солей лужних металів значно перевищує ефект охолодження або розведення, тобто аерозольні частинки здатні ефективно гальмувати хімічні реакції горіння, діючи як інгібітори.

Автори робіт [192 - 194] показали, що існує пряма залежність між розмірами частинок і ефективністю вогнегасної речовини дисперсної фази, яка проявляється завдяки можливому випаровуванню цих частинок в полум'ї, які потім діють за схемою гетерогенно-гомогенного механізму. Підтверджують це автори [195], які виявили, що дисперсні солі $KHCO_3$ і $NaHCO_3$ із зменшенням розмірів частинок 63 мкм до 38 мкм при гасінні пропано-повітряного бунзенівського факела збільшують свою ефективність завдяки зменшенню вогнегасної концентрації від 100 г/м$^3$ до 30 г/м$^3$. Відомо, що більшість аерозолеутворювальних сполук при згорянні

утворюють аерозоль із розмірами частинок 1-5 мкм із співвідношенням до 80% [186]. Так, наприклад, аерозолеутворювальна суміш СТК-5-1, яка складається з ідітолу ($C_{13}H_{12}O_2$) , нітрату калію ($KNO_3$) та технічних добавок, при горінні виділяє $K_2CO_3$*$2H_2O$, KOH, $KNO_2$, $CO_2$, $N_2$, з розподілом розмірів частинок D<2μm (42%) D=2-5μm (38% ) D >5 (20%)μm [178, 186]. При цьому в продуктах горіння АУС різного складу, які залежать від виду горючого-пластифікатора і окисників, а також від їх співвідношення, може перебувати в середньому 0,5 л газових компонентів ($CO_2$, $H_2O$, $N_2$), причому продукти неповного згоряння (NxOy) до уваги не брали, виходячи з умови, що їх вміст незначний.

При додаванні газів-розчинників до зазначеного аерозолю вогнегасна ефективність отриманої бінарної газоаерозольної суміші (БГАС) повинна збільшитися. Отримання такого ефекту підтверджують автори [196, 197], вказуючи на синергізм фізичних і хімічних компонентів суміші і в результаті зниження вогнегасної концентрації фізичного компонента при додаванні лише 1,52 % хімічного інгібітора. Значне збільшення вогнепригнічувальної ефективності при комплексному застосуванні дисперсних вогнегасних засобів і газів підтверджують і інші автори. Так в роботі [166] зазначається, що з допомогою суміші вільних радикалів і агентів $N_2$ або $CO_2$, може бути досягнуто зменшення концентрації хімічних агентів в 3-4 рази. Аналіз загальних закономірностей процесів інгібування показує, що підвищити ефективність інгібувальних засобів можна знизивши вміст окислювача в горючій суміші, причому не у всьому приміщенні, а тільки в зоні дії інгібувальних речовин, тобто в зоні горіння. Таким чином, роблять висновок автори [198, 199], негорючі газоподібні компоненти додатково розбавляють горючу систему, знижують концентрацію кисню і тим самим різко підвищують ефективність вогнегасної дії інгібітора. При цьому автори [200] вказують,

що додавання азоту призводить до зменшення в 2,5 раза вогнегасної концентрації хладону 2402 під час гасіння n-гептану. Так, наприклад, розбавлення суміші «природний газ + повітря» на 10% азотом знижує вогнегасну концентрацію хладону в 2 рази, а при розбавленні на 20%, вогнегасна концентрація хладону становить всього 0,5-0,6 %. Подібний ефект спостерігається і при використанні $CO_2$. З роботи [196] відомо, що при пошуку ефективніших АУС, додавання невеликої кількості $CO_2$ до порошкових інгібіторів значно підвищує вогнегасну ефективність отриманої суміші, яка добре гасить полум'я пропану, що добре узгоджується з результатами роботи [176], де $CO_2$ в суміші з хладоном 1301 дає нижчі вогнегасні концентрації, ніж азот і аргон. Причому автори [176] на основі розрахунків температури полум'я вказали, що інертні гази ведуть до зниження температури полум'я, а інгібуючий ефект полум'я був посилений завдяки зменшенню температури полум'я, що призвело до синергічного підвищення ефективності пожежогасіння сумішшю хладону-1301 і $CO_2$.

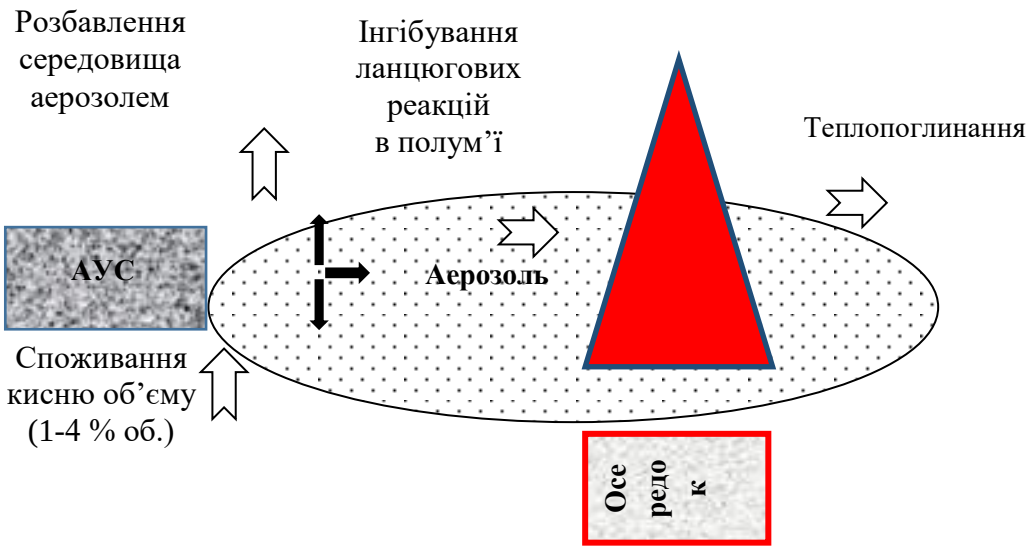



Рисунок 1.7 – Схемне зображення процесу утворення вогнегасного аерозолю АУС та його взаємодія з дифузійним полум'ям за об'ємного способу пожежогасіння

Таким чином, принцип об'ємного гасіння аерозолем з добавкою газів-флегматизаторів доречно розглядати як комбіновану дію вогнегасних засобів, які поєднують в собі ефекти охолодження, інгібування і розведення, що призводить до значного кінцевого вогнегасного ефекту. Схематично принцип дії показаний на рисунку (рис.1.7).

Виходячи з аналізу досліджень вогнегасних ефектів від добавлення газів-флегматизаторів до вогнегасних речовин, можна стверджувати, що незначна добавка азоту до аерозольного інгібітора істотно зпідвищує вогнегасну ефективність газоаерозольної суміші завдяки синергізму між аерозолем і азотом.

Загалом, процес гасіння газоаерозольною сумішшю такий: бінарна газоаерозольна суміш (БГАС), яка складається з двох компонентів: твердої фази вогнегасного аерозолю – суміші неорганічних солей калію $K_2O$, $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$, $KHCO_3$, KOH, KCl, $KNO_2$, подається в захищуваний об'єм разом з газом $N_2$, ($CO_2$), чим і досягається значний вогнегасний ефект.

Враховуючи проведений огляд особливостей взаємного впливу компонентів бінарних газоаерозольних сумішей на ефективність флегматизування вуглеводневих горючих середовищ в замкнутих приміщеннях, можна стверджувати про значну актуальність використання зазначених бінарних сумішей. Визначення ефективності та особливостей флегматизування бінарної аерозольної суміші та азотної є основою для створення вогнегасних і флегматизувальних систем на основі БГАС. Системи можуть зберігати концентрацію кисню, потрібного для життєдіяльності людини, є екологічно чистими і можуть застосовуватися для протипожежного захисту об'єктів різного призначення, де можливе виникнення вибухів і пожеж класів А, В, С, Е. Загалом дія вогнегасного аерозолю забезпечує такі фактори вогнегасного впливу (рис. 1.7). Загалом

на процес гасіння впливає зміна всіх параметрів, що приводить до зміни концентрацій реагентів [201].

Авторами [202] проведено дослідження з вогнепригнічувальної ефективності концентрації ($CO_2$+$H_2O$), ефективність всіх АУС зростає, що відображається у зменшенні необхідної вогнегасної маси АУС і вогнегасної концентрації газоаерозольної суміші. Але різні склади АУС і відповідно різні склади одержаних аерозолів по-різному реагують на зміну концентрації $O_2$ і ($CO_2$+$H_2O$). Також доцільно згадати, що такі інгібітори як галогеновуглеводні також проявляють більшу вогнегасну ефективність в області збагачених сумішей [203]. Крім того, як відомо, бромпохідні вуглеводнів проявляють набагато більшу вогнегасну здатність, ніж хлорпохідні, але не виключено, що і в цьому випадку суттєвими є чисто теплові фактори, бо бромпохідні легше дисоціюють і тим самим можуть впливати на температуру горіння.



Рисунок 1.8 – Фактори вогнегасного впливу комбінованих газоаерозольних систем.

Так, 2-3% такої теплоємної речовини, як тетрафтордіброметан [169], з теплоємністю парів 0,38 кДж/моль, енергією розпаду молекули, що починається при 450-500°С становить 273 кДж/моль, дійсно може суттєво змінити теплофізичні параметри горючої суміші.

Результати робіт [204], відображають залежність ефективності аерозолів від сумарної концентрації $CO_2$+$H_2O$ при одночасному зниженні концентрації кисню, та показують позитивний вплив індивідуальних газових розріджувачів ($CO_2$ і $N_2$) на вогнегасну ефективність аерозолів. В роботі [205] окремо досліджували вплив парів води. Результати показали, що мінімальна вогнегасна концентрація аерозолю в осушеному повітрі збільшується на 17-18%, тобто вогнегасна ефективність аерозолю погіршується. Після заповнення камери повітрям з відносною вологістю 75% (вологість контролювали психрометром), ефективність аерозолю збільшувалась до попереднього значення. Подальше збільшення вмісту вологи, аж до насичення, практично не впливало на ефективність аерозолю.

При вирішенні питання, який інертний газ краще використовувати, стає очевидним те, що азот, завдяки його малій токсичності, має безумовну перевагу над $CO_2$, хоча його допоміжна дія дещо нижча від $CO_2$. Так, наприклад, введення 5% $N_2$ дозволяє знизити мінімальну вогнегасну масу заряду в 3,5 раза, при цьому концентрація кисню знизиться до 20 % об. Зниження мінімальної вогнегасної маси заряду АУС в 3,5 раза шляхом введення $CO_2$ досягається при його концентрації 3,0% об. [112, 113, 180, 203]. Так, збільшення концентрації кисню [205] в 1,4 раза з 21 до 30% об., приводить до збільшення мінімальної вогнегасної маси заряду АУС в 7 разів (від 7 до 50 г/м$^3$). Із залежності випливає, що з моменту досягнення

концентрації кисню 30% об. і вище, аерозоль втрачає вогнегасну ефективність. З цього приводу доцільно навести дані роботи [206], де вказується, що порошки на основі бікарбонату і хлориду калію проявляють вогнегасну здатність при концентрації кисню не більше 30-33% об., але вогнегасна концентрація порошків набагато більша, ніж аерозолів.

Це явище можна пояснити тим фактом, що в середовищах з підвищеним вмістом кисню процеси горіння характеризуються великими швидкостями і що найголовніше – високим рівнем тепловиділення. Тобто створюються умови, які потребують більшої кількості теплового флегматизатора, в ролі якого виступає аерозоль і наступає момент, коли властивості аерозолю не задовольняють умови гасіння, а тверді частинки $K_2CO_3$ і KCl також не здатні виконувати функції інгібітора.

Взаємовплив газів і аерозолю розглянемо почергово з обох сторін. У першому випадку проаналізуємо дію негорючого газу на аерозольне середовище, що утворюється при спалюванні АУС.

Для розбавлення концентрації кисню в газоповітряному середовищі можна використовувати газові вогнегасні суміші, які залежно від виду горючих речовин здатні швидко знизити концентрацію кисню [207].

Роль газової фази в процесах гасіння аерозолями необхідно розглядати одночасно з наявністю твердої фази, тобто, як комбінований засіб гасіння. В роботі [208] описано, що комбіновані засоби проявляють вищу вогнегасну ефективність, ніж індивідуальні речовини. Приміром, розрідження суміші природній газ + повітря азотом на 10 % знижує вогнегасну концентрацію хладонів в 2 рази. Також у працях [208, 82] вказується, що наявність інертних газових розріджувачів сприяє підвищенню ефективності вогнегасної дії хладонів, відтак, після додавання азоту концентрація кисню знижується всього до 19 % (об.), а необхідна концентрація хладону зменшується в 2,5 раза.

Нейтральний газ, що надходить в зону реакції, розріджує горючу суміш, знижуючи концентрації горючого і окисника, при цьому знижується ймовірність активних зіткнень між молекулами горючої речовини та окисника. В результаті цього падає швидкість хімічної реакції, а отже швидкість тепловиділення і швидкість поширення полум'я. Хоч гази не виступають у якості інгібіторів, проте можуть впливати на утворення і склад продуктів горіння горючої речовини. З практики відомо, що вогнегасні концентрації нейтральних газів визначаються не тільки видом розріджувача, а залежать також і від виду пального та інших факторів. Крім припинення горіння шляхом простого розбавлення горючого газового середовища, нейтральні гази через відмінність своїх фізичних властивостей також по-різному впливають на енергетичні процеси, що відбуваються в зоні горіння. Так, потрапляючи в цю зону, вони нагріваються від температури навколишнього середовища до температури близько 1000°С, відбирають при цьому певну кількість тепла. Кількість тепла, яке відводиться, можна визначити за формулою 2.1:

$$Q_{нг}=V_{нг}\cdot\rho_{нг}\cdot c_{нг}\cdot t_{нг} \qquad (2.1)$$

де $V_{нг}$ – об'єм нейтрального газу, який подається у зону горіння, $м^3$;

$\rho_{нг}$ – густина нейтрального газу, $м^3/кг$;

$c_{нг}$ – питома теплоємкість нейтрального газу, кДж/(кг-К);

$t_{нг}$ – різниця температур нейтрального газу і речовини в зоні горіння, К.

В результаті поглинання частини тепла газом-розріджувачем знижується температура суміші, тобто частота ефективних зіткнень реагуючих частинок.

Таким чином, чим вища теплоємність нейтральних газів, які вводяться в зону реакції, тим ефективніша її вогнегасна дія.

Відомо [206], що незначне зниження концентрації кисню значно впливає на швидкість горіння. Компоненти газової фази $CO_2$ і $H_2O$

безпосередньо як теплові флегматизатори діяти не можуть у зв'язку з тим, що їх концентрація є невисока. Таким чином, газова фаза значно впливає на вогнепригнічувальну ефективність аерозолю і її роль в процесах флегматизування газо-аерозольними сумішами є визначальною.

Таблиця 1.15

Екологічна небезпека вогнегасних засобів [80]

| Вид вогнегасних речовин | Забруднення атмосфери* | Забрудення грунтів* | Забруднення грунтових вод* | Забрудення водних ресурсів* |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Твердофазові (вогнегасні порошки) | 1 | 3 | 3 | 0 |
| Рідиннофазові неводні | 0 | 5 | 5 | 5 |
| Вода | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Підігріта вода | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Рідиннофазові водні | 0 | 4 | 5 | 5 |
| Рідиннофазові водопінні | 0 | 5 | 5 | 5 |
| Рідиннофазові водоемульсійні | 0 | 5 | 5 | 5 |
| Рідиннофазові гелеутворю-вальні | 0 | 4 | 4 | 4 |
| Рідиннофазові комбіновані | 0 | 4 | 4 | 4 |
| Газофазові розріджувачі | 5 | 0 | 0 | 0 |
| Газофазові інгібітори горіння | 5 | 3 | 1 | 1 |
| Аерозолеві, (ТФ+ГФ) | 3 | 1 | 1 | 1 |
| Газоаерозольні Аерозоль+газ | 5 | 1 | 1 | 1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Ударні хвилі | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Комбіновані на основі ударних хвиль | 1 | 0 | 1 | 1 |

* - по пятибальній шкалі

Таблиця 1.16

Узагальнені відомості щодо параметрів екологічної небезпеки вогнегасних речовин за п’ятибальною шкалою [80]

| Вид вогнегасних речовин | Хімічна основа | Приклади | Показники екологічної небезпеки (клас небезпеки за ОРП, ПГП, ТЖА) | Вогнегасні концентрації | Небезпечнічинники та концентрації для людини | Час нейтралізації в природньому у середовищі | Спосіб утилізування |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| Твердофазові (вогнегасні порошки) | | | | | | | |
| АВС | ФАС | П-2АПМ; Р-11-24; Вексон АВС; | III-IV | | | | Спалювання або захоронення в могильнику |
| | ГН, СК, ССК | Пірант-А; Пірант-АН; | III-IV | | | | |
| ВС | ФАС+ХК | ФакторАВС-40 | III | | | | |
| | | | I-III | 50-200 г/м$^3$ | | До 10 років | |
| АВСD | Спец. композиції | ПСБ-3; Вексон ВС; Monnex; Карате | | | Від 50 г/м$^3$ | | |
| ЦП | | П-2АК | | | | | |
| | | ПГС; МГС; $CaF_2$; СИВК; ПС-1; ПХ; ПМГС; | | | | | |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | РС; Си-2; СаО | | | | | |
| Рідинно фазові неводні | $C_2F_4Br_2$<br><br>$C_6F_{12}O$ | Хладон2402<br><br>NOVEC1230 (хладон ФК-5-1-12) | ОРП-6; ПГП-1890; ТЖА-16<br>ОРП-0; ПГП-1; ТЖА-0,014 | 100-500 г/м$^3$ | Від 50 г/м$^3$ | До 20 років | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Вода | $H_2O$ | | IV | - | - | | |
| Підігріта вода | $H_2O$ | Спецтехнології | IV | Від 500 г/м$^3$ | Висока температура відсутні | | |
| Рідинно фазові водні | $H_2O$+ПАР | Дослідні зразки Вода зі змочувальниками | III-IV | 200-500 г/м$^3$ | Подразлива дія<br>відсутні | | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Рідинно фазові водопінні | $H_2O$+піноутворювачі | Пірена1; Пірена2; Пірена3; Альпен; Альпен М; Пегас; Сніжок; Пайрокул; ПО-3АИ; ПО-6М (Морпен); ПО-6К; ПО-6НП | III-IV | 200 - 500 г/м$^3$ | Подразлива дія відсутні | До 10 років | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Рідинно фазові водоемульсійні | $H_2O$+модифікувальні добавки | Дослідні зразки | III | 200 - 500 г/м$^3$ | Подразлива дія | До 10 років | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Рідинно фазові гелеутворю-вальні | $H_2O$+модифікувальні добавки | PREVENTO; дослідні зразки | III-IV | 200 - 500 г/м$^3$ | Подразлива дія | До 10 років | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Рідинно фазові комбіновані | $H_2O$+ПАР+ІГ+ модифікувальні добавки | ОС-5; ОС-А1, Дослідні зразки; | III-IV | 200 - 500 г/м$^3$ | Подразлива дія | До 10 років | Спалювання або захоронення в |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | могильнику |
| Газофазові розріджувачі | $N_2$, Ar, $CO_2$ та їх суміші Novec 1230 | $N_2$, Ar; Інерген $CO_2$ | РВШЕ>43% РВШЕ>5% | $CO_2$ – 23% $N_2$- 33% Аргон- ХХ% | $CO_2$-8% $N_2$-ХХ% Аргон-ХХ% | Не нейтралізуються | |
| Газофазові інгібітори горіння | $CF_3Br$<br><br>$C_3F_7H$ | Хладон 1301<br><br>Хладон 227еа (FM-200) | ОРП-10-18; ПГП-7140; ТЖА-65<br><br>ОРП-0; ПГП-3220; ТЖА-29 | 100 - 300 г/м$^3$ | Від 20 г/м$^3$ | До 20 років | Спалювання в спеціальних печах |
| Аерозолеві, (ТФ+ГФ) | Солі калію, $H_2O$; $CO_2$; $K_2O$; $N_2$, $NO_2$ | МАГ-3; МАГ-4; АГАТ-2; АГС-6; ОСАм 20/40; ОСАМ-60; Пурга К002; Пурга-МХ; СПТС-80Х; ФП-200; ФП-6300; БАГР | III | 30-150 г/м$^3$ | Від 50 г/м$^3$ | Продукти аерозолю до 10 років | Спалювання або захоронення в могильнику |
| Комбіновані вогнегасні системи на основі ударних хвиль | Ударні хвилі Вогнегасні речовини об’ємної дії | ПКГПП | III-IV | 10-25 г/м$^3$ | Коротко часна дія надлишкового тиску від 50 г/м$^3$ | - | - |

При горінні та гасінні пожеж найбільш поширені реакції утворення $CO_2$, CO, оксидів азоту, оксидів сірки, а також галоїдовуглеводнів. Ці речовини забруднюють атмосферу, грунти, та водні ресурси. Окреме актуальне питання це – руйнування озонового шару продуктами термічного розкладу та згорання.

Існують два головних види забруднення атмосфери: природний і штучний (антропогенний). Відомо, що вуглекислий газ утворюється при спалюванні майже всіх видів палив, деревини, полімерів, нафтопродуктів

та інш. Крім зазначеного $CO_2$ в атмосферу при горінні нафтопродуктів викидається багато сполук сірки, яка входить в склад майже усіх нафтопродуктів.

Типовими реакціями взаємодії сірки з оксигеном є

$$[S] + O_2 = SO_2.,$$

$$2SO_2 + O_2 = 2SO_2.$$

$SO_3$ утворюється значно менше (менше 1% від кількості $SO_2$). Також на більшості пожеж в атмосферу викидаються оксиди нітрогену (NO, $NO_2$), які утворюються з хімічно зв'язаного нітрогену або при реакції N2 та оксисену при температурах вище 1000 $^oC$.

$$N_2 + O_2 = 2NO.$$

Далі оксид азоту, що потрапляє до атмосфери, бере участь у вторинних реакціях:

$$2NO + O_2 = 2NO_2, \qquad 2\,SO_2. + O_2 = 2SO_3, \qquad NO_2 + O_2 = NO + O_3,$$

$$4NO_2 + O_2 + 2H_2O = 4HNO_3, \qquad SO_2. + H_2O = H_2SO_3,$$

$$SO_3. + H_2O = H_2SO_4.$$

Крім утворення в результаті пожеж $SO_2$ , NO, $NO_2$, $SO_3$., вказаних газів в атмосфері будуть утворюватись відповідні кислоти та випадати у вигляді кислотних дощів, про що свідчить значне зниження pH дощової води з 5,6 до 4,0 за останнє століття. При використанні вогнегасних засобів навколишнє середовище,а саме: грунти, водні ресурси та заголом уся біосфера зазанають забруднення. Якщо проаналізувати, яка кількість вогнегасних речовин викидається в біосферу, то лише в масштабах України ці значення становлять близько 7,5 тис. тон $CO_2$ 0,7 тис. тон хладонів, 1,5 тис. тон вогнегсних порошків. Загальна кількість викидів зазначених речовин наведена в табл.

Таблиця 1.17

Орієнтовна кількість викидів вогнегасних речовин по Україні та в світі [142]

| Вид вогнегасних речовин | Викиди в Україні, т | Викиди в світі, т |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Твердофазові (вогнегасні порошки)<br>АВС<br>ВС<br>АВСD<br>ЦП | 1500 | 2600000* |
| Рідиннофазові водопінні | 1000 | |
| Рідиннофазові комбіновані | Немає даних | |
| Газофазові розріджувачі | 7500 | 3800000* |
| Газофазові інгібітори горіння (озононеруйнівні) | 700 | 160000 |
| Аерозолеві | 200 | 6600* |

* - Дані взяті з різних джерел виробництв даних речовин.

Враховуючи наведені дані застосування вогнегасних речовин та комбінованих засобів на їх основі можна зробити висновок, що викиди зазначених речовин є на високому рівні, а особливо викиди ПАР.

## 1.5. Фізико-хімічний вплив вогнегасного аерозолю на дифузійне полум'я

Вогнегасна ефективність аерозолів на даний час є маловивченою і достеменно не відомо завдяки чому аерозоль має такі високі флегматизаційні характеристики. Якщо вважати, що гальмування процесу горіння здійснюється виключно завдяки дрібнодисперсним твердим частинкам $K_2O$, КОН, $K_2CO_3$ чи КСl, то залишається невиясненим, яким чином ці частинки проникають в зону горіння, адже відомо, що частинки

мікронних розмірів можуть просто не потрапляти в зону горіння дифузійного факела через їх малу інерційність [209], адже вони можуть захоплюватись супутніми конвективними потоками і виноситись вгору поза межі факела горіння. В роботі [210] чітко вказується, що порошки малих розмірів не потрапляють в зону горіння, що стосується і диспергованої води [211].

Оскільки аерозолі на швидкість витоку газу впливати не можуть, то залишається розглянути один з напрямків їх дії на полум'я – завдяки збільшенню швидкості обтікання навколишнім газом, або за принципом охолодження факела полум'я. Тепло, що виділяється полум'ям, відводиться головним чином не з зони горіння, а від дотичних до неї шарів, при цьому температура продуктів горіння стає меншою за температуру зони реакції. В результаті виникає температурний градієнт, спрямований в сторону продуктів горіння, після чого зона реакції починає охолоджуватись шляхом конвективної теплопровідності. Оскільки теплові витрати полум'я в обох напрямках в сторону вихідної суміші і в сторону продуктів горіння однакові [212], то, створюючи умови інтенсивного охолодження продуктів горіння та зони теплового спалахування, можна зменшити витрати тепла на нагрівання вихідної суміші, тим самим збільшуючи енергію активації, тобто створити умови, які призведуть до значного утруднення займання. Крім цього, зменшення розмірів частинок солей приводить до зменшення інтенсивності теплоутворення в результаті інгібування та відводу тепла в результаті розкладу солей. Створення таких умов дає змогу через холодну зону проникати більшій кількості компонентів аерозолю у внутрішню частину зони само спалахування, припиняти в ній процеси розвитку ланцюгових реакцій і зменшувати, або навіть припиняти таким чином зародження ланцюгових реакцій.

Відомо [209, 90, 82], що на нормальну швидкість поширення полум'я впливають аерозольні частинки. Характер цього впливу залежить від складу пилу, його кількості та розмірів. Якщо пил негорючий, то нормальна швидкість ($U_n$) горіння зменшується, причому чим менші розміри пилу, тим його вплив на швидкість горіння більший. Аналогічні результати описано в роботі [213] де показано, що вогнегасна і флегматизувальна ефективність порошку залежить від складу порошка та величини його частинок. Крім цього, у вузькій зоні поблизу зони локального нагрівання буде виділятись достатня кількість інертних газів внаслідок розкладання частинок аерозолю, які будуть частково потрапляти в зону горіння, що згідно з твердженням автора [168, 90, 82], буде приводити до підвищення ефективності інгібітора. В передполум'яній зоні аерозоль буде перебувати в зоні теплової дії і тим самим впливати на область займання горючої системи. З цього приводу доцільно згадати, що такі інгібітори, як хладони, також проявляють високу вогнегасну ефективність у збагачених сумішах [165, 176, 82]. В аерозолі $K_2O$ утворює з $CO_2$ чи $H_2O$ такі сполуки, як: $K_2CO_3$, або $KHCO_3$, або KOH [214, 82]. В свою чергу ці новоутворені сполуки, як відомо, легко утворюють гідратовані форми: $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$; $KOH \cdot H_2O$; $KOH \cdot 2H_2O$; $KOH \cdot 4H_2O$; $KCl \cdot 1{,}5H_2O$ і т.п [215, 82]. Оскільки ці частинки перебувають у дрібнодисперсному стані і є гідрофільними, то відповідно до визначення поняття аерозолів як систем [215, 82], вони є термічно нестабільними і при підвищенні температури вище 100°С починають розпадатися, а так як інтенсивність розпаду таких речовин прямо залежить від ступеня їх дисперсності, то очевидним є те, що дрібнодисперсні частинки аерозолю забезпечуватимуть високу інтенсивність тепловідводу від зони спалахування, тобто буде суттєво проявлятися ефект ендотермічного розпаду, а аерозолі можна розглядати як теплові флегматизатори.

Виходячи з цього, вогнегасну дію аерозолю потрібно розглядати як одночасну комбіновану дію інгібіторів горіння та теплових флегматизаторів.

Якщо взяти до уваги теплотехнічні характеристики компонентів аерозолю, то можна побачити таку ситуацію. Вихідні дані теплофізичних величин [216] брали вважаючи, що компоненти аерозолю нагріваються в полум'ї до 1400°С і потребують значного тепла для власного термічного розкладу, який відбувається при температурах для $2KHCO_3$ - 891 $^oC$ з утворенням $K_2O$, $CO_2$, $H_2O$ та мають такі значення теплоємності

Таблиця 1.18

Теплоємність компонентів аерозолю [217, 218, 219, 82]

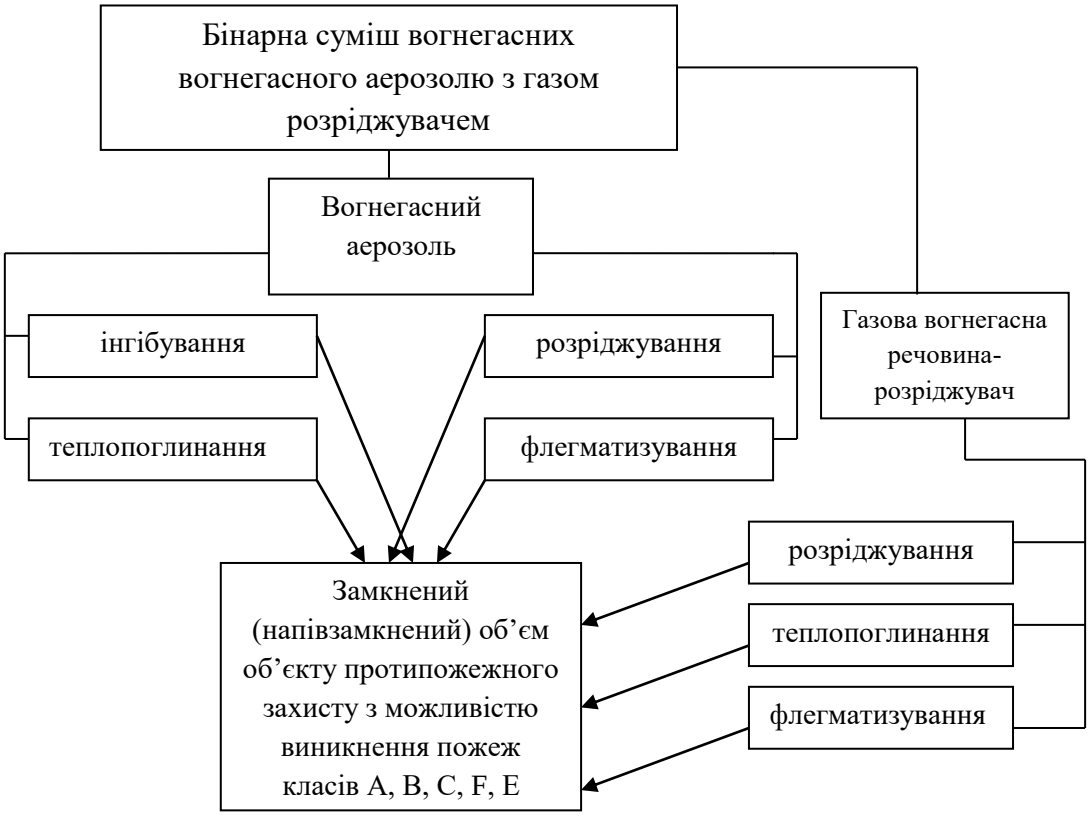
| Компоненти | Теплоємність, кДж/г |
|---|---|
| $CO_2$ | 1,652 |
| $H_2O$ | 3,192 |
| $N_2$ | 1,610 |
| $K_2O$ | 1,797 |
| $K_2CO_3$ | 4,980 |
| $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$ | 5,37 |
| $KHCO_3$ | 4,886 |
| KOH | 2,362 |
| $KOH \cdot 2H_2O$ | 2,637 |
| KCl | 1,653 |

Як видно, теплоємність продуктів горіння АУС, тобто утвореного АУС, достатньо висока, що свідчить про комбінований механізм гасіння аерозолем [215, 82, 90]. Виходячи з цього, вогнегасну дію аерозолю потрібно розглядати як одночасну комбіновану дію чинників інгібування та теплопоглинання.

Як бачимо, в таких кількостях АУС, як було вказано вище, дійсно вже можуть діяти як вогнегасні засоби, знижуючи концентрацію кисню шляхом звичайного розбавлення атмосфери інертними газами [219].

Наявність $CO_2$ і $H_2O$ в складі аерозолю буде сприяти його швидкому нагріванню через високу теплопровідність та теплоємність цих компонентів. Все це може привести до зменшення вогнегасних властивостей аерозолю. Так результати експериментів роботи [219, 220] показали, що при підвищенні температури аерозолю, спостерігається відповідне підвищення витрат аерозолю та інтенсивності його подачі для досягнення ефекту гасіння.

В продуктах горіння АУС різного складу, може знаходитись різна кількість газових компонентів ($CO_2$, CO, $H_2O$, $N_2$, $N_xO_y$) і твердої фази у вигляді дрібнодисперсних частинок ($K_2O$, $K_2CO_3$, $KHCO_3$, KOH, KCl, $KNO_2$). Загалом механізм дії бінарної суміші зводиться до такої схеми




(Рис.1.9).

Рисунок 1.9 - Умови гасіння в замкненому об’ємі бінарною газоаерозольною сумішшю.

**Ідея роботи** Викладене вище дало підставу для визначення ідеї роботи, яка полягає у зменшенні негативного впливу на довкілля пожеж шляхом застосування на початковій стадії ударних хвиль або їх комбінації з газовими та аерозолевими вогнегасними речовинами.

**Мета роботи** полягає у створенні наукових основ зменшення негативного впливу пожеж на довкілля, які враховують особливості та закономірності дії чинників на ефективність припинення горіння горючих середовищ ударними хвилями, у тому числі за комбінованого їх застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозолевими вогнегасними речовинами.

Для досягнення поставленої мети було поставлено до розв’язання такі задачі дослідження:

- проаналізувати світову та національну статистику пожеж, сучасних засобів пожежогасіння та виявити шляхи зменшення їх негативного впливу на довкілля;
- обґрунтувати методологію, методи та методики досліджень;
- теоретично обґрунтувати можливість застосування ударних хвиль для припинення горіння горючих середовищ;
- розробити методики і програми проведення експериментальних досліджень процесів припинення горіння дією ударних хвиль і їх комбінацій з екологічно прийнятними вогнегасними речовинами в лабораторних та полігонних умовах;
- провести експериментальні дослідження з виявлення ефективності дії ударних хвиль на процеси припинення горіння горючих середовищ;
- провести експериментальні дослідження з виявлення ефективності дії ударних хвиль на процеси припинення горіння горючих середовищ дією ударних хвиль та їх комбінованого застосування з екологічно прийнятними газовими вогнегасними речовинами та вогнегасними аерозолями;

- обґрунтувати схемні рішення, розробити та виготовити технічні засоби пожежогасіння, які реалізують технологію застосування ударних хвиль та їх комбінацій із вогнегасними речовинами об’ємної дії;
- провести полігонні випробування з перевірки теоретичних припущень та ефективності розроблених технічних засобів гасіння пожеж на їх початковій стадії;
- Розробити рекомендації та технічні документи щодо технології пожежогасіння із застосуванням ударних хвиль.

# РОЗДІЛ 2
# МЕТОДОЛОГІЯ І МЕТОДИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1. Аналіз методик експериментального визначення вогнегасної ефективності суміші вогнегасних речовин

Беручи до уваги, що вогнегасний аерозоль утворюється при згорянні АУС, в багатьох методиках передбачено його спалювання в камерах або циліндрах. Автор [221] пропонує спалювати наважки АУС в циліндрі висотою 30 мм та діаметром 40 мм з металевою сіткою для гасіння форсу полум'я. Запропонована металева сітка буде діяти як охолоджувальна насадка, а як відомо [185, 186], це знижуватиме вогнегасну ефективність аерозолю через недопал вихідних компонентів, що призведе до отримання занижених результатів вогнегасної концентрації аерозолю. Крім того, щоб зберегти реальну хронологію виникнення пожежі і часу гасіння, доцільно вносити джерело вогню в камеру, а не запалювати його всередині при наявному там аерозолі.

З аналізу прописаних в літературних джерелах методик, бачимо, що чіткої і послідовної методики для визначення мінімальної вогнегасної концентрації вогнегасного аерозолю на даний час немає, за винятком тих, що призначені для визначення МВК порошкових та газових засобів пожежогасіння, механізм гасіння яких відмінний від механізму гасіння аерозолями. Як відомо з [113, 153, 168] суміш інертних газів та вогнегасних аерозолів має підвищену вогнегасну та флегматизувальну ефективність. Тому для визначення вогнегасної концентрації суміші вогнегасного аерозолю та інертних газів (газів- розріджувачів) за основу можна взяти модернізовану методику визначення МВК методом "камери", запропонованої авторами [113,114].

Оскільки аерозольні засоби пожежогасіння є сумішами дрібнодисперсних твердих частинок солей калію та газів ($CO_2$, $N_2$, $H_2O$), то

методики для визначення МВК газових засобів пожежогасіння, після певного пристосування можуть бути використані для визначення МВК аерозолю. Детальний аналіз існуючих методик показав, що деякі їх положення не підходять для визначення МВК аерозолю, наприклад, подача вогнегасного засобу здійснюється через пальник разом з горючою сумішшю, що, згідно з положеннями про вогнегасну дію аерозолю, є не зовсім коректним для нашого випадку, оскільки реально при гасінні пожежі аерозоль знаходиться в захищуваному об’ємі та контактує по всій поверхні з полум’ям. Деякі автори вказують на те, що аерозоль одночасно діє за декількома напрямками [84, 85, 177, 222].

Такі умови реалізуються лише при контакті аерозолю з факелом полум’я, чого неможливо досягнути, використовуючи вищезазначену методику. Інша методика, яку використовували автори [223], передбачає контакт вогнегасного аерозолю з полум’ям, але не відображає реальних умов гасіння пожежі аерозолем. Згідно з цією методикою, після згорання АУС в камері вмикається вентилятор та перемішує аерозоль до рівномірного його розподілу та охолодження. Використання такої методики призведе до отримання некоректних результатів часу гасіння через те, що такий процес відсутній в реальних умовах на пожежі. Крім того в процесі перемішування можлива коагуляція частинок аерозолю, а з теорії порошкового гасіння відомо [87, 90, 91, 99, 41], що чим менший розмір порошкових частинок, тим вища їх вогнегасна здатність, відповідно збільшення розміру частинок аерозолю буде зменшувати його вогнегасну ефективність. Слід також відмітити, що об’єм камери є великим (170 л) і відповідно експериментальні наважки АУС повинні бути достатньо великими, що потребує більших матеріальних витрат на проведення експериментів. Також необхідно взяти до уваги, що під час гасіння приміщення має бути майже герметичним, тільки за таких умов відбудеться ефективне гасіння, оскільки нагрітий аерозоль конвективно

піднімається під стелю приміщення і тільки охолоджуючись рівномірно розприділяється в об’ємі захищуваного об’єкта [224].

Також існують методики [225-229], які спрямовані на підвищення точності вимірювань вогнегасних концентрацій порошкових складів, а що стосується аерозолів, то можна сказати, що існуючі методики потребують удосконалення. Виходячи з проведеного аналізу, бачимо, що необхідно розробити методику, яка буде враховувати особливості подавання та гасіння кожного компонента аерозольної суміші.

## 2.2. Методика визначення вогнегасної ефективності суміші вогнегасної речовини «Камера»

З метою вибору ефективної аерозольутворювальної суміші необхідно було виконати експериментальні дослідження різних комбінацій з різними співвідношеннями в аерозолі газів та твердої фази і з різними за хімічною природою горючими речовинами, дослідити залежність ефективності аерозолю від співвідношення аерозоль: інертний газ.

Для визначення вогнегасної ефективності та особливостей гасіння бінарною сумішшю використали такі матеріали та пристрої:

- аерозольутворювальна суміш, відповідної ваги заряду;
- хімічно чисті $CO_2$ та $N_2$;
- в деяких випадках для визначення особливостей гасіння проводили відеофіксацію фотокамерою Nikon 1J4 [230], з можливістю зйомки 3-секундних відеороликів з частотою кадрів від 60 до 1200 за 1 секунду при роздільній здатності 416x144P. За допомогою цієї камери при розкадровці відеороликів визначали поведінку полум’я при його гасінні;
- змінення температури визначали за допомогою хромель–алюмелевої термопари з товщиною провідника 0,3 мм та регулятора-перетворювача РТ–0102. Дані отримані в вигляді цифрових показників на інтерфейсі програми РП–8 розробник ПАТ НВО «Львівтермоприлад» в Windows (рис.

2.1);

- склад газового середовища визначали газовим аналізатором «Protege» та газовим хроматографом «Хром -5». Кількість газу визначалась за допомогою газового лічильника –Metrix 64 №007566255. Будову експериментальної камери показано на рис. 2.1.

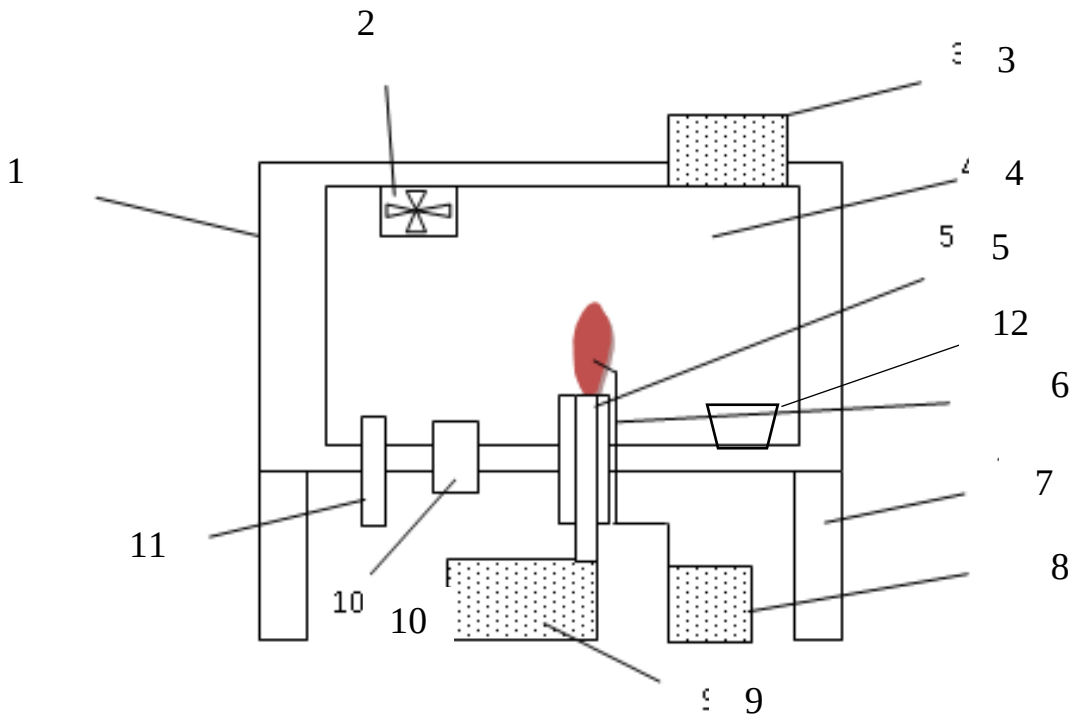



Рисунок 2.1 – Експериментальна установка для визначення вогнегасної ефективності вогнегасної речовини: 1 – корпус камери; 2 – вентилятор; 3 – отвір для продувки посудини; 4 – оглядове вікно; 5 – гептановий пальник; 6 – термопара хромель–алюмелева; 7 – стійки; 8 – регулятор-перетворювач 01–02; 9 – нагріваючий резервуар з гептаном; 10 – джерело запалювання АУС; 11 – труба подачі газу; 12 – тигель

Вогнегасну ефективність визначали на прикладі тигля з n-гептаном з прикріпленою термопарою, сигнал від якої передавався на регулятор-вимірювач 0102 виробництва ПрАТ НВО "Термоприлад" ім. В. Лаха (рис. 2.1), а з нього на електронний інтерфейс РП-8, на якій

отримували цифрове значення параметрів зміни температури та відповідно станів – «гасіння», «не гасіння». Визначення ефективності гасіння проводили таким чином. В камері запалювали n-гептан та давали час вільного горіння до 0,5 хв після чого спалювали наважку АУС, та за необхідності добавляли газ, кількість якого вимірювали за допомогою газового лічильника, після чого суміш перемішували і його концентрацію вибірково підтверджували газовим аналізатором «Protege» або хроматографом «Хром-5». Сама експериментальна установка представляє собою металеву камеру об'ємом 175 л з термостійким оглядовим вікном та металевою основою (рис. 2.1).

Детальніше методику та її елементи і послідовність виконання експерименту описано в роботах [231-234].

## 2.3. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та обємною вогнегасною речовиною для дифузійного полум'я n-гептану $C_7H_{16}$

Для визначення вогнегасної ефективності ударної хвилі потужністю від 100 Ра до 400 Па під час гасіння дифузійного полум'я n-гептану в тиглі діаметром 40 мм, було проведено експеримент в камері за такою методикою.

Експериментальна установка (рис.2.2) виконана наступним чином: камера з передньою панеллю розмірами: довжина 1980 мм, ширина 485 мм, висота 530 мм, в якій розташовано два люки для внесення тиглів, генератор ударних хвиль і датчик тиску та температури BMP-180 для контролерів Arduino, з часом реакції не більше 7,5 мс в нормальному режимі вимірювання [235]. Для контролера Arduino UNO була використана програма для виводу цифрових показників датчика в інтерфейсі CoolTerm._0.stk* [236]. Датчик був встановлений в камері на відстані 1,75

метра від генератора ударних хвиль. Сам генератор ударних хвиль (рис. 2.3) являє собою трубу діаметром 70 мм і отвором у задній кришці 7 мм, для запалювання піротехнічного заряду всередині генератора. Запалювання заряду здійснювали джерелом струму напругою близько 20 вольт.

Експеримент проводили так: у камері встановлювали тигель діаметром 40 мм і глибиною 35 мм з попередньо запаленим за 20 секунд n-гептаном, на відстані 1750 мм від генератора ударних хвиль вимірювали через 20 секунд теплову інтенствність випромінювання, після чого задіювали генератор ударних хвиль (рис. 2.2, рис.2.3) пропускаючи по камері ударну хвилю відповідної потужності і фіксували результат «гасіння», «немає гасіння», «зміни в полум'ї». Після кожної спроби об'єм камери продували, для наступного досліду. Обрані стани були зареєстровані на камеру Nikon 1 J4 з частотою зйомки близько 1200 кадрів на секунду. З отриманих відеороликів була зроблена розкадровка відповідних моментів.

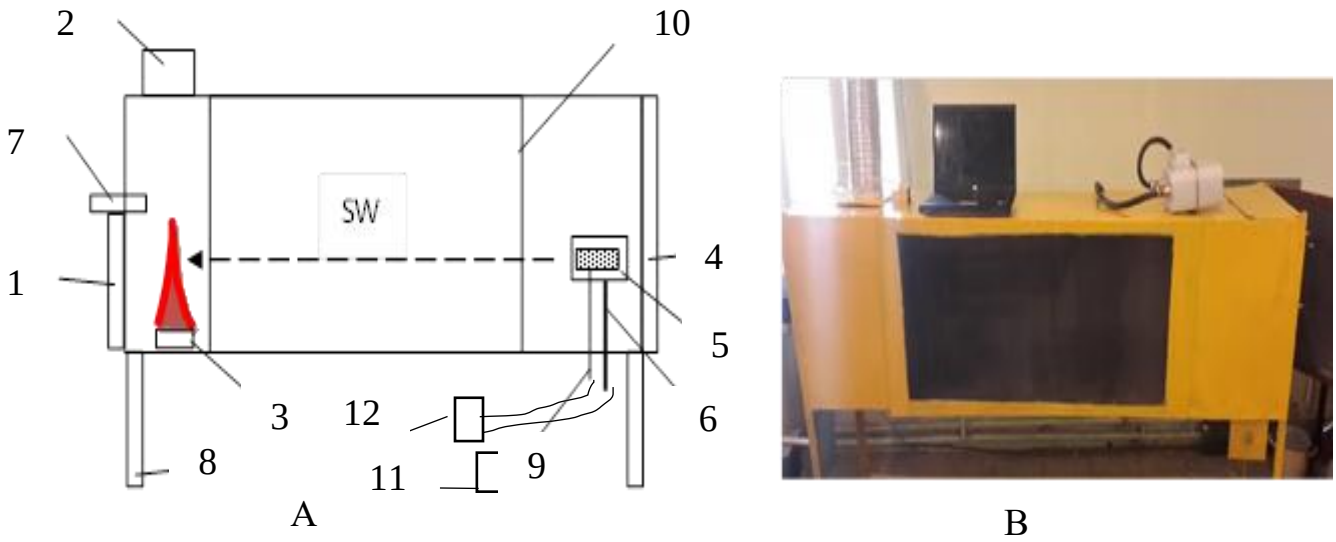



Рисунок 2.2 – Експериментальна установка для дослідження вогнегасної ефективності вогнегасних речовин та ударних хвиль в лабораторних умовах:

А – Схематичне зображення; В – Загальний вигляд

Камера об’ємом 0,5 м$^3$ та розмірами: довжина 1,98 м, ширина 0,485 м, висота 0,53 м). 1. Люк для тигля. 2. Вентиляційний отвір з вентилятором і засувкою. 3. Тигель. 4. Люк. 5. Генератор ударних хвиль. 6. Кріплення генератора ударних хвиль. 7. Вимірювач тиску УХ. 8. Стійки. 9. Електрозапальник. 10. Оглядове вікно. 11. Трансформатор перетворення напруги для подавання живлення на пристрій подавання електричних імпульсів на генератори ударних хвиль. 12. Багр –ПІ100.

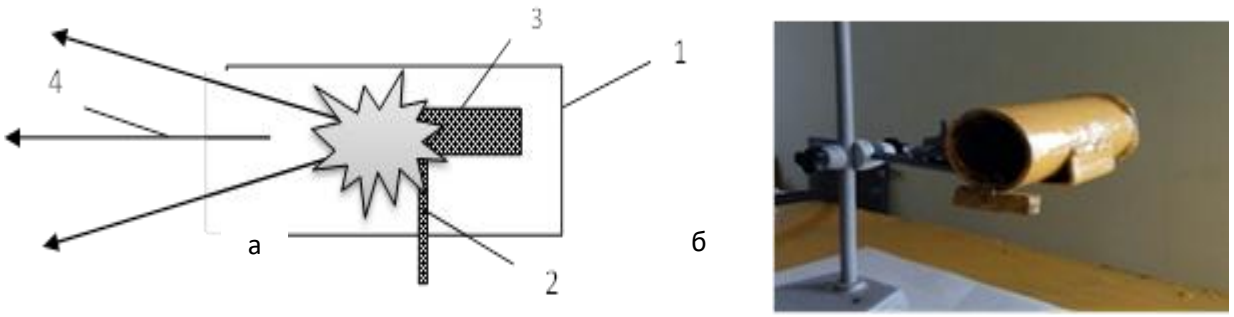



Рисунок 2.3 – Схематичне зображення (а) та фото (б) розробленого генератора ударних хвиль: 1 – корпус генератора ударних хвиль; 2 – електрозапальник; 3 – піротехнічний заряд; 4 – напрямок руху ударних хвиль

Щодо визначення ефективності серій ударних хвиль з різною частотою, то загалом використовувалась та сама методика, що і для одинарних ударних хвиль, лише для створення потрійних серій ударних хвиль використовували генератор ударних хвиль на 3 заряди (рис. 2.4).

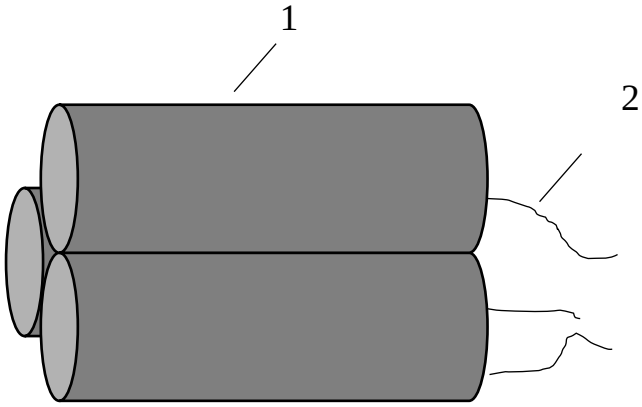


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення генератора 3-х ударних хвиль:
1 – корпус генератора; 2 – електрокабель

Генерування відповідної частоти подачі струму на електричні запальники проводили з допомогою електронної схеми на основі плати контролера Arduino, дисплея, перемінного резистора зміни часу затримки, кнопки та модуля реле. Запалювання заряду здійснювали джерелом струму напругою близько 20 В, яку отримували на виході з реле з відповідною частотою. Пристрій подачі електроімпульсів з заданою частотою показаний на рис. 2.5.

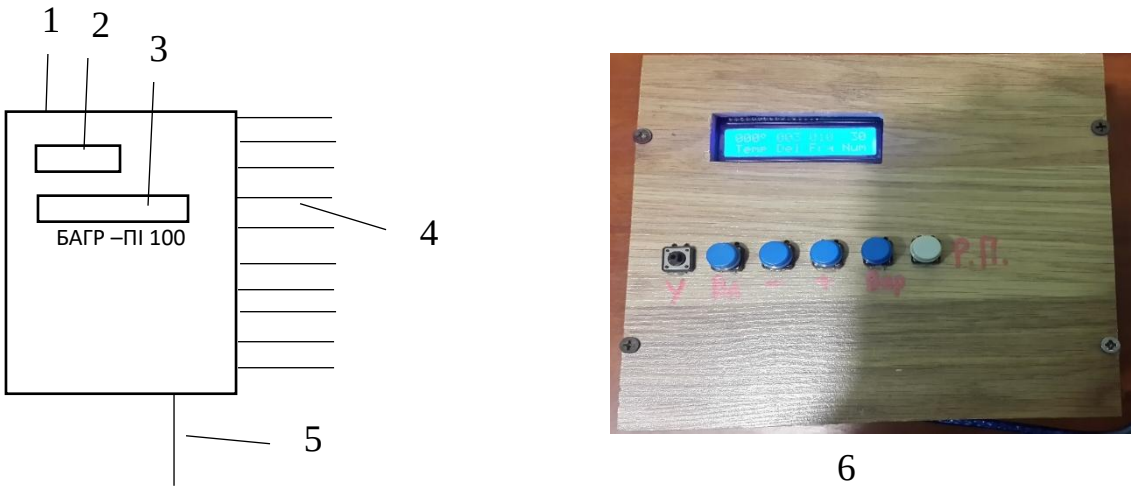



Рисунок 2.5 – Схематичне зображення розробленого пристрою подачі електроімпульсів Багр - ПІ100 із частотою у діапазоні від 1 до 100 Гц:

1 – корпус. 2 – інформаційне табло; 3 – панель управління; 4 – 30 контактів «+»; 5 – контакт «–»; а – схематичне зображення Багр – ПІ100; 6 – фото Багр – ПІ100

## 2.4. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та газовою вогнегасною речовиною дифузійного полум'я n-гептану.

Для визначення вогнегасної ефективності газів $CO_2$ і $N_2$ дією ударної хвилі, за основу було взято експериментальні дані щодо вогнегасної здатності одинарних та серій УХ. Далі був проведений експеримент з визначення впливу ударної хвилі потужністю від 125 Па до 180 Па на вогнегасну ефективність $CO_2$ і $N_2$ при гасінні дифузійного полум'я $C_7H_{16}$ в експериментальній камері за такою методикою і з використанням таких матеріалів. В експерименті використовували хімічно чисті, (99,9%) $CO_2$ і $N_2$. Експериментальна камера (рис. 3) виконана таким чином: камера з передньою панеллю розмірами: довжина 1980 мм, ширина 485 мм, висота 530 мм, що має два люки для внесення тиглів; генератор ударних хвиль і датчик тиску та температури BMP-180 для контролерів Arduino, з часом реакції не більше 7,5 мс в нормальному режимі вимірювання [235]. Для отримання інформації з датчика для контролера Arduino UNO була використана програма для виведення показань датчика в інтерфейсі CoolTerm._0.stk * [236]. Дані значень тиску отримували спочатку в CoolTerm._0.stk *, далі копіювали, і в Excel будували графіки. Датчик був установлений в камері на відстані 1,75 метра від генератора ударних хвиль. Сам генератор ударних хвиль (рис. 4) являє собою трубу діаметром 70 мм і отвором 3 мм в нижній стінці, для запалювання піротехнічного заряду всередині генератора. Запалювання заряду здійснювали джерелом електричного струму напругою близько 20 В. Експеримент проводили таким чином. У камері встановлювали тигель діаметром 40 мм і глибиною 35 мм з попередньо запаленим за 20 секунд n-гептаном, на відстані 1750 мм від генератора ударних хвиль (рис 2.6.), вимірювали теплову інтенсивність випромінювання. Після цього

заповнювали камеру газом відповідної концентрації і задіювали генератор ударних хвиль, пропускаючи по камері ударну хвилю відповідної потужності; фіксували результат – «гасіння», «не гасіння», «зміни в полум'я». Після цього спроби обсяг камери продували для наступного досліду. При проведенні експерименту, відповідні стани гасіння форми полум'я були зареєстровані на камеру Nikon 1 J4 з частотою зйомки 1200 кадрів за секунду.

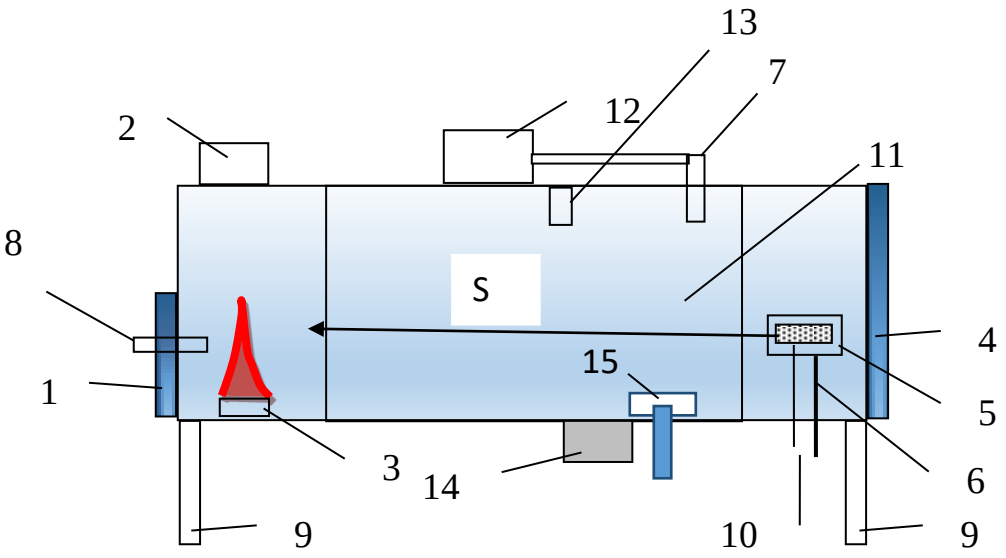



Рисунок 2.6 – Експериментальна установка для визначення вогнегасної ефективності об'ємного вогнегасної речовини під дією ударної хвилі: 1 – камера розмірами (довжина 1,98 м, ширина: 0,485 м, висота 0,53 м); 2 –вентиляційний отвір з вентилятором і засувкою; 3 – тигель; 4 – люк; 5 - генератор ударних хвиль; 6 – кріплення генератора ударних хвиль; 7 – патрубок для газу; 8 – датчик тиску bmp-180; 9 – стойки; 10 – електрозапальник аус; 11 – оглядове вікно; 12 – газовий лічильник; 13 – вентилятор; 14 – джерело живлення; 15 – запальник АУС

## 2.5. Методика визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та бінарною сумішшю вогнегасного аерозолю та газової вогнегасної речовини дифузійного полум’я n-гептану

З метою підтвердження теоретично обґрунтованого підвищення вогнегасної ефективності комбінованих бінарних газоаерозольних систем ударною хвилею за основу було взято попередньо описану експериментальну методику визначення вогнегасної здатності УХ. При цьому використовували хімічно чисті $CO_2$ і $N_2$. Методика для визначення ефективності комбінованих систем на основі УХ та бінарних газоаерозольних сумішей відрізняється тим, що для подачі аерозолю використовували запальник АУС та лічильник газу.

Експеримент проводили таким чином. У камері (рис. 2.7.) встановлювався тигель діаметром 40 мм і глибиною 35 мм з попередньо запаленим за 20 секунд n-гептаном, на відстані 1750 мм від генератора ударних хвиль (рис 2.7), вимірювали його теплову інтенсивність випромінювання, після чого заповнювали камеру газом відповідної концентрації, підпалювали АУС і перемішували вентилятором утворену суміш. Потім задіювали генератор ударних хвиль, пропускаючи по камері одну або серію ударних хвиль відповідної потужності і частоти і фіксували результат – «гасіння», «відмова», «зміни в полум'ї». Після кожної спроби обсяг камери продували для наступного досліду. Під час проведення експерименту, відповідні стану гасіння форми полум'я були зняті камерою Nikon 1 J4 з частотою зйомки 1200 кадрів на секунду і проведена розкадрування відеоролика.

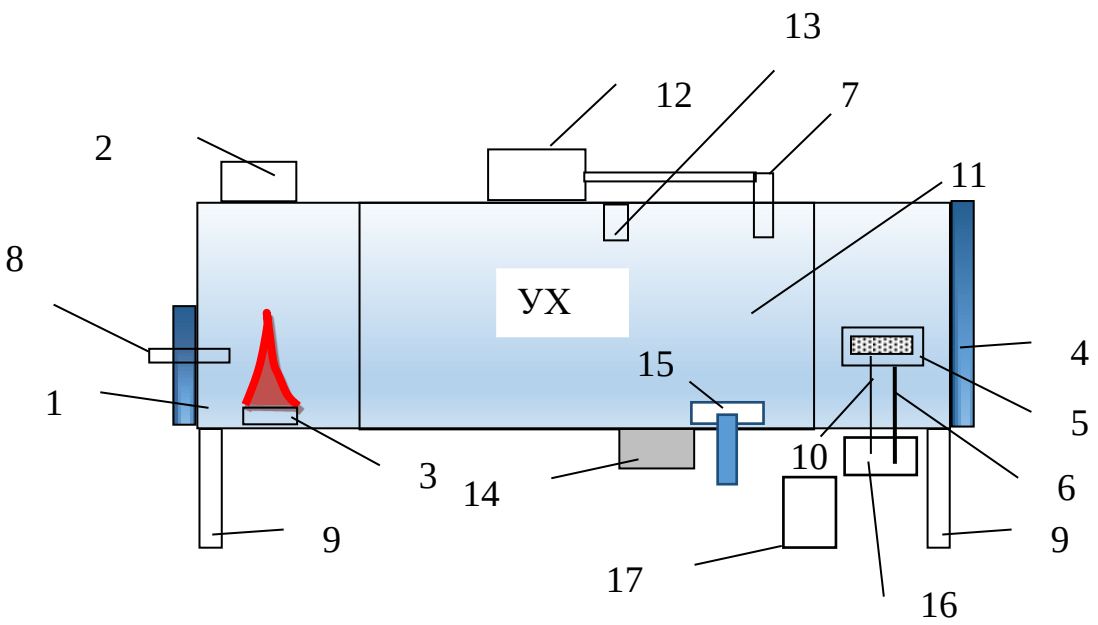


Рисунок 2.7 – Експериментальна установка для визначення вогнегасної ефективності об'ємного вогнегасної речовини під дією ударної хвилі: 1 – камера розмірами (довжина 1,98 м; ширина: 0,485 м; висота 0,53 м); 2 – вентиляційний отвір з вентилятором і засувкою; 3 – тигель; 4 – люк; 5 – генератор ударних хвиль; 6 – кріплення генератора ударних хвиль; 7 – патрубок для газу; 8 – датчик тиску bmp-180; 9 – стойки; 10 – електрозапальники; 11 – оглядове вікно; 12 – газовий лічильник; 13 – вентилятор; 14 – джерело живлення; 15 – запальник АСУ; 16 – трансформатор перетворення напруги для подавання живлення на пристрій подавання електричних імпульсів на генератори ударних хвиль; 17 – БАГР –ПІ100

## 2.6. Методологія проведення досліджень

Далі було розроблено методологію проведення досліджень, відповідно до якої передбачено проведення аналізу статистики пожеж та їх негативного впливу на довкілля, а також сучасного стану трактування процесів припинення горіння та засобів і технологій припинення горіння. Обрані методи проведення досліджень, за якими, із застосуванням розроблених методик, виявлених чинників впливу на процеси припинення горіння, створеного експериментального обладнання та результатів лабораторних і полігонних досліджень, передбачено створення наукових основ зменшення негативного впливу на довкілля пожеж на початковій стадії їх розвитку дією ударних хвиль та їх комбінацій з екологічно прийнятними вогнегасними речовинами. На рисунку 2.8 схематично зображено методологію проведення дисертаційних досліджень [237, 238].

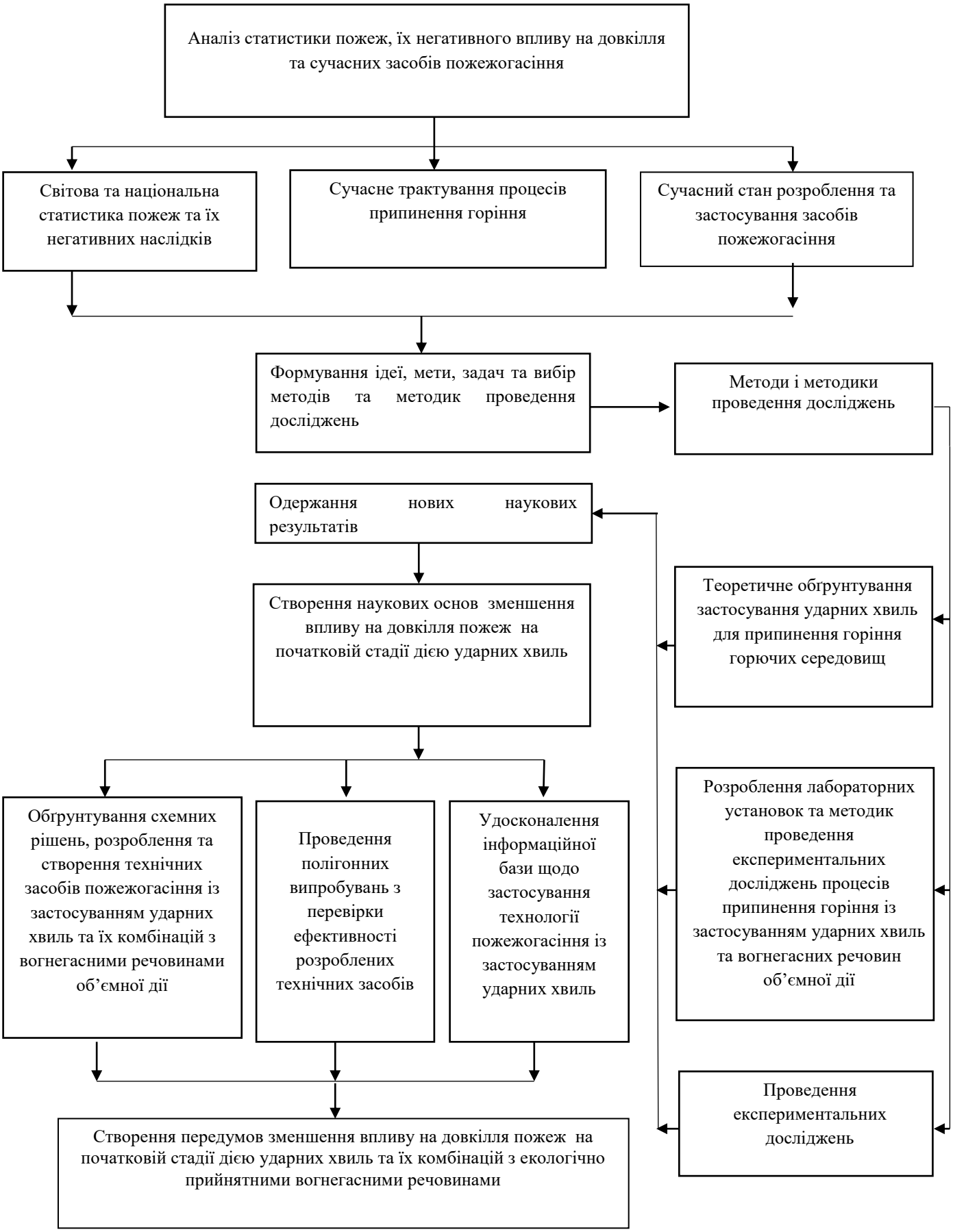



Рисунок 2.8 – Методологія та методи проведення досліджень

## 2.7. Висновки за розділом

- Проведено аналіз методик та установок з визначення вогнегасної ефективності вогнегасних засобів об’ємної дії. Встановлено, що для визначення вогнегасної ефективності аерозолю необхідно визначити зміну температури під час подачі його в зону горіння безпосередньо з потоком газу.
- Розроблено експериментальну методику та установку «Камера» для визначення вогнегасної ефективності аерозольних та бінарних аерозольно-газових сумішей, в якій для дослідження вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-азотної суміші використано два види полум’я – дифузійне та кінетичне.
- Розроблено експериментальну методику та установку для визначення вогнегасної ефективності одинарних та серій ударних хвиль, в якій для дослідження їх вогнегасної ефективності застосовано дифузійне полумя n-гептану. Для вимірювання тиску було використано датчик тиску BMP-180 виробництва фірми BOSH. При цьому для відеофіксації використано камеру Nikon 1J4 з можливістю зйомки 1200 кадрів за секунду. Для отримання результатів з датчика для контролера Arduino UNO була використана програма для виведення показань датчика в інтерфейсі CoolTerm._0.stk.
- Розроблено методику визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та об’ємною вогнегасною речовиною для дифузійного полум’я n-гептану $C_7H_{16}$. Для цього обрано АУС на основі ідітолу та нітрату калію.
- Розроблено методику визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та газовою вогнегасною речовиною дифузійного полум’я n-гептану, де в якості газових вогнегасних речовин було використано хімічно чисті $CO_2$ та $N_2$.

- Розроблено методологію проведення досліджень, відповідно до якої передбачено проведення аналізу статистики пожеж та їх негативного впливу на довкілля, а також сучасного стану трактування процесів припинення горіння та засобів і технологій припинення горіння.

# РОЗДІЛ 3
# ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ ХВИЛЬ ТА ЇХ КОМБІНАЦІЙ З ГАЗОВИМИ ТА АЕРОЗОЛЕВИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ ДЛЯ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

## 3.1. Теоретичні основи гасіння дифузійного полум’я ударними хвилями

При проходженні ударної хвилі через газ з твердою фазою, прискорюється, стискається і нагрівається тільки газова фаза, оскільки мікроскопічні частинки аерозолю рідко стикаються між собою, а при взаємодії з газом їх швидкість і температура змінюються порівняно повільно [240]. За ударною хвилею в зоні релаксації відбувається поступове вирівнювання швидкостей течії і температури компонентів [240]. Відомо [241], що у структурі ударної хвилі стиснення наявні дві області: область так званого в’язкого скачка ущільнення, яка утворюється під дією в'язкості та теплопровідності, і релаксаційна область, обумовлена іншими, порівняно повільними релаксаційними процесами, зокрема, розрідженням (якщо такі є) [242, 243]. Ударна хвиля малої інтенсивності, що поширюється по холодному газу ($T1 \ll 1000$ K), спричиняє коливання і незначну зміну складу газу, а структура ударної хвилі визначається лише скачком ущільнення. Вплив ударної хвилі на параметри середовища та полум’я необхідно розглядати, виходячи зі структури та швидкості процесу горіння.

Отже, при проходженні ударної хвилі через полум’я будуть реалізовуватись майже всі умови, які призводять до припинення горіння та зазначені в табл. 3.1. На ефективність процесу гасіння найістотніше впливатиме зміна концентрації реагентів у зоні реакції – локальне збільшення концентрації вогнегасного аерозолю в зоні горіння та

проникнення в зону реакції інгібіторів і флегматизаторів разом з газовою сумішшю, яка додатково містить $CO_2$, $H_2O$ (пара) та надлишкову кількість азоту $N_2$.

Таблиця 3.1

Зміна параметрів зони реакції горіння ударною хвилею

| Зниження q (+) інтенсивності тепловиділення в зоні реакції | | Збільшення q (–) інтенсивності тепловідведення з зони реакції | | |
|---|---|---|---|---|
| зміна концентрації реагентів у зоні реакції (зменшення $C_i$) | хімічне гальмування швидкості реакції(підвищення $E_a$) | зниження температури навколо зони горіння | збільшення площі тепловіддачі | підвищення ефективності теплопередачі |
| – розведення системи одним з компонентів чи припинення доступу іншого компонента;<br>– введення інертних речовин;<br>– зниження тиску | – введення в в зону реакції хімічно активних інгібіторів | – введення в зону реакції речовин з високою теплоємністю і теплотою фазових переходів | – введення в зону горіння поверхонь, які забирають на себе тепло | – збільшення випромінювальної здатності;<br>– збільшення потужності конвекційних потоків (зрив полум’я, |

Також проходження фронту УХ призведе до охолодження навколо полум’яного простору та відповідно зниження швидкості реакції. Після проходження скачка ущільнення з тиском $P_1$ за ним в ударній хвилі йде

зона розрідження з тиском $P_2$, тобто зона горіння буде зазнавати додаткового розтягнення в просторі та, внаслідок цього, значного збільшення тепловідведення, що повинно призвести до припинення реакції горіння. Після проходження ударної хвилі, полум'я буде зміщено на деяку відстань від місця розташування витоку газів, парів, що призведе до додаткового вогнегасного ефекту завдяки захопленню полум'я навколишнього газового об'єму, що призведе до руйнування кільцевої зони запалювання полум'я.

Відомо, що стійкість дифузійного полум'я залежить від кільцевої зони запалювання. Достатньо на цю область подіяти потоком невеликої швидкості і факел може обірватись [243]. Факел буде тим стійкішим, чим багатша суміш у струмені і чим стабільніше середовище навколо нього. Тільки в цьому випадку може утворитись потужна кільцева зона горючої суміші.

Власне тому найбільш стійкішим буде дифузійне полум'я, коли горіння проходить завдяки навколишньому повітрю і в пальник подається лише газ [243, 244]. Вплив на вказану область ударної хвилі може призвести до руйнування кільцевої області запалювання або навіть і до її зникнення та руйнування самої структури полум'я. Ймовірно, більш ефективною буде дія ударної хвилі, спрямованої паралельно до осі конуса полум'я знизу. У цьому випадку напрямок руху газів у полум'ї буде збігатися з напрямком руху ударної хвилі і, як наслідок, може відбутись прискорення певної ділянки полум'я, її відрив та гасіння. Відповідно, потужності ударної хвилі має бути достатньо для того, щоб забезпечити створення умов відриву полум'я. Можна передбачити, що цього ж ефекту можна досягнути і при векторі акустичної ударної хвилі, перпендикулярному до осі полум'я. Але, у випадку перпендикулярної дії ударної хвилі на полум'я ефективність дії необхідно підтвердити експериментально.

Якщо полум’я буде розташоване в середовищі холодного газу, то дія ударної хвилі на це середовище може призвести до гасіння, як вже вказувалось вище, завдяки ефекту розбавлення зони горіння повітрям, вивівши таким чином співвідношення реагуючих речовин за межі області стехіометричних концентрацій, які спостерігаються в зоні горіння, а то і за межі області займання. При цьому зона горіння зазнає розтягування під впливом релаксаційної зони з тиском $P_2$ ударної хвилі, яка при проходженні через полум’я буде спричиняти в полум’ї ті ж процеси, які відбуваються при проходженні ударної хвилі через газове середовище, зокрема утворення зони підвищеного тиску. За нею відразу буде проходити зона низького тиску, внаслідок чого полум’я буде розтягуватись і тепло, сконцентроване в цій області, що виділяється при горінні, буде розсіюватись. Це буде додатковим чинником, який сприятиме підвищенню ефективності пожежогасіння. Це ж підтверджується в роботі автора [245], який стверджує, що механізм цього способу зводиться до збурення зони реакції всередині полум’я, що призводить до зменшення товщини цієї зони, в результаті чого скорочується період часу, протягом якого пара горючого повинна вступити в реакцію.

При занадто тонкій зоні реакції, горіння пального буде неповним і полум’я почне охолоджуватись до температури, при якій воно не зможе більше відновлюватись ($T_f$ = 1000°C) [240, 241]. Максимально збільшить вогнегасну ефективність наявність навколо полум’я вогнегасного аерозолю, коли до вище зазначених ефектів додається ефект інгібування полум’я в області відриву, спричиненого ударною хвилею. При цьому можливість відриву полум’я та його гасіння дотягатиметься набагато легше, оскільки напрямок руху та швидкість ударної хвилі буде дестабілізувати полум’я.

Відрив факела відбувається при середніх швидкостях витікання, набагато більших за швидкість поширення полум’я [245]. При цьому

відбуватиметься захоплення інполярними частинами полум’я повітря та аерозольних частинок, якщо вони є присутні [246]. Швидкість захоплення для повітряних мас дорівнює 0,09 м/с для умов спокійного повітря. Як вказано у цій роботі, при впливі вітру або будь-якому іншому русі полум’я відбудеться відхилення факела та різке збільшення коефіцієнта захоплення [247]. При дії на полум’я вітру зі швидкістю 2 м/с, полум’я відхиляється на 45°, при цьому значно збільшується коефіцієнт захоплення повітря [244]. Подібні умови відтворюються при проходженні ударної хвилі через полум’я, але як було сказано, швидкість проходження ударної хвилі є набагато більшою за 2 м/с та становить не менше 340 м/с. При дії ударної хвилі її потужність буде характеризуватись імпульсом I, швидкістю υ, тиском P. Дія ударної хвилі, як і бокового вітру, призведе до дестабілізації полум’я в просторі та втрати ним відповідної структури. При дії ударної хвилі в момент її проходження через полум’я буде відбуватися його часткова турбулізація. Для визначення умов найбільш ефективного застосування ударної хвилі у пожежогасінні необхідно розглянути особливості горіння речовин і матеріалів в різних агрегатних станах.

Горіння твердих і рідких речовин відбувається за аналогією та в кожному виді горіння існує кільцева зона запалювання, руйнування якої може призвести до відриву полум’я внаслідок потоків, які набігають знизу. Це підтверджується також і в досліді автора [243], який вказує, що, якщо вздовж зовнішньої границі пальника спрямувати потік повітря, то можна досить легко здути полум’я при цьому помітно не змінюючи швидкість в середній частині струменя.

Якщо розглянути будову дифузійного полум’я, то необхідно відмітити таке. Фронт полум'я однорідної суміші набуває стійкого положення по конусоподібній поверхні, в кожній точці якої нормальна до неї складова $\upsilon_n$ швидкості руху газу дорівнює нормальній швидкості поширення полум'я. Концентрація пального та окисника у зоні горіння

лежить в близькій до стехіометричної області. Швидкість поширення полум’я, окрім області поблизу пальника або кромки стабілізатора, набагато більша за нормальну швидкість поширення полум'я. Форма факела залежить від геометричної форми джерела запалювання. При кільцевому джерелі запалювання, що розташовується по периферії гирла круглого пальника, факел набуває конічної форми; при інших розташуваннях факел може бути у вигляді перевернутого конуса, призми тощо. У відкритому факелі при ламінарному горінні однорідної суміші із запалюванням по периферії гирла круглого пальника фронт полум’я набуває стійкого положення по конусоподібній поверхні. Полум’я, яке утворюється при витіканні палива в середовищі окисника, є дифузійним. Будова дифузійного полум’я при надлишку пального та окисника показана на рисунку 3.1.

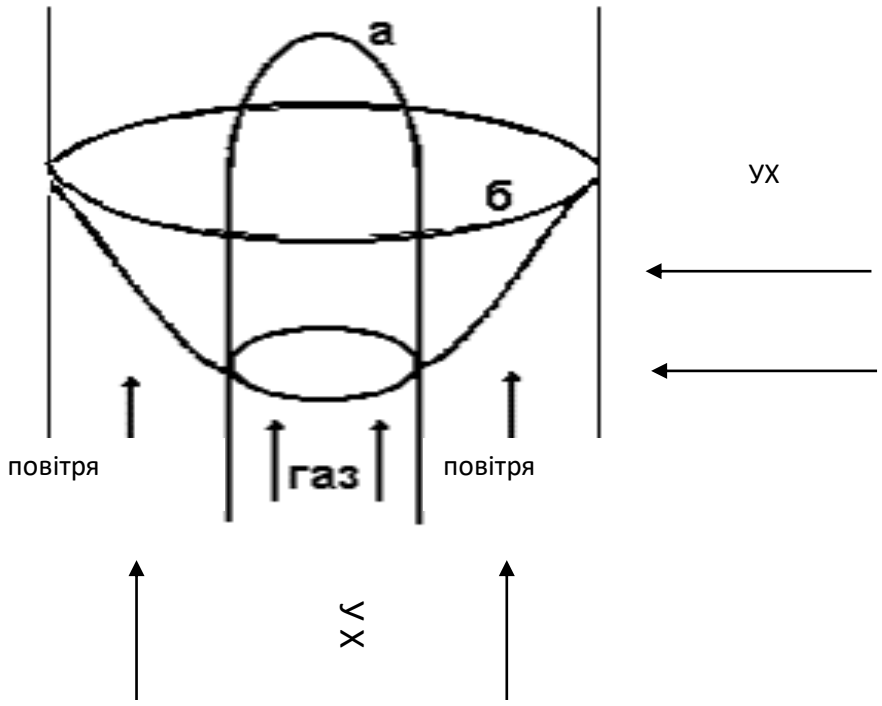



Рисунок 3.1 – Дія УХ на дифузійне полум’я

Як відомо [243], ефект гасіння, згідно з тепловою теорією гасіння, відбувається при досягненні критичних параметрів мінімальної температури в зоні горіння – 1000°С, звуження зони займання через добавки вогнегасної концентрації інгібітора або флегматизатора [248, 249]. Виходячи з рівняння Арреніуса [241], основними складовими якого є концентрації реагуючих речовин та енергія активації реакції при стехіометричному співвідношенні температур, можна проаналізувати вплив ударної хвилі на зміну значення кожного з цих параметрів. При дії ударної хвилі на полум'я концентрації реагуючих речовин в момент проходження ударної хвилі будуть суттєво змінюватись. Перш за все, в момент контакту УХ з полум'ям майже миттєво зросте концентрація повітря, а разом і з ним – аерозолю в зоні горіння, що може призвести до виводу концентрації суміші за межі займання. Концентрація горючих газоподібних компонентів при цьому зазнає також суттєвих змін. Збільшення концентрації вогнегасних газів в області полум'я суттєво збільшить вогнегасну ефективність, оскільки значно зменшиться швидкість поширення полум'я. Це ж вказуються і в роботах [250, 251], які підтверджують суттєве зменшення швидкості горіння у зв'язку зі зниженням вмісту радикалів ОН, особливо для частинок розмірами 6-8 мкм. При цьому авторами був зроблений висновок про поверхневий характер інгібування частинками солей, які вводилися. Можна передбачити, що розмір полум'я, яке можна погасити лише ударною хвилею, буде залежати від потужності хвилі. У результаті проходження ударної хвилі область полум'я зміститься з швидкістю 360-1000 м/с, що дорівнює швидкості проходження УХ у повітрі або й більше, відносно поверхні, з якої надходять горючі пари та гази в зону горіння.

Оскільки в роботі [241] зазначено, що швидкість слабкої ударної хвилі майже дорівнює швидкості звуку в цьому середовищі, паралельно відбудеться розтягування фронту полум'я завдяки впливу зони

розрідження за зоною тиску в просторі та відриву факела від поверхні горючої речовини. Зрозуміло, що в результаті проходження ударної хвилі навіть мінімальної потужності через простір, де перебуватиме полум'я, параметри останнього будуть суттєво змінюватись. У першу чергу, необхідно звернути увагу на концентрацію реагуючих речовин та їх співвідношення. Однозначно, це призведе до значного підвищення енергії активації $E_a$, в основному, внаслідок збільшення концентрації повітря, а в деяких випадках $E_a$ збільшиться до значень, за яких ініціювати реакцію неможливо. Розглядаючи фактори підвищення $E_a$, необхідно додати, що суттєвим чинником, який призводить до значного зростання $E_a$, є наявність в середовищі дисперсного інгібітора у вигляді неорганічних солей калію, крім якого одночасно будуть діяти і вищеописані фактори. Одночасний вплив усіх цих факторів повинен значно підвищити ефективність гасіння. Додатково підвищити ефективність гасіння ударними хвилями може вогнегасний аерозоль. Вогнегасна ефективність аерозолю залежить від багатьох факторів. В основному вона визначається хімічним, кількісним і дисперсним складом твердої та газової фаз аерозолю, які під дією різних зовнішніх чинників (вологості, температури середовища, наявності розвиненої поверхні об'єму, що захищають, і вбудованих у нього конструкцій та ін.), можуть помітно змінюватися [252, 253, 254]. Крім цього, як відомо, склад аерозольутворювального складу, температура середовища, в якій перебуває аерозоль, фізико-хімічні особливості горючої речовини та її кількість, розташування генератора вогнегасного аерозолю, добавки інертних газів і іншого роду інгібіторів найбільш істотно впливають на кінцеву вогнегасну концентрацію аерозолю. Для визначення умов оптимального застосування ударної хвилі з метою підвищення ефективності необхідно розглянути вплив основних чинників, які визначають вогнегасну ефективність.

Як відомо, до складу аерозольутворювального складу входять окисники і пальне. При згорянні утворюється дисперсна і газова фази. До складу дисперсної фази входять сполуки солей калію, натрію і рідше – інших металів. В основному до складу аерозолю входять солі $K_2CO_3$ * $2H_2O$, $KNO_2$ [240].

Підвищення температури середовища призводить до зниження вогнегасної ефективності аерозолю, як вважають автори [255] у зв'язку з руйнуванням структури самого аерозолю. Дія ударної хвилі в умовах високої температури, коли вогнегасна концентрація збільшується у понад 3 рази, наводить на думку, в таких умовах ударна хвиля не принесе очікуваного підвищення вогнегасної ефективності. Вплив природи речовини відображений в результатах досліджень авторів [244]. Автори [244] показали, що горючі речовини, які мають високу теплоту згоряння і низьку температуру самозаймання, мають і високу вогнегасну концентрацію. Так, мінімальна вогнегасна концентрація аерозолю для октану становить 19,5 г/м$^3$, а для метанолу – всього 4 г/м$^3$ [154]. Отже, можна передбачити, що аерозольне гасіння за допомогою ударної хвилі в повітряному середовищі для речовин, які мають різні значення нижньої теплоти згоряння, не буде однаково ефективним. Оскільки швидкість поширення полум'я для різних речовин у більшості випадків становить від 0,03 до 15м/с [243], то необхідно зауважити, що вогнегасна дія ударної хвилі буде залежати також і від швидкості поширення полум'я. Відповідно, зменшення швидкості поширення полум'я по пароповітряних сумішах повинно призвести до підвищення ефективності гасіння в результаті дії ударної хвилі.

Використання ударної хвилі підвищуватиме вогнегасну ефективність, оскільки короткочасна дія хвилі призведе до порушення балансу аерозоль-полум'я, який встановлюється при концентраціях, менших за вогнегасні, коли полум'я горить ще деякий час до моменту

загасання. Вплив ударної хвилі призведе до зміщення матеріально-теплового балансу у бік досягнення ефекту відриву полум'я. Як зазначалось вище у роботах [154, 256], автори спостерігали таку поведінку полум'я, коли під дією середовища аерозолю при концентраціях, близьких до вогнегасної, полум’я видовжувалося, набувало спіралевидної форми із закручуванням. Усі ці зміни можуть свідчити про значне зменшення швидкості поширення полум’я в результаті процесу інгібування. Якщо у цей момент незначно порушити рівновагу, що встановилася, горіння припиниться внаслідок відриву полум’я під дією набігаючого знизу горючого газу, який не встигає згоріти. Для миттєвого та ефективного порушення цього балансу найкраще підходить дія ударної хвилі, оскільки її проходження, як було вказано, істотно змінює параметри середовища, руйнує структуру полум’я, здуває полум’я від поверхні горючої речовини, а дія вогнегасного аерозолю не дасть йому відновитись.

Окремо необхідно сказати про таке явище, як дифракція [246, 247], якої зазнає ударна хвиля при проходженні через перешкоди, що, можливо, призведе до підвищення ефективності гасіння за перешкодами. Найбільш ефективно буде діяти ударна хвиля при гасінні полум’я за дрібними перешкодами. Дифракція відбувається внаслідок інтерференції, що також є важливим чинником при підвищенні вогнегасної ефективності. Як відомо [246], інтерференція – це явище накладання двох або більше когерентних ударних хвиль, в результаті чого в одних місцях спостерігається підсилення сумарної хвилі (інтерференційний максимум), а в інших – послаблення (інтерференційний мінімум) [246]. Дифракція [246] нерозривно пов'язана з явищем інтерференції. Більше того, саме явище дифракції часто трактують як випадок інтерференції обмежених у просторі хвиль (інтерференція вторинних хвиль). Загальною властивістю усіх ефектів дифракції є залежність міри її прояву від співвідношення між довжиною хвилі і характерним розміром неоднорідностей середовища d

або неоднорідностей структури самої хвилі. Найпомітніше вони проявляються при розмірах неоднорідностей, співвимірних з довжиною хвилі. При розмірах неоднорідностей, що істотно перевищують довжину хвилі (на 3-4 порядки і більше), явищем дифракції, як правило, можна знехтувати. В останньому випадку поширення хвиль з високою мірою точності описується законами геометричної оптики. З іншого боку, якщо розмір неоднорідностей середовища набагато менший від довжини хвилі, то дифракція проявляє себе у вигляді ефекту розсіювання хвиль [246, 247].

Так само енергія від вибуху в вигляді ударної хвилі зазнає дисипації [248] у навколишньому середовищі у вигляді сфери і в цьому випадку лише певна частина енергії вибуху піде на збивання полум'я. Якщо сконцентрувати енергію вибуху у визначеному напрямку, то це значно б підвищило ефективність дії ударної хвилі, а значить, і ефективність гасіння в цілому. Існує ряд робіт [257, 258, 259], в яких автори проводили теоретичні та експериментальні дослідження з використанням відбивачів – концентраторів ударної хвилі для гасіння пожеж, у тому числі і лісових.

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що застосування відбивачів-концентраторів ударних хвиль буде ефективним не тільки у гасінні крупних лісових пожеж [16,17], але і у гасінні пожеж і загорянь в обмеженому об'ємі. Для визначення умов застосування зарядів та відбивачів необхідно визначити безпечні параметри ударної хвилі та потужність вибухового заряду.

Як було вже зазначено, факел буде тим стійкішим, чим багатша суміш у струмені. Тільки в цьому випадку може формуватись потужна кільцева зона горючої суміші. Власне тому дифузійне полум'я буде найстійкішим, коли горіння проходить на повітрі і в пальник подається лише газ [243, 244]. Вплив на вказану область ударної хвилі може призвести до розриву кільцевої області запалювання або навіть і до її руйнування. Ймовірно ефективнішою буде дія ударної хвилі, спрямованої

паралельно осі конуса полум’я, а не перпендикулярно. Якщо полум’я роташоване в оточенні холодного середовища і додатково вогнегасної аерозолевої речовини, це сприятиме зменшенню швидкості горіння завдяки інгібуванню і тому відриву полум’я досягнути набагато легше. Горіння твердих та рідких речовин відбувається аналогічно і у кожному випадку горіння існує кільцева зона запалювання, руйнування якої може призвести до відриву полум’я внаслідок набігаючих знизу потоків горючих газів та повітря.

Всі ці умови відтворюються в більшій чи меншій мірі в момент проходження ударної хвилі через простір, де існує полум’я. Також відрив полум’я може відбутись в результаті різкого направленого руху повітря або газового середовища. Наприклад, в результаті подуву вітру полум’я можна просто задути або, як пропонують автори роботи [30], збити високошвидкісним струменем води. Дія ударної хвилі з різних позицій буде обумовлювати різницю у ефективності відриву полум’я. Зрозуміло, що за умови дії ударної хвилі знизу, або на рівні полум’я відрив полум’я буде здійснюватись ефективніше, оскільки в полум’я буде проникати вогнегасний аерозоль (рис.3.2). При боковій дії ударної хвилі на аерозоль, можна стверджувати, що сумісна дія аерозолю та ударної хвилі буде найефективнішою, тому необхідно експериментально дослідити вогнегасну ефективність такого впливу. Для цього необхідно визначити оптимальні умови впливу ударними хвилями. Діяти ударними хвилями на полум’я можна зверху, знизу і збоку. При цьому полум’я буде зазнавати відповідного зміщення (рис 3.2).

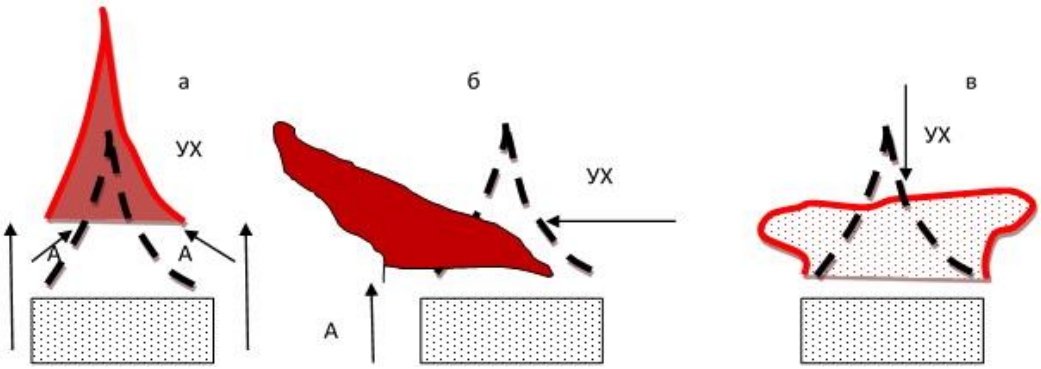



Рисунок 3.2 – Дія ударної хвилі з різних позицій на полум’я

Гасіння дифузійного полум’я ударними хвилями забезпечує реалізацію чинників які відповідають одночасній дії об’ємних вогнегасних засобів та фізичного впливу. Однозначно відповісти на питання – з якої позиції дія ударної хвилі буде найбільш ефективною, не можна і необхідно проводити експериментальні дослідження з виявлення такого типу залежностей.

### 3.1.1. Вогнегасні чинники ударних хвиль

При проходженні ударної хвилі (далі – УХ) через газове середовище відбувається формування відповідних зон високого тиску і релаксаційної зони низького тиску, які власне, і утворюють ударну хвилю [260]. Таким чином, дія УХ на газове середовище і полум'я забезпечить миттєву зміну майже всіх параметрів полум'я, що може привести при досягненні певних значень тиску на фронті УВ до її гасіння.

При проходженні ударної хвилі через газове середовище газова компонента прискорюється і стискається. За ударною хвилею в зоні релаксації відбувається поступове вирівнювання швидкостей течії і температури компонентів [260]. Структура ударної хвилі розглянута в гідродинаміці як розрив, що насправді є перехідним шаром кінцевої

протяжності, яку називають шириною ударної хвилі. [261] В ньому відбуваються незворотні процеси переходу речовини з вихідного стану перед ударною хвилею в кінцевий стан за нею. Ударні хвилі виникають при вибухах, при надзвукових рухах тіл, потужних електричних розрядах, швидких витікання газів тощо. Наприклад, під час вибуху утворюються високонагріті продукти вибуху, що володіють великою щільністю і високим тиском. У початковий момент вони оточені повітрям, що має нормальну щільність і атмосферний тиск. Продукти вибуху, розширюючись, стискають навколишнє повітря, причому в кожен момент часу стиснутим виявляється лише повітря у певному обсязі, а за цим обсягом повітря залишається в незбуреному стані. Згодом обсяг стисненого повітря зростає, а поверхня ударної хвилі – фронт, поширюється в просторі [261]. Проходження ударної хвилі через газове середовище за умови проходження через полум'я може привести до його динамічному відриву. Динамічно збити полум'я можна за умови, якщо буде досягнута достатня потужність повітряного потоку, який забезпечує, відрив зони горіння зі швидкістю, що перевищує швидкість поширення полум'я, і зменшення температури в зоні реакції горіння до температури загасання – 1273 К [262]. Ударні хвилі відрізняються від звукових хвиль тим, що можуть передавати набагато більше енергії, яка переноситься при переміщенні газового середовища в напрямку поширення фронту ударної хвилі. Крім цього, швидкість ударної хвилі залежить від її інтенсивності, що не властиве для звукових хвиль. Але тим не менше, ударна хвиля має певну схожість із звуковою хвилею, що полягає в її структурі і в процесах, що протікають в її фронті. Але в разі, коли ударна хвиля є слабкою то вона мало чим відрізняється від звукової, і з часом будь-яка ударна хвиля переходить в звукову [263]. Так в роботах [264, 265, 266, 267] автори чітко підтвердили ефект гасіння звуковою хвилею. В роботі [264] зазначено, що технологія гасіння полум’я акустичною хвилею може стати елементом

підтримки пожежної безпеки складів, промислових будівель, резервуарів з горючою рідиною, а в роботі [267] показано, що звукова хвиля добре гасить полум'я в умовах зниженої гравітації при частоті 30 Гц. Узагальнюючим недоліком розглянутих методів гасіння звуковою хвилею є, що для отримання потужної звукової хвилі необхідне спеціальне обладнання, а також те, що ефективне гасіння відбувається на досить малій відстані від джерела звукових хвиль (20-100 см), що значно менше за відстань у кілька метрів для УХ, а при більшій потужності УХ – і у десятки метрів, ефективної вогнегасної дії. Таким чином, для гасіння більш масштабних пожеж можна ефективно використовувати ударні хвилі, які несуть на значно більші відстані набагато більше енергії, ніж звукові хвилі.

В роботі [268] показано способи і умови застосування ударних хвиль, а також пристрій для гасіння низових лісових пожеж, дія якого полягає в концентрації енергії ударної хвилі на певній ділянці лісової пожежі. Вивченням дії ударних хвиль при гасінні лісових пожежах займалися автори робіт [258, 269-271]. У них розглянуті ефективність гасіння ударними хвилями різних видів лісових пожеж. Загальним висновком є те, що вплив на полум'я потужної УХ з позиції гасіння є ефективним і може привести до повного гасіння полум'я за умов концентрації енергії ударної хвилі в зазначеному секторі та її достатньої потужності. Існує ймовірність того, що в основному вогнегасний ефект ударної хвилі полягає в динамічному впливі газового середовища на полум'я. Аналогічно, наприклад, коли на полум'я подує вітер зі швидкістю 2 м/с, полум'я відхиляється на 45 °, при цьому значно збільшується коефіцієнт захоплення повітря [271], який може привести до різкого охолодження і відриву полум'я завдяки зменшенню швидкості згоряння. Подібні умови відтворюються при проходженні ударної хвилі через полум'я, але швидкість проходження ударної хвилі набагато більша, ніж 2 м/с і є значно більшою за швидкість звукової хвилі та буде відповідати

швидкості згоряння вибухової речовини, а власне, швидкості її детонації в середньому 3000 м/с для промислових вибухових речовин. Зрозуміло, що різниця між ударною хвилею і подувом вітру полягає в потужності і швидкості впливу на полум'я. Дія ударної хвилі, як і бічного вітру, призведе до дестабілізації полум'я в просторі і втрати ним своєї відповідної структури. При впливі ударної хвилі в момент її проходження через полум'я може статися його часткова турбулізація. А при турбулізації, як відомо, відбувається захоплення ще більших газових обсягів, які оточують полум'я, що призведе до досягнення більш нестабільного стану, коли полум'я може відірватися [271]. Виходячи з цього, очевидно, що ударна хвиля призведе до ефекту гасіння тільки за умови відповідної потужності, напрямку подачі, забезпечуючи відрив полум'я і, відповідно подальше його гасіння. Але в цьому випадку можливе подальше відновлення горіння через повторне загоряння від бортів резервуара, або нагрітих конструкцій. Таким чином, для визначення ефективності гасіння запропонованим методом необхідно визначити безпечні і одночасно ефективні з точки зору гасіння потужності ударних хвиль. Виходячи з цього, діапазон досліджуваних тисків, було визначено з огляду на безпечні потужності ударних хвиль, які не можуть привести до значних руйнувань конструкцій і травматичних впливів на людину, що становить відповідно до 500 Па, тобто 1/20 від безпечного тиску для людини [263,118]. Також зазначений діапазон тиску ударної хвилі підтверджується аналізом подібних досліджень, але зі звуковим впливом на полум'я. Так в роботі [264] зазначено, що горіння дифузійного полум'я припиняється при мінімальному звуковому тиску близько 35-45 Па, але при цьому не вказано час впливу, при якому горіння припинялося. Виходячи з цього, можна припустити, що дія ударних хвиль, можливо, буде на рівні ефективності дії звукових коливань, або навіть більш ефективною, а оскільки час впливу

УХ на полум'я мізерно малий і ймовірно становить близько 10 мс, а отже тиск у фронті УХ повинен бути більшим.

Таким чином, виходячи з теоретичних міркувань щодо вогнегасної ефективності ударної хвилі, можна сказати, що ударна хвиля може забезпечити ще більш високий вогнегасний ефект завдяки більш високій потужності і швидкості дії на полум'я. Відповідно, можна стверджувати, що дія ударної хвилі на полум'я повинна привести до реалізації таких ефектів: зміщення полум'я від місця витікання (рис 3.3 a); відриву полум'я від місця витікання газу або пари (рис. 3.3 b); в результаті турбулізації і захоплення обсягів холодного повітря призведе до дроблення полум'я спочатку на великі, а потім на більш дрібні фрагменти і подальше його гасіння (рис 3.3 c).

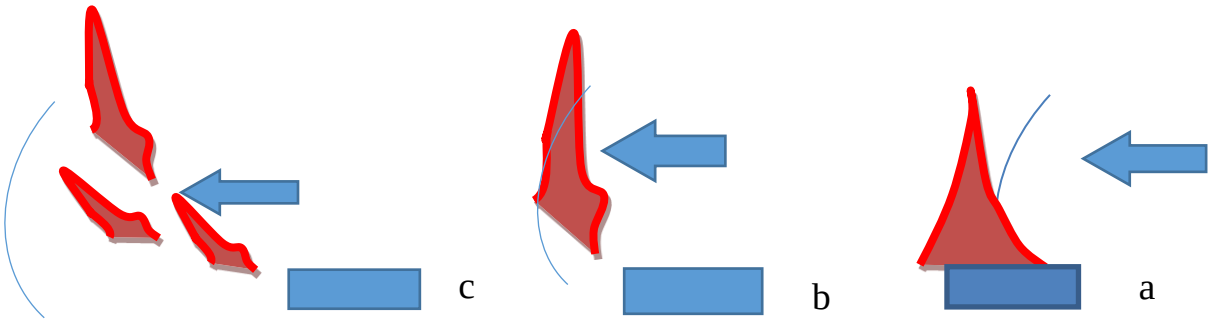



Рисунок 3.3 – Стадії проходження ударної хвилі, через дифузійне полум'я: Стрілкою вказано напрямок ударної хвилі

Дія на полум’я УХ значної потужності має призвести до фрагментації полум’я вже на перших моментах через ефект Ріхтмаєра – Мешкова, який забезпечить початок руйнування полум’я та його гасіння за дуже короткий час, який має дорівнювати часу контакту УХ з полум’ям. Полум’я при цьому не відноситиметься від гирла витоку горючих газів та пари (рис.3.3). Використання одинарних ударних хвиль буде підвищувати вогнегасну ефективність аерозолю речовини, але одинарні

ударні хвилі повинні мати надлишкову потужність для забезпечення відповідної ефективності гасіння аерозолем.

Відомо [241, 264, 265], що сильна одинарна ударна хвиля, яка проходить через одноатомний газ, спричиняє його стиснення в 4 рази, а якщо пропустити одну за одною дві ударні хвилі, залишаючи незмінним кінцевий тиск, отримаємо стиснення в 16 разів (рис. 3.4).

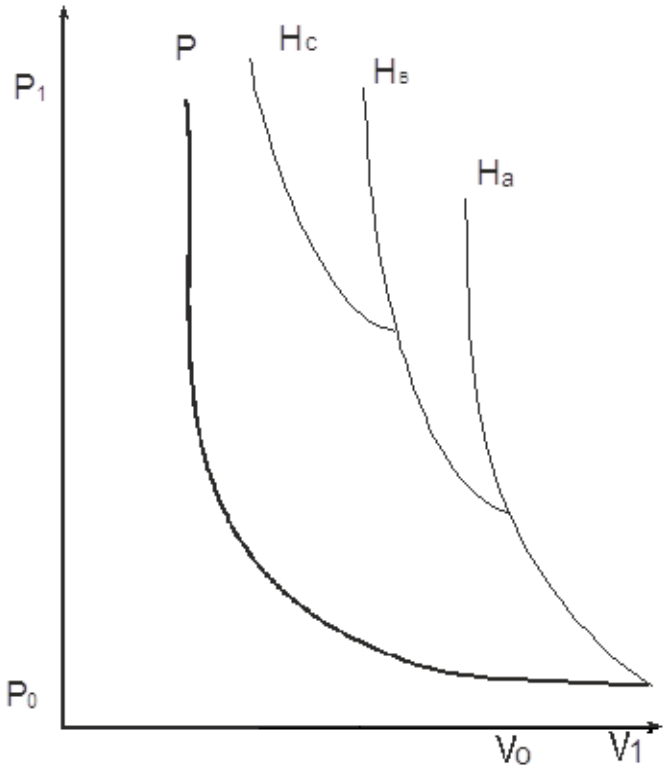



Рисунок 3.4 – Ефект накладання ударних хвиль [240]

Для підвищення вогнегасної ефективності аерозолевої речовини також можна використовувати серії ударних хвиль малогабаритних малопотужних зарядів, розташованих у генераторах ударних хвиль. Отже, для максимального підвищення ефективності аерозольного пожежогасіння можна запропонувати використання системи, яка складається з малопотужних вибухових зарядів.

Частота дії ударних хвиль можливо буде найбільш ефективною в межах до 10 Гц оскільки ці значення вказані як внутрішні коливання для

ламінарного полум’я бунзенівського пальника і становлять близько 10-15 Гц [267].

В роботах [268, 269] встановлено, що при гасінні лісових пожеж вибухом навіть коротка УХ здатна зірвати полум'я при горінні хвойних лісових матеріалів разом з хвоєю, але говорити про повне гасіння лісових пожеж вибухом передчасно, особливо лісових пожеж, на яких горять стовбури і крупні гілки дерев. У той же час при верхових і плямистих пожежах, при яких горить в основному лише хвоя дерев, гасіння лісових пожеж вибухом може дати позитивний ефект.

Моделювання процесу гасіння серіями ударних хвиль дифузійного полум’я в середовищі об’ємної вогнегасної речовини можна показати на рисунку 3.5.

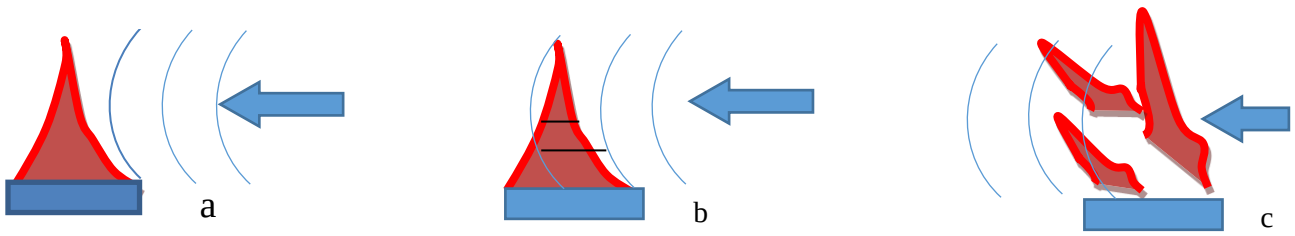



Рисунок 3.5 – Ймовірні умови початку фрагментації полум'я при дії ударної хвилі на полум'я в середовищі газової вогнегасної речовини

При цьому внаслідок дії серій ударних хвиль будуть задіюватись ряд чинників впливу які забезпечують тривалий вогнегасний ефект завдяки багаторазовому повторенню вогнегасних ефектів.

Виходячи з проведених міркувань щодо чинників можна зобразити механізм гасіння ударними хвилями схематично на рис. 3.5. Отже, за умовами гасіння, наведеними, на рисунку 3.5, та беручи за основу теплову теорію припинення горіння, можемо стверджувати про розширення кількості факторів, які приведуть до зниження температури в зоні горіння завдяки зменшенню інтенсивності тепловиділення внаслідок руйнуванню активних радикалів, яке повинно відбуватись в зонах УХ.

Порівняно з іншими чинниками впливу найбільш вагомим чинником буде розширення зони горіння в зоні релаксації, що має привести до обриву ланцюгових реакцій та різкого зменшення інтенсивності теплоутворення і, як наслідок, швидкості поширення полум'я. Відомо, що довжина зони релаксації в порівнянні з зоною надлишкового тиску є більшою, і відповідно у цій зоні зменшення тиску буде становити від 10 до 50 % від надлишкового в фронті УХ [241, 261].

Таким чином, узагальнивши висновки щодо аналізу вогнегасного впливу, можемо зазначити таке:

Гасіння ударною хвилею відбувається за дещо іншим механізмом, ніж той, що описаний у відомій літературі, та відрізняється від існуючої теорії тим, що гасіння полум'я може відбуватись в результаті одночасної дії багатьох факторів, які в сукупності призводять до ефекту фрагментування полум'я без його значного відриву безпосередньо над поверхнею горючої речовини. Причому гасіння відбувається без дії будь яких хімічних речовин – тобто вогнегасних засобів, чисто фізичним впливом, що дасть змогу обмежити викиди в атмосферу значних кількостей вогнегасних газових речовин – $CO_2$, хладонів та іх сумішей. Узагальнені результати щодо вогнегасної дії ударної хвилі та газових і аерозолевих вогнегасних речовин на дифузійне полум'я показано на рис. 3.6. та 3.7.

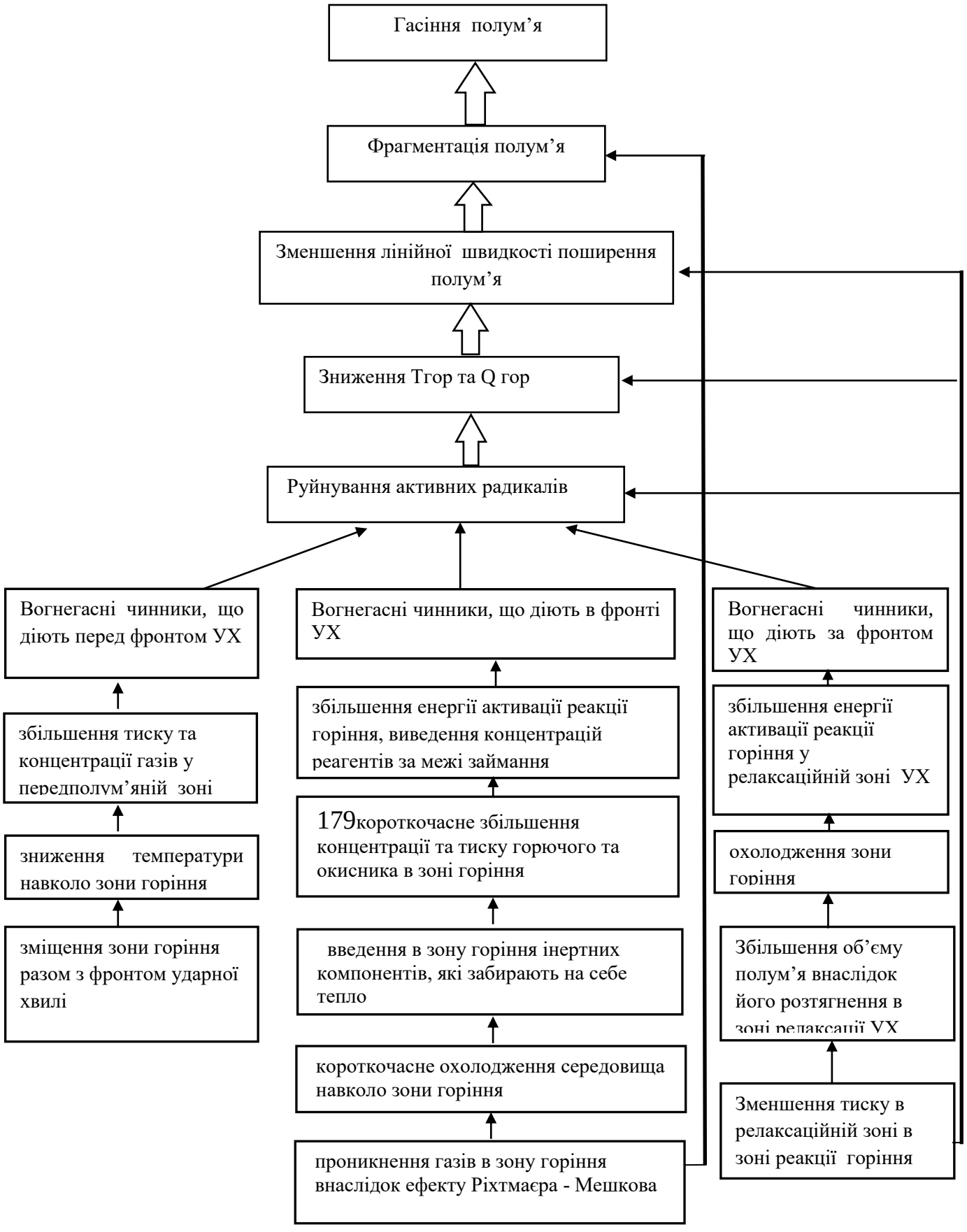



Рисунок – 3.6 Вогнегасні чинники ударних хвиль

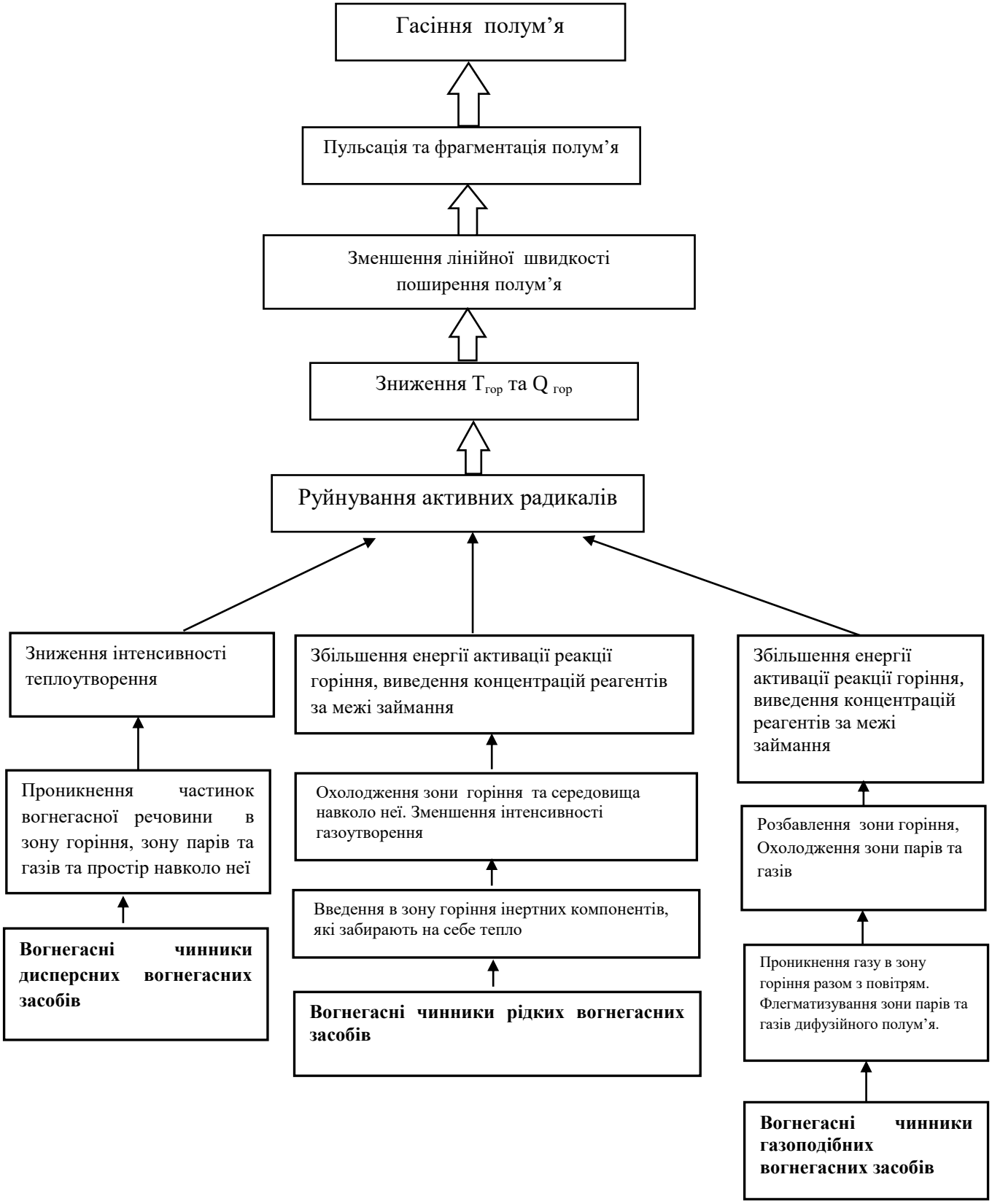



Рисунок 3.7 – Вогнегасні чинники хімічних вогнегасних речовин

### 3.1.2. Процес проходження ударної хвилі через газоаерозольне середовище

Ударна хвиля – стрибок ущільнення, тонка перехідна область, що поширюється з надзвуковою швидкістю, в якій відбувається різке збільшення густини, тиску і швидкості речовини [241]. Ударні хвилі виникають при вибухах, при надзвукових рухах тіл, потужних електричних розрядах тощо. Наприклад, при вибуху ВР утворюються високонагріті продукти вибуху з великою густиною та високим тиском. В початковий момент вони оточені повітрям, з нормальною густиною і атмосферним тиском. Продукти вибуху, що розширюються, стискають навколишнє повітря, причому в кожен момент часу стисненим виявляється лише деякий об’єм повітря; поза цим об'ємом повітря залишається в незбуреному стані. З часом об'єм стисненого повітря розширюється. Поверхня, яка відокремлює стиснене повітря від незбуреного, і є ударною хвилею або фронтом ударної хвилі [241].

Існують прямі та скісні ударні хвилі, які входять в речовину і витікають по нормалі до поверхні. Геометрія ударної хвилі залежить від форми тіла і від інших параметрів [241]. На відміну від звукових хвиль, детонаційні ударні хвилі мають такі особливості: ударні хвилі супроводжуються переміщенням середовища в напрямку поширення фронту збурення; швидкість ударної хвилі залежить від її інтенсивності, що не властиве для звукових хвиль; ударна хвиля не має періодичного характеру, а поширюється у вигляді одинарного стрибка ущільнення (рис 3.8).

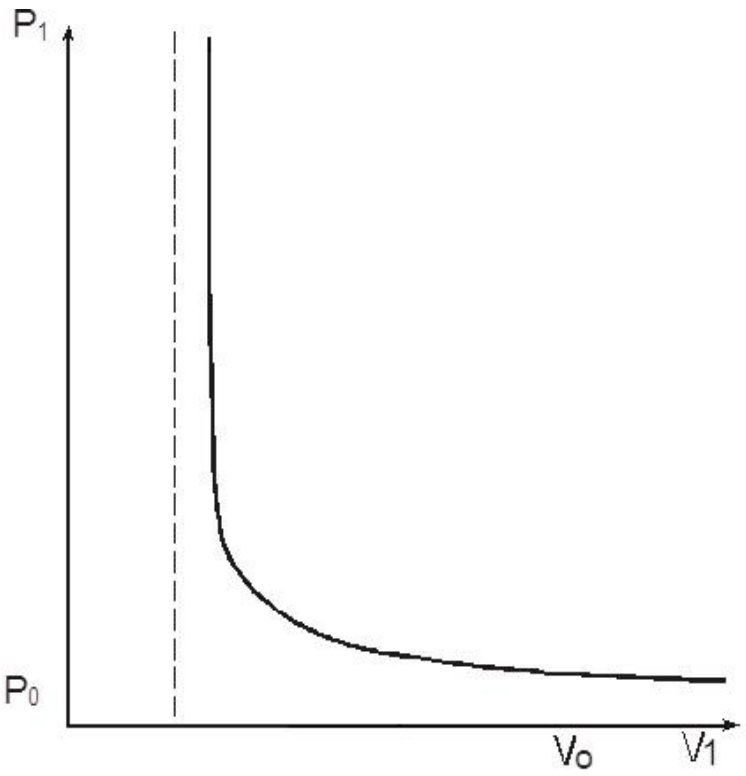



Рисунок 3.8 – Ударна адіабата [266]

Відомо [241, 267], що стан речовини по обидві сторони ударної хвилі характеризують тиск p та густина ρ. Також стан речовини по обидві сторони ударної хвилі характеризують швидкість протікання відносно ударної хвилі та питома внутрішня енергія, які пов’язані співвідношенням Ренкіна - Гюгоньо:

$$h_2 - h_1 - \frac{(p_2 - p_1)}{2}\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right) = 0 \qquad (3.1)$$

Інтегрування ударної адіабати приводить до рівняння адіабати Пуассона.

$$\rho_2 \upsilon_2 = \rho_1 \upsilon_1, \quad p_2 + \rho_2 \upsilon_2^2 = p_1 + \rho_1 \upsilon_1^2 \qquad (3.2)$$

$$\varepsilon_2 + p_2 / \rho_2 + \upsilon_2^2 / 2 = \varepsilon_1 + p_1 / \rho_1 + \upsilon_1^2 / 2$$

Вказані рівняння виражають закони збереження маси, імпульсу та енергії. Індекси 1 і 2 належать до величин перед ударною хвилею та за нею. Крім цього, величини E, p та ρ пов'язані рівнянням стану. Швидкість поширення ударної хвилі по речовині в стані спокою дорівнює $D = - v_1$. Тобто при заданих параметрах речовини перед хвилею $p_1$ і $\rho_1$ шість величин: D, $p_2$, $\rho_2$, $\varepsilon_2$, $\upsilon_1$, $\upsilon_2$ пов'язані п'ятьма рівняннями. Ударна хвиля при заданих $p_1$ і $r_1$ характеризується всього одним незалежним параметром, наприклад D чи p., через який можуть бути виражені всі інші величини.

Інтенсивність ударної хвилі звичайно характеризують відносним скачком тиску $(p_2–p_1)/p_1$ або числом Маха:

$$M_1=D/a_1, \qquad (3.3)$$

де $a_1$ – швидкість звуку в речовині перед ударною хвилею.

Для ударної хвилі малої і більшої інтенсивності відповідно $(p_2 – p_1) / p_1$ 1, $M_1 \approx 1$ і $(p_2 – p_1) / p_1$ 1, $M_1$ 1. Якщо $(p_2 – p_1)\ p_1 \to 0$, то $M_1 \to 1$. З системи отримують такі вирази для $\upsilon_1$ і $\upsilon_2$ і для швидкості витікання стосовно речовини перед ударною хвилею:

$$\upsilon_1^2 = V_1^2 \frac{p_2-p_1}{V_1-V_2}, \qquad \upsilon_2^2 = V_2^2 \frac{p_2-p_1}{V_1-V_2} \qquad (3.4)$$

$$u = | \upsilon_1 - \upsilon_2 | = \sqrt{(p_2-p_1)(V_1-V_2)}, \qquad (3.5)$$

(де $V = 1/\rho$ —питомий об'єм ), а також співвідношення.

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = (1/2)\ (p_2 + p_1) \times (V_1 - V_2), \qquad (3.6)$$

яке називається рівнянням ударної адіабати (УА) або адіабати Гюгоньо. Інша форма запису рівняння ударної адіабати:

$$w_2 - w_1 = (1/2)\ (p_2 - p_1) \times (V_1 + V_2), \quad (3.7)$$

де w – питома ентальпія.

Поряд з рівнянням стану співвідношення у вигляді ε = ε(p,V) виражає залежність $p_2$ від $V_2$ і від параметрів речовини перед ударною хвилею в $p_l$, $V_1$, тобто представляє собою функцію:

$$p_2 = H(V_2, p_1, V_1), \quad (3.8)$$

яку також називають ударною адіабатою або адіабатою Гюгоньо [252].

Зрозуміло, що вогнегасні речовини об'ємної дії представляють собою вогнегасні газові речовини ($CO_2$, $N_2$, хладони), вогнегасні аерозолі – завис твердофазних частинок в об'ємній вогнегасній речовині (вогнегасні порошки та аерозолі). Поширення ударної хвилі в газовому середовищі, яке буде містити вогнегасний газ, нічим не буде відрізнятись від дії УХ в атмосфері. Тому доцільно розглянути процес поширення та взаємодії УХ по аерозолю з вмістом твердофазних вогнегасних частинок порошку або аерозолю.

Поведінку аерозолю в ударній хвилі можна описати, виходячи з характеристик і властивостей аерозолю як системи.

Відомо [215], що під аерозолями розуміють системи, які містять завислі матеріальні частинки (за винятком молекул газів, повітря), діаметр яких лежить в межах від $10^{-3}$ до $10^{-7}$ см.

Основною характеристикою аерозольних систем є дисперсність, або питома поверхня (поверхня одиниці об'єму дисперсної фази). Вона пропорційна відношенню числа молекул дисперсної фази, які беруть

участь в утворені поверхневого міжфазового шару $n_s$, до числа молекул в об'ємі дисперсної фази $n_v$, тобто величині $n_s/n_v$ [215, 87]. При класифікації аеродисперсних систем основним і найбільш природнім є їх оцінка з точки зору дисперсності. Відомо, що вогнегасна ефективність порошкових засобів суттєво зростає із збільшенням ступеня дисперсності твердих частинок [270], тобто, із зменшенням розміру твердих частинок, що підтверджується зіставленням необхідної вогнегасної концентрації аерозолю (0,01-0,05) вогнегасних порошків (0,25 кг/м$^3$).

З метою визначення поведінки аерозолю в повітрі та в полум'ї при проходженні через нього ударної хвилі необхідно розглянути розподіл частинок аерозолевої речовини за дисперсністю. Автор [271] подає таку класифікацію за дисперсністю: аерозольні частинки можуть бути системою грубої, колоїдної і аналітичної дисперсності. Грубодисперсний аерозоль включає в себе частинки, видимі за допомогою оптичного мікроскопа, тобто частинки з розміром від 0,5 до 10 мк; аерозолі колоїдної дисперсності містять частинки речовини колоїдних розмірів, тобто в межах від 5 до 500 ммк, що піддаються спостереженню тільки методами ультра і електронної мікроскопії; і аерозолі аналітичної дисперсності мають частинки розміром 1-5 ммк.

Що стосується частинок аерозолів, які утворюються при згорянні аерозольутворювального заряду, то нижня границя розмірів частинок таких аерозолів становить приблизно $10^{-4}$ см і, як видно з табл. 2.1, належить до області грубодисперсних аерозолів. Виходячи з даних [83], основна маса аерозолів має такі розміри (у відсотковому співвідношенні для різних аерозольутворювальних складів): менше 1 мкм – приблизно від 32% до 60%, 2-5 мкм – від 19% до 42 %, більше 5 мкм – від 8% до 26%. Отже, основна маса частинок аерозолю за розмірами відповідає невеликому діапазону з мінімальним значенням < 1 мкм і максимальним значенням > 5 мкм. Переходячи до питання верхньої границі розмірів

частинок вогнегасного аерозолю, зауважимо, що, відповідно до початкового визначення, вона лежить в області частинок, що мають розміри близько 10 мкм. Якщо нижня границя розмірів аерозольних частинок визначається мінімально можливим розміром елементарної комірки кристалічної решітки, то критерієм для визначення верхньої границі служить швидкість седиментації частинки в гравітаційному полі. Оскільки частинки, що мають розміри більше 10 мкм, осідають зі швидкістю, яка перебільшує 1см/с, їх концентрація і взаємодія важко піддаються дослідженням, тому що в об'ємі газу, що досліджується, частинки перебувають дуже малий проміжок часу. Але, проводячи експериментальні дослідження зі встановлення розмірів частинок аерозолів, враховуючи час осідання, який становить більше 15 хв, можна стверджувати, що розміри більшості частинок у момент утворення є меншими за 1 мкм і в процесі існування аерозолю відбувається коагуляція та укрупнення частинок аерозолю (табл 3.2).

Таблиця 3.2

Класифікація аерозолів за розміром диспергованих частинок [227]

| Розмір частинок, d | lg d (м) | Дисперсність | Приклад |
|---|---|---|---|
| Долі ангстрема | -13<br>-12 | –<br>– | Ядро атома водню $4*10^{-5}$ Å<br>Ядро атома золота $6*10^{-4}$ Å<br>Атоми розміром 1-6 Å |
| Ангстрем | -8 | – | |
| Мілімікрон | -7 | Аналітична 1-5 ммк | Молекули 0,2-5 ммк |
| Десятки мілімікрон | -6 | | – |
| Соті мікрон | -5 | Груба | Промисловий пил 1-10 мк |
| Мікрон | -4 | | |
| Десятки мікрон | -3 | | |
| Сотні мікрон | -2 | – | Частинки |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Міліметр | -1 | | помітні неозброєним оком, 50 мк |

Примітка. Область аерозолів розташована в рамці.

З розміром частинок пов'язаний і відносно новий поділ аерозолів на потенціальні та істинні [223, 271]. Потенціальні аерозолі відрізняються від істинних, з одного боку, розміром частинок, а з іншого – властивістю цих частинок збільшувати свій розмір (при відносній вологості повітря, що перевищує 70%). Таке збільшення розміру проходить дуже швидко під впливом двох процесів: поглинання води з атмосфери і коагуляції. При цьому утворюються частинки видимих розмірів, тобто більше 0,1 мкм, що відповідає твердженню про те, що аерозоль може значно збільшувати вогнегасну ефективність при поглинанні води з атмосфери, виходячи з даних роботи [223].

Отже, для потенціальних аерозолів характерні розміри частинок від $10^{-7}$ до $10^{-5}$ см [215].. Істинні ж аерозолі містять видимі частинки, які не мають тенденції до зростання. Тому, перехід потенціального аерозолю в істинний – це перехід менш стабільного в більш стабільний.

Наявність такого широкого спектра розмірів аерозольних частинок призводить до того, що для різних його областей або змінюється характер дії законів, або діють зовсім інші закони. Особливо виразно це видно на прикладі закону опору газоподібного середовища руху аерозольних частинок. Для дуже маленьких частинок ($r<10^{-6}$см) опір середовища пропорційний швидкості і квадрату радіуса частинки. В інтервалі розмірів $10^{-6}$–$10^{-4}$см спостерігається поступовий перехід до закону Стокса, тобто опір середовища залишається пропорційним швидкості, а квадратична залежність змінюється на лінійну [215]. При подальшому збільшенні радіуса аерозольних частинок знову спостерігається відхилення від закону Стокса [273]. При дуже малих швидкостях пропорційність опору і

швидкості порушується, а при великих швидкостях і розмірах частинок опір середовища в першому наближенні пропорційний квадрату радіуса і квадрату швидкості [273].

При достатньо високій розрахунковій концентрації аерозолів ($n > 10^5$ $см^{-3}$) їх руйнування проходить в основному внаслідок коагуляції, швидкість якої різко зростає із збільшенням числа частинок n в $1см^3$. Тому, якою б великою не була величина розрахункової концентрації в момент утворення аерозолю, вже через декілька секунд вона не може перевищувати приблизно 10 $см^{-3}$. А оскільки ефективність аерозолів в основному залежить від дисперсності, то мова йде про створення аерозолів із заданим ступенем дисперсності. Отримати аерозолі з великою дисперсністю можна при спалюванні піротехнічних зарядів [274,]. При цьому отримують аерозоль з розмірами частинок приблизно 0,1 - 1 мкм [275, 276]. За властивостями таке середовище буде нагадувати газ і проходження по ньому ударної хвилі будуть супроводжувати явища та процеси більш характерні для газу.

В аерозолях при поширенні по них ударної хвилі з малою об'ємною концентрацією твердої фази, яка характерна для вогнегасних аерозолів, будуть відбуватись процеси прискорення, стиснення, релаксації та взаємодії газової фази. Частинки аерозолю рідко стикаються між собою, а при взаємодії з газом їх швидкість і температура змінюються порівняно повільно і за ударною хвилею в релаксаційній зоні відбувається поступове вирівнювання швидкостей та температур компонентів [277]. При цьому відносна масова концентрація аерозольних частинок проходить через максимум, оскільки за ударною хвилею вона була знижена, а в середньому по всьому об’єму повинна бути такою ж, як і перед ударною хвилею. Але поряд з цим потужність ударної хвилі буде знижуватись, оскільки проходячи через аерозоль, ударна хвиля буде втрачати частину імпульсу і енергії на прискорення та нагрівання частинок, що значно знижує її

потужність [278]. Ті ж автори вказують, що при проходженні ударної хвилі через аерозоль він буде стискатись перед фронтом ударної хвилі. При цьому ударна хвиля буде захоплювати за собою частинки аерозолю, прискорюючи та ущільнюючи дисперсну фазу, а прихід хвилі розрідження прискорюватиме їх у зворотньому напрямку та буде зменшувати густину дисперсної фази $\rho_2$.

Як відомо, ефективність гасіння суттєво залежить від розмірів і кількості частинок діаметром до 10 мкм, які будуть потрапляти в полум'я [176, 178]. Також відомо, що дрібні частинки будуть ефективніше гасити ударну хвилю [279]. Аерозоль складається, здебільшого з частинок діаметром в 1 мкм і до 25% частинок мають діаметр до 10 мкм, що на декілька порядків менше за розміри частинок порошку. Аерозоль, який утворюється при згорянні аерозольутворювальних сумішей, складається, як відомо, в основному з частинок діаметром до 1 мкм (приблизно 50%), решта – (приблизно 30%) крупніші конгломерати з діаметром до 10 мкм, і приблизно 20 % – до 100 мкм. Але, як видно, це значно менше за розміри частинок порошку, середній розмір якого починається з 50 мкм (табл. 3.2). Крупні частинки [280] діаметром 100 мкм і більше, не мають високих вогнегасних характеристик і до цього ж швидко осідають. При цьому автори вказують на гетерогенний механізм гасіння вогнегасних порошків з діаметром частинок від 50 мкм до 160 мкм.

У газі, що перебуває у стані акустичних коливань, залежно від умов зависла частинка може брати участь в коливанні середовища повністю, частково або зовсім не брати участі. При цьому на цей процес суттєво впливають розміри частинок. Так, завислі частинки діаметром від 0,1 мкм до 10 мкм практично коливаються разом з газом з різними амплітудами та фазами. При цьому буде виникати ефект Бернуллі, який полягає в явищі взаємного притягування частинок, коли лінія їхніх центрів є перпендикулярна до напрямку коливань, та відштовхування, коли лінія

центрів є паралельна напрямкам коливань. Однозначно всі ці рухи призведуть до ущільнення аерозолю та можливості розтягування аерозолю перпендикулярно руху ударної хвилі [281]. Ці розміри частинок названі «критичними розмірами частинки» для відповідних частот. Аналогічно можна говорити про «критичні частоти» для певних розмірів частинки.

Отже, ущільнення аерозолю, спричинене ударною хвилею, може призвести до підвищення ефективності гасіння полум’я.

Відомо [282], що 10% енергії витрачається на пришвидшення молекул матеріалу аерозолю, а для пояснення 90% втрат ще не достатньо даних. Додаткові коливання частинок можливо теж призведуть до підвищення ефективності гасіння через збільшення ймовірності контакту та подальшої загибелі активних центрів реакції. Найдрібніші частинки коливаються разом з коливаннями середовища. Чим більша інтенсивність звуку або ударної хвилі, тим швидше рухаються частинки і більша ефективність їх взаємозіткнення. Також, якщо тривалість перебування частинки в звуковому полі або при дії ударних хвиль мала (менше 2-3 с), то дія тиску ударної хвилі не може бути основною причиною коагуляції. При цьому ефект Бернуллі має значення лише тоді, коли частинки розташовані близько одна від одної [282].

Добре відомо, що дими, тумани та інші аерозолі нестійкі і схильні з часом до мимовільної коагуляції. За певних умов ця коагуляція може протікати з помітною швидкістю в початковий момент утворення високодисперсних димів (наприклад, цинк оксиду) [283].

Згідно з теорією Смолуховського, зворотня величина числа частинок на одиницю об'єму змінюється як лінійна функція часу. Очевидно, що мимовільна коагуляція буде протікати швидко, коли число частинок дуже велике, але при зменшенні числа частинок процес сповільнюватиметься. Єдиними силами, що діють на частинки в цих умовах, є молекулярні сили, які створюють броунівський рух. Для більшості промислових димів

величина мимовільної коагуляції може бути виміряна лише через декілька хвилин [285].

Згідно з відомим гідродинамічним принципом Бернуллі [286], в таких умовах у цій ділянці знижуватиметься статичний тиск і сферичні частинки проявлятимуть взаємне притягання. Навпаки, якщо одна з двох частинок перебуває на підвітряній стороні, а лінія, що сполучає центри цих частинок, розміщена у напрямку коливань, виникне зона, в якій частинки будуть взаємно відштовхуватись. Отже, дія звукового поля на завислі частинки полягає в утворенні відштовхувальних сил між частинками у напрямку коливань і притягальних сил в перпендикулярному напрямі, що призводить до коагуляції. Стає зрозуміло, що застосування будь-яких звукових коливань буде призводити в більшій чи меншій мірі до коагуляції, а тривалий вплив до зниження вогнегасної ефективності при гасінні полум’я. Більш потужними за звукові є ударні хвилі, які в значно меншій мірі призводять до коагуляції аерозолів зважаючи на короткий час їх впливу.

Задути полум’я можна за умови, якщо буде досягнута достатня потужність повітряного потоку, який забезпечує зменшення часом та температурою [118]. Таким чином буде максимально зменшене значення числа Дамкелера нижче критичного рівня. Цей підхід повністю узгоджується з концепцією граничної температури та був використаний у роботах [287-289] для інтерпретації багатьох задач гасіння пожеж. З допомогою цього підходу можна також обґрунтувати дію хімічно-активних інгібіторів, які викликають збільшення ефективного часу хімічної реакції шляхом зменшення швидкості хімічної реакції. Що стосується локальної дії засобів пожежогасіння об’ємної дії, то задування полум’я є найбільш ефективним способом боротьби з вогнем. Це особливо справедливо для гасіння газонафтових фонтанів, де не діють інші засоби гасіння [290, 291].

На даний момент для гасіння газових фонтанів розроблено не менше десятка різних методів, що обумовлено, з одного боку, складністю технічної проблеми, багатофакторністю і різноманітністю конкретних ситуацій на таких пожежах, а з іншого – обмеженою ефективністю кожного з таких способів. Всі відомі способи та пристрої гасіння факелів, базуються на двох принципово різних підходах – на придушенні горіння, або на зриві полум'я. У першому випадку в зону горіння подають охолоджувальні та вогнегасні засоби – спеціальні порошки, піну, воду, інертні гази. При цьому їх дії піддається значна частина маси речовини факела, а механізм гасіння зводиться до зниження концентрації окисника у факелі введення інгібіторів і зниження температури в зоні горіння, що призводить до придушення реакції горіння у факелі. Прикладами цього способу гасіння є гасіння фонтану за допомогою автомобілів порошкового гасіння (АП-5 і ін.), а також метод гасіння з використанням автомобілів газоводяного гасіння (АГВТ-100, АГВТ-200) [291], що останнім часом набув найбільшого поширення. Гасіння зривом полум'я полягає в механічному відриві полум'я від гирла свердловини потужними водяними струменями, вибуховою ударною хвилею тощо. Відомі також пристрої, які генерують надшвидкісний струмінь газу, однак вони не часто застосовуються у зв’язку зі складністю конструкції [293].

### 3.2. Механізм комбінованого пожежогасіння ударними хвилями та вогнегасними речовинами об’ємної дії

Відомо, що газові вогнегасні речовини (ГВР) застосовують здебільшого для припинення полум’яного горіння об’ємним способом. За механізмом гасіння вони поділяються на інертні розріджувачі (діоксид вуглецю, азот, інертні гази, їх суміші) та інгібітори горіння (галогеновані вуглеводні). Припинення горіння інертними розріджувачами досягається переважно внаслідок розведення газового середовища і зниження в ньому концентрації окисника та горючого, а гасіння інгібіторами горіння – за

хімічним механізмом (зв’язування радикалів, за участю яких у полум’ї відбуваються ланцюгові окисно-відновні реакції, як правило для гасіння об’ємних пожеж, зокрема на хімічних виробництвах, на кораблях, підводних човнах, на транспорті, в енергетичній галузі, [254,176] і т.д. Гасіння такого типу пожеж є складним процесом через наявність великої кількості пожежного навантаження в різних агрегатних станах, важкодоступних місць, у вигляді пустот, перегородок, трубопровідних, та електричних мереж, ділянок під електричною напругою, і т.д. В таких умовах пожежа може швидко поширюватись без будь-яких обмежень, а загасити її буде важко через складність подачі в такі місця засобів пожежогасіння. На сьогодні одним з найбільш ефективних шляхів гасіння пожеж та запобігання вибухам на таких об'єктах залишається використання газових вогнегасних речовин.

В якості об’ємних засобів гасіння, як правило використовується діоксид вуглецю, азот та інші інертні розріджувачі (аргон, азот, водяна пара), їхні суміші, а також інгібітори горіння, у т.ч. хладони, комбіновані склади на основі хладонів. Газові засоби гасіння мають певні переваги над іншими засобами об’ємного гасіння, а саме: більшу чистоту гасіння, здатність підтримувати флегматизувальну концентрацію протягом тривалого часу, зручність в подачі в захищуваний об’єм та можливість тривалого зберігання на об’єкті в складі системи автоматичного пожежогасіння. Але незважаючи на ряд переваг при використанні вогнегасних газів можуть виникнути ситуації, в яких вони не забезпечують необхідної ефективності гасіння через можливу розгерметизацію, подеколи газ не потрапляє у захищуваний об’єм, та не забезпечує досягнення зазначеної вогнегасної концентрації і т.д.

Відомо, що вогнегасна концентрація $CO_2$ становить близько 22 % для та 33 % для $N_2$ при гасінні н-гептану [159, 163, 175]. Для забезпечення вогнегасної концентрації цих газів потрібна достатньо велика кількість

резервуарів для їх зберігання та трубопроводів. Відповідно це призводить до значного здорожчання самої установки та її встановлення, і як правило потребує окремих приміщень та значних додаткових витрат [175].

При цьому гасіння та флегматизація забезпечується лише завдяки заповненню об’єму та тепловідведенню тепла з полум’я газами-флегматизатороми і при нижчих концентраціях гасіння неможливе.

Зважаючи на це, для підвищення вогнегасної ефективності вуглекислого газу та азоту дослідники пропонують різні способи, але в основному вони полягають у змішування газу з іншими газами, хладонами або дисперсними вогнегасними речовинами [80, 294]. При цьому вогнегасна концентрація початкового газу зменшується, але загальний об’єм газової суміші залишається майже таким самим або зменшується незначно, що не забезпечує збереження достатньої концентрації $O_2$.

Таким чином, виключаючи змішування газових вогнегасних речовин з іншими компонентами, одним з способів підвищення ефективності об'ємного гасіння дифузійного горіння залишається фізичний вплив на полум’я в газовому вогнегасному середовищі. Завжди горіння невеликого полум’я можна було загасити подувши на нього. Відповідно динамічного впливу на полум’я можна досягнути звуковим впливом на газ, або дією ударної хвилі, яка буде проходити через газове середовище довкола полум’я. Аналіз літературних джерел показав, що ударні та звукові хвилі давно використовуються в пожежогасінні.

Так в цілому ряді робіт [295-301] показано способи та умови застосування ударних хвиль, при гасінні різного виду пожеж. Автор [296] вказує, що при відповідних умовах проходження ударної хвилі через полум’я в середовищі вогнегасного аерозолю це може призвести до його відриву та затухання.

Дія ударної хвилі, як і бокового вітру, призведе до дестабілізації полум’я в просторі та втрати ним своєї відповідної структури. При дії

ударної хвилі в момент її проходження через полум’я може відбутися його часткова турбулізація. А при турбулізації, як відомо, відбувається захоплення газових об’ємів, які оточують полум’я, що призведе до досягнення нестабільного стану коли полум’я може відірватись [118]. Крім цього, дія на газовий факел охолоджувальних чи інгібувальних засобів також приводить до його відриву, а при вогнегасній концентрації газу взагалі може загасити полум’я.

Таким чином поєдання вогнегасної дії ударної хвилі та газової речовини повинно значно збільшити їх спільний кінцевий вогнегасний ефект при гасінні полум’я такою системою внаслідок синергетичного ефекту між ударною хвилею та вогнегасним газом. Підвищення ефективності гасіння газом при дії ударної хвилі загалом буде спричинене різкою зміною умов в зоні реакції горіння, які приводять до миттєвого збільшення енергії активації реакції горіння в момент проходження ударної хвилі через полум’я в середовищі інертного газу завдяки зміні всіх параметрів середовища в зоні реакції горіння. При цьому будуть протікати процеси, які характерні для взаємодії газових середовищ різної щільності, які і будуть визначати вогнегасну ефективність такої системи.

Збиття полум’я самою ударною хвилею при низьких потужностях ударної хвилі, а ще на значній відстані є неможливим. При цьому може відбутись лише

зміщення полум’я від місця витоку, але при проходженні ударної хвилі полум’я повернеться в вихідне становище.

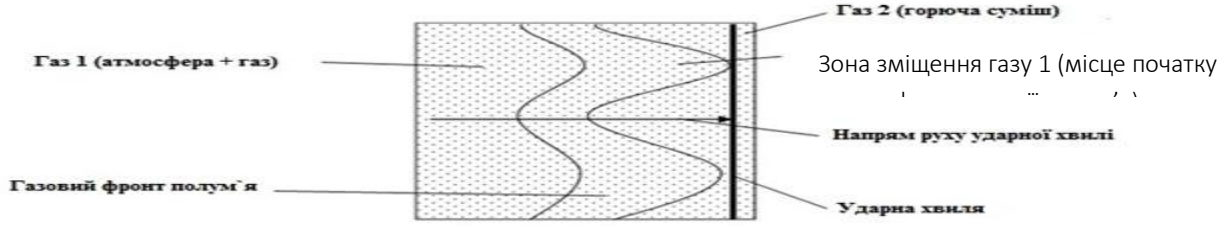



Рисунок 3.9 – Імовірні умови початку фрагментації полум'я при дії ударної хвилі на полум'я в середовищі газової вогнегасної речовини

Ймовірно, що при проходженні ударної хвилі з газового середовища атмосфери через полум'я буде відбуватись взаємодія по фронту ударної хвилі (рис.3.9) з утворенням нестійкості Ріхтмаєра – Мешкова [302], яка виникає на межі двох газів різної густини при проходженні через них ударної хвилі, при цьому газ 1 буде проникати в фронт полум'я викликаючи утворення в ньому зони зсуву газу 1 в газ 2, що можливо буде призводити до фрагментації полум'я в цих місцях у напрямку руху ударної хвилі. В роботі [289] автори, досліджуючи дію ударної хвилі на полум'я свічки, вказали на значну взаємодію ударної хвилі з полум'ям з можливим виникненням ефекту Мешкова - Ріхтмаєра. Автори [303] пояснюють це розширенням потоку, який проходить за ударною хвилею, після чого полум'я швидко диспергується та гасне. Це відбувається в масштабі мілісекунд у вузькій зоні і вказує на швидке обмеження надходження палива в зону горіння, що ймовірно, і стає причиною припинення горіння [304]. Таким чином, в зону горіння буде проникати додаткова кількість інертного газу, який буде чинити як вогнегасну дію в зоні горіння, так і флегматизувальну – коли відбудеться змішування горючої суміші з вогнегасним газом в підготовчій зоні дифузійного полумя. Виходячи з цього та враховуючи комплексну дію на полум'я ударної хвилі і газової вогнегасної речовини, необхідно більш детально розглянути фактори та умови припинення горіння вогнегасними газами, які будуть чинити сумісну вогнегасну дії на полум'я разом з ударною хвилею.

Відомо [201], що при введенні в газоповітряну суміш вогнегасних газів – вуглекислого газу, азоту, водяної пари, гелію, аргону та інших, область поширення полум'я звужується – нижня границя зростає, а верхня знижується створюючи точку флегматизації. Для подачі інертного газу в захищуваний об'єм існують різні способи подачі та методики розрахунку вогнегасної концентрації газів-розчинників. При цьому ударну хвилю

можна використовувати у всіх випадках для пожежогасіння, як при подачі ззовні, так і зсередини полум'я після заповнення об'єму вогнегасним газом.

В реальних умовах гасіння ударною хвилею, виходячи з літературного аналізу, завжди відбувається при її подачі з бічної площини пожежі. Процес гасіння таким методом описано в роботах дослідників [305, 306], які використовували ударні хвилі, утворені в результаті вибуху, в основному для гасіння лісових пожеж. У роботі [307] вказано, що при вибуху паливно-повітряної суміші або тротилу в ряді випадків спостерігався ефект гасіння пожежі. Автори досліджували гасіння вогнищ пожеж розміром близько 1м$^2$, які складались з деревини, деревинностружкової плити, елементів меблів та ін. Досліди проводились в діапазоні надлишкового тиску від 0,05 до 10 кг м/см$^2$ і тривалістю імпульсу від 0,05 до 2-2,5 с. Автори згаданої роботи [307] підтвердили думку про те, що ударна хвиля може дійсно гасити вогнища пожеж класу А твердих горючих речовин, легкозаймистих і горючих рідин при цьому результати досліджень показали, що навіть при тиску більше 2 кгс/см$^2$ повного гасіння вогнищ пожеж не спостерігалось. Основним показником, згідно з результатами роботи авторів [307], який визначає процес гасіння пожеж вибухом, є тривалість надлишкової фази тиску. При тривалості позитивної фази тиску від 0,01 до 0,2-0,3 с процес гасіння не спостерігався в повному об'ємі, при цьому відбувався зрив полум'я та повторне відновлення горіння, причому відрив полум'я виник при надлишковому тиску вибухової ударної хвилі вище 0,5 кгс/см$^2$. Зрозуміло, що короткочасний вплив на полум'я ударної хвилі невеликої потужності без вогнегасної речовини не призведе до повного гасіння, навіть якщо полум'я зазнає відриву, але без додаткового вогнегасного впливу воно зможе відновитись. Для ефективного гасіння необхідний більш довгий імпульс ударної хвилі, що підтверджено результатами експериментів цих же

авторів [307], які проводилися на відкритій ділянці при гасінні пожеж твердих горючих матеріалів, рідин і моделей лісових пожеж. Вибух створювався за допомогою тротилової шашки. При цьому параметри ударної повітряної хвилі коливались за надлишкового тиску від 0,02 до 0,15 кгс/см$^2$ та тривалістю фази надлишкового тиску від 0,01 до 0,2 с. Результати експериментів показали, що при надлишковому тиску у фронті ударної хвилі більше 0,5кгс/см$^2$ і тривалістю імпульсу 0,6 с спостерігалось повне гасіння полум'я без повторного займання.

Зрозуміло, що при порушенні рівноваги полум'я після проходження через нього ударної хвилі, його відновлення буде залежати від фізико-хімічних характеристик навколишнього газового середовища. Відповідно, зворотне відновлення в атмосфері вогнегасного газу не буде настільки простим, оскільки для цього потрібно забезпечити необхідну швидкість поширення полум'я та стабільне надходження горючої суміші в зону горіння бажано при стехіометричних концентраціях, що є неможливим при проходженні УХ.

Отже, проходження ударної хвилі через полум'я можна поділити на такі етапи (рис.3.10) 1 етап (позиція а), коли фронт ударної хвилі знаходиться перед полум'ям, - зображено на рисунку 3.2, 2 етап (позиція б) коли ударна хвиля знаходиться в полум'ї (рис 3.3), 3 етап (позиція в) коли ударна хвиля перейшла через полум'я (рис 3.10) та 4 етап (позиція г)- гасіння, коли відбувся відрив полум'я – рис 3.10. Фактори ж вогнегасного впливу ударної хвилі можна поділити на ті, які діють перед фронтом ударної хвилі, у фронті ударної хвилі та власне за фронтом ударної хвилі. Умови, які призводять до припинення горіння при дії ударної хвилі, зазначені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Чинники припинення горіння вогнегасними газами при дії ударних хвиль

| Вогнегасні фактори, що діють перед фронтом УХ. Рис. 3.9. Положення Fig а | Вогнегасні фактори, що діють в фронті УХ. Рис. 3.9. Положення Fig б. | Вогнегасні фактори, що діють за фронтом УХ. Рис. 3.9. Положення Fig в. |
|---|---|---|
| -збільшення тиску та концентрації газів у передполум'яній зоні;<br>– зміщення зони горіння, разом з фронтом ударної хвилі;<br>- зниження температури навколо зони горіння. | - збільшення тепловіддачі в зоні горіння;<br>- збільшення густини газового середовища у фронті ударної хвилі;<br>– введення в зону горіння інертних компонентів, які забирають на себе тепло;<br>- збільшення концентрації горючого окисника і інертних газів у фронті ударної хвилі;<br>- охолодження зони горіння;<br>- збільшення тиску в зоні горіння;<br>– віднесення полум'я ударною хвилею від вогнища, де відбувається витікання парів та газів. | -зменшення коефіцієнтів теплопередачі;<br>-розтягнення зони полум'я за ударною хвилею;<br>-збільшення енергії активації у релаксаційній зоні за фронтом полум'я. |

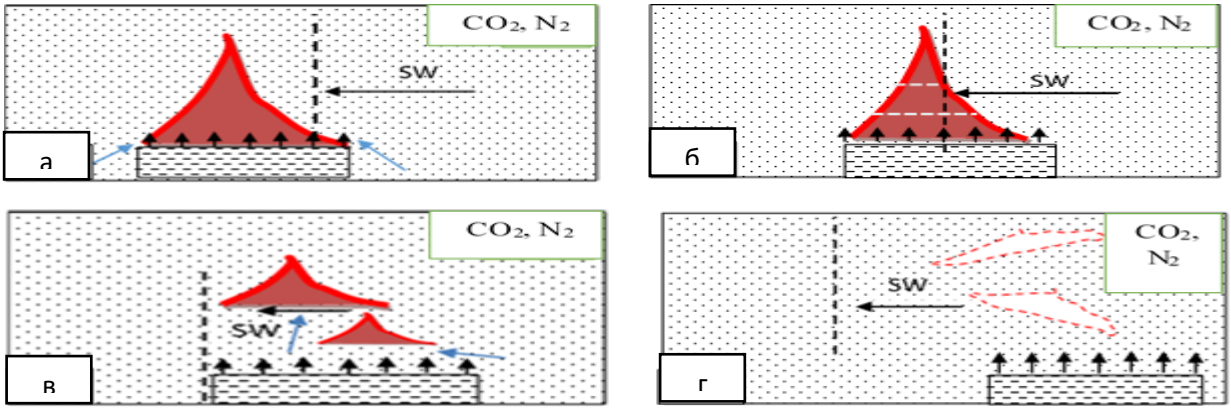



Рисунок 3.10 – Етапи гасіння ударною хвилею полум'я в присутності вогнегасних газів

При підході ударної хвилі до полум'я (рис 3.9) у вигляді скачка ущільнення з тиском $P_1$ за ним в ударній хвилі йде зона розрідження з тиском $P_2$, тобто при входженні ударної хвилі в зону горіння (рис.3.10) вона буде зазнавати додаткового розтягнення в просторі та, внаслідок цього, значного збільшення тепловідводу, що повинно призвести до

гальмування, або й припинення реакції горіння. Також проходження фронту УХ призведе до охолодження навколо полум'яного простору та відповідно зниження швидкості реакції. Після чого ударна хвиля виходить з полум'я (рис 3.10). Після проходження УХ через полум'я за нею іде зона розрідження. В момент виходу ударної хвилі ( рис. 3.10) з полум'я, воно зміститься за інерцією на деяку відстань від місця його первинного розташування на величину вільного перебігу молекул, що призведе до збільшення вогнегасного ефекту завдяки захопленню полум'ям навколишнього середовища з вогнегасною газовою речовиною. В результаті в полум'я буде потрапляти горюча суміш вже з домішками вогнегасного газу, що приведе до часткового гальмування реакції та відриву кільця запалювання, від якого залежить, як відомо, стійкість дифузійного полум'я, як вказано автором [243].

Максимально збільшить вогнегасну ефективність ударної хвилі наявність навколо полум'я вогнегасного газу, коли до вище зазначених ефектів додається ефект флегматизування полум'я в області розриву, спричиненого ударною хвилею. При цьому можливість відриву полум'я та його гасіння дотягатиметься набагато легше, оскільки напрямок руху та швидкість ударної хвилі буде дестабілізувати полум'я.

### 3.3. Підвищення ефективності гасіння бінарних газоаерозольних сумішей ударними хвилями

Вплив УХ на дифузійне полум'я в середовищі бінарної суміші газів та аерозолю буде забезпечувати одночасно дію багатьох вогнегасних факторів (таблиця 3.4). Сумарно вони повинні забезпечувати значно вищу вогнегасну ефективність ніж індивідуальні вогнегасні концентрації газів та аерозолю.

Таблиця 3.4

Вогнегасні фактори комбінованої суміші вогнегасного газу і аерозолю при дії ударних хвиль

| Вогнегасні чинники аерозолю | Вогнегасні чинники газу-розріджувача | Вогнегасні чинники УХ |
|---|---|---|
| – інгібіювання зони горіння при проникненні вогнегасного аерозолю;<br>– часткове охолодження дисперсними частинками аерозолю полум'я в результаті їх нагрівання;<br>– розбавляння продуктами розкладання аерозолю;<br>– екранування теплового випромінювання. | – розбавлення зони горіння;<br>– збільшення теплопоглинання в зоні горіння завдяки теплоємності газу;<br>– збільшення концентрації інертних газів в зоні горіння. | –збільшення тиску в зоні горіння;<br>– відштовхування полум'я ударною хвилею від вогнища, де відбувається витікання горючих парів і газів;<br>– фрагментування полум'я.<br>Збільшення тиску і концентрації газів в передполумяній зоні;<br>– зміщення зони горіння разом з фронтом ударної хвилі;<br>– зниження температури навколо середовища зони горіння;<br>–збільшення тепловіддачі у зоні горіння;<br>– збільшення щільності газового середовища у фронті ударної хвилі;<br>введення в зону горіння інертних компонентів, які забирають на себе тепло;<br>–збільшення концентрації пального, окислювача і інертних газів у фронті ударної хвилі;<br>– охолодження зони горіння;<br>– збільшення тиску в зоні горіння;<br>– зменшення теплопередачі;<br>– розтягнення зони полум'я за ударною хвилею;<br>–збільшення енергії активації в зоні розрідження за фронтом ударної хвилі. |

Як видно з таблиці, комбінована дія тернарної системи забезпечує гасіння з використанням майже усіх факторів пожежогасіння крім ізолювання. Їх сукупна дія забезпечить значну вогнегасну ефективність. Виходячи з зазначених вогнегасних факторів аерозолю, газів $CO_2$ і $N_2$ та

УХ можна сказати, що бінарні суміші будуть найбільш ефективними та практичними завдяки гармонізації переваг кожного з засобів гасіння та об'єднання їх експлуатаційних переваг. Подальший вплив на них УХ призведе до подальшого зменшення вогнегасних концентрацій аерозолю та газів $CO_2$ та $N_2$. Таким чином, при комбінованій дії тернарної вогнегасної системи аерозолю, газу та УХ на дифузійне полум'я n-гептану буде задіюватись одночасно, як зазначалось вище, значна кількість факторів (табл 3.4 та рис. 3.10), сукупна дія яких на дифузійне полум'я призведе в момент проходження УХ до різкого припинення ланцюгових реакцій.

Таким чином, тернарна вогнегасна комбінована система ефективна завдяки поєднанню таких основних вогнегасних факторів, як інгібіювання, охолодження, аерозолем, розбавлення газом розріджувачем, відрив полум'я і фрагментація УХ і т.д. (табл. 3.4).

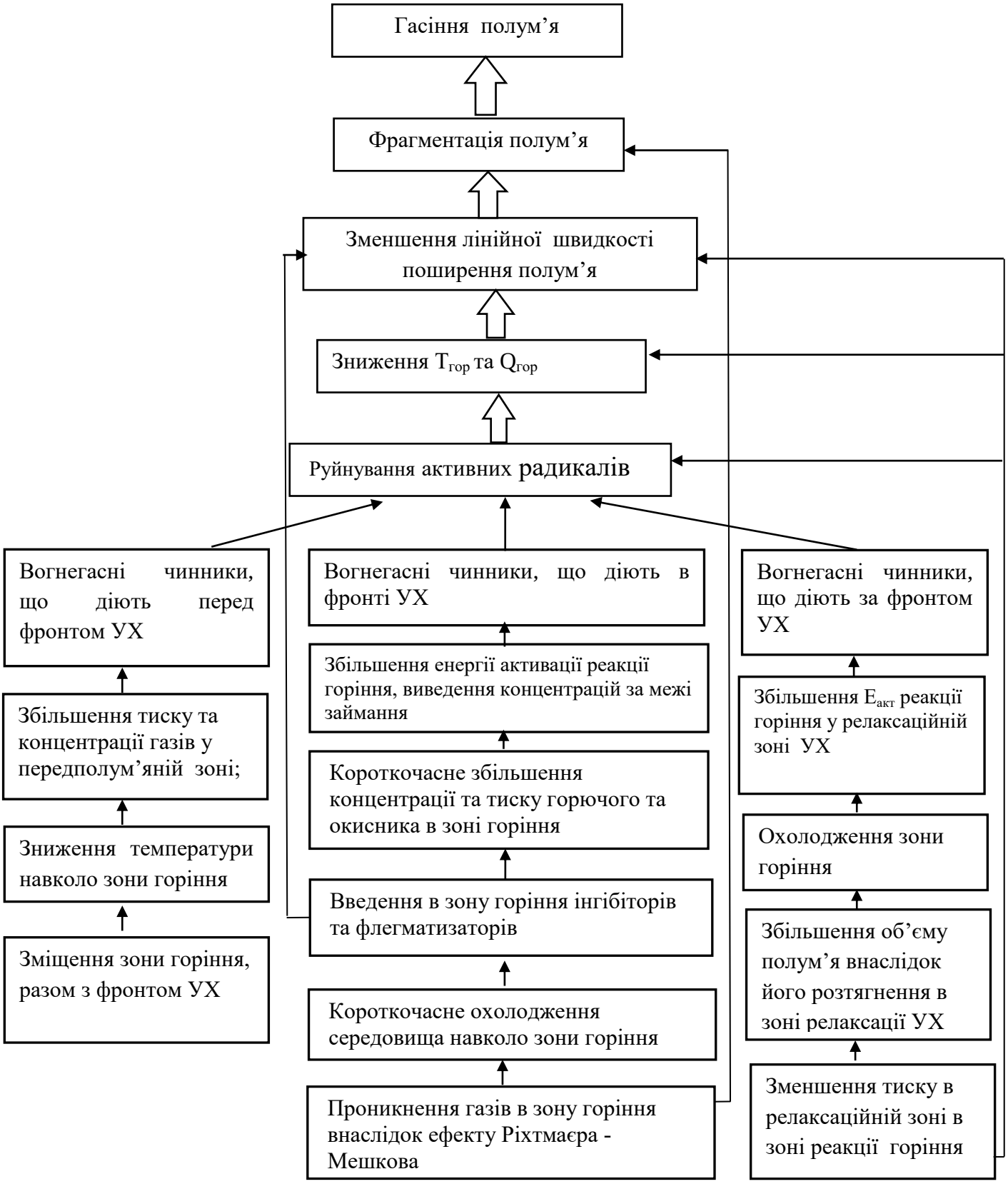



Рисунок 3.11 – Вогнегасні чинники комбінованих систем на основі ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин

### 3.4. Визначення параметрів заряду, необхідного для створення ударної хвилі заданої потужності на визначеній відстані

Силу вибуху для подавання вогнегасної речовини використовували автори [308-314], але при зазначеному способі гасіння подавання вогнегасного засобу здійснювали самою вибуховою хвилею, відповідно необхідно було витрачати енергію на доставку вогнегасної речовини в зону горіння. Закидування вибухом вогнегасного порошку на певну відстань потребує значних енергетичних характеристик вибухового заряду незважаючи чи подавання здійснюється імпульсно чи одинарно. На противагу зазначеному способу гасіння використання самої лише ударної хвилі дозволить значно зменшити параметри вибухового заряду та відповідно тиску який утворюється при вибуху. Беручи до уваги те, що для утворення ударної хвилі необхідно використати вибухову речовину, потрібно теоретично визначити, яку кількість вибухової речовини закласти в одиницю заряду. Існує ряд методик, які дають змогу визначити параметри ударної хвилі з заданими параметрами на певній відстані від цієї речовини. Для визначення маси вибухової речовини було використано методику [314], в якій передбачено визначення створюваного ударною вибуховою хвилею тиску на заданій відстані від джерела вибуху.

Згідно з методикою [314], можна розрахувати тиск ударної хвилі на заданій відстані від генератора ударної хвилі або, задавши тиск, визначити відстань, на якій він утвориться. Максимальне безпечне значення тиску, яке приймається, становить 3 кПа. Відповідно, з урахуванням безпеки приймаємо за межу больовий поріг для людини, що відповідає значенню приблизно в 1124 Па [241, 315].

Для моделювання розподілу тиску в межах стандартного приміщення було проведено розрахунок тисків, які будуть утворені на різних відстанях від джерела вибуху від 1,86 до 5 м. Потужність ударних хвиль приймаємо в межах безпечних тисків до 1124 Па. В роботі [292]

описано дослідження ударних хвиль які створювали в результаті вибуху тротилових шашок на відкритій місцевості при гасінні гасу, дизельного палива або нафти, лісових пожеж, пожеж твердих горючих матеріалів, легкозаймистих горючих рідин. Також автори стверджують, що надлишковий тиск у фронті ударної хвилі не є визначальним чинником для гасіння пожеж, що дає можливість зробити висновок про необхідність застосування для створення ударних хвиль відносно повільно згоряючих вибухових речовин, але в більшій кількості, зокрема, чорного пороху. Згідно з результатами роботи [121] теплота згорання пороху становить $2786{,}3*10^3$ Дж/кг.

При тривалості позитивної фази тиску від 0,01 до 0,2-0,3 с процес гасіння не спостерігався в повному об'ємі. Відбувався зрив полум'я і потім відновлення горіння, причому зрив полум'я виникав при надлишковому тиску УХ вище 0,5 кгс/см$^2$ (49000 Па), але теплова потужність полум’я вказана не була, та як зрозуміло з матеріалів роботи, вона була значною (Q>200 кВт/м$^2$). Тут же вказано, що при тривалості позитивної фази тиску більше 0,6 с і при надлишковому тиску у фронті УХ вище 0,5 кгс/см$^2$ процес гасіння спостерігався в повному об'ємі без повторного займання [316].

Позитивна фаза ударної хвилі – це час дії надлишкового тиску. Під фазою стиснення розуміють час дії надлишкового тиску у хвилі [317]. Для розрахунку надлишкового тиску вибуху та часу позитивної фази ударної хвилі використаємо методику, представлену в роботах [317, 318].

Проведемо розрахунки залежності тиску $\Delta P_м$ в кПа від маси $M_{вр}$ в кг на відстані 3 метри від генератора ударних хвиль при їх концентрації в межах кута в $30^o$ .

1. $M_{зар}$ = 1 г, L = 3 м

$$\overline{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{2KMT_e}},$$

де $\overline{R}$ – приведений радіус зони вибуху;

R – відстань від центра вибуху, м;

M – маса заряду;

K – коефіцієнт, який враховує характер поверхні підкладки; прийнято, що K=1

$T_e$ – тротиловий еквівалент вибухової речовини.

$$\overline{R} = \frac{3}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}66 \times 0{,}001}} = \frac{3}{0{,}1096} = 27{,}27$$

$$\Delta P = \frac{70}{27{,}27} \times \left(\sqrt{\lg 27{,}27 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{27{,}37} \times \left(\sqrt{1{,}44 - 0{,}332}\right)^{-1} = 2{,}56 \times 0{,}951 = 2{,}43 кПа$$

$$I = 0{,}4 \times \frac{\sqrt[3]{0{,}00132}}{27{,}27} = 0{,}0016 кПа \times с = 1{,}6 Па \times с$$

2. $M_{зар}$ = 2 г, L = 3 м

$$\overline{R} = \frac{3}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}66 \times 0{,}002}} = \frac{3}{\sqrt[3]{0{,}00264}} = 21{,}7$$

$$\Delta P = \frac{70}{21{,}7} \times \left(\sqrt{\lg 21{,}7 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{21{,}7} \times \left(\sqrt{1{,}33 - 0{,}332}\right)^{-1} = 3{,}22 \times 1{,}002 = 3{,}23$$ кПа

$$I = 0{,}4 \times \frac{\sqrt[3]{0{,}00264}}{21{,}7} = 0{,}002543$$ кПа × с = 2,543 Па × с

3. $M_{зар}$ = 3 г, L = 3 м

$$\overline{R} = \frac{3}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}66 \times 0{,}003}} = \frac{3}{\sqrt[3]{0{,}158}} = 18{,}987$$

$$\Delta P = \frac{70}{18{,}987} \times \left(\sqrt{\lg 18{,}987 - 0{,}332}\right)^{-1} = 3{,}686 \times \left(\sqrt{1{,}27 - 0{,}332}\right)^{-1} = 3{,}686 \times 1{,}033 = 3{,}807$$ кПа

$$I = 0{,}4 \times \frac{\sqrt[3]{0{,}00396}}{18{,}987} = 0{,}00333$$ кПа × с = 3,33 Па × с

4. $M_{зар}$ = 4 г, L = 3 м

$$\overline{R} = \frac{3}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}66 \times 0{,}004}} = \frac{3}{0{,}1741} = 17{,}23$$

$$\Delta P = \frac{70}{17{,}23} \times \left(\sqrt{\lg 17{,}23 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{17{,}23} \times \left(\sqrt{1{,}24 - 0{,}332}\right)^{-1} = 4{,}06 \times 1{,}050 = 4{,}263$$ кПа

$$I = 0{,}4 \times \frac{\sqrt[3]{0{,}00528}}{17{,}23} = 0{,}00403$$ кПа = 4,03Па

Отримані дані представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Залежність тиску від маси на відстані 3 м від генератора ударних хвиль

| $M_{вр,}$ кг | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,004 |
|---|---|---|---|---|
| ΔP, кПа | 2,43 | 3,23 | 3,807 | 4,263 |

Розрахований за вищезгаданою методикою [317] тиск, який утвориться при вибуху заряду від 0,001 кг до 0,004 кг, на відстані 3 м, становить від 2,43 кПа до 4,263 кПа, причому при масі заряду 0,001 не утворюється тиск, значення якого є меншим за межу допустимого тиску для приміщень. При тиску вибуху більшому за 3 кПа може зруйнуватись віконне скло, а при 5 кПа люди можуть зазнати легких травм, контузій та навіть можуть пошкодитися будівлі.

Проведемо розрахунки тиску, який утворюватиметься на відстані L=1- 5 метрів, за формулою 3.14.

Розрахунки проведемо за методикою “розрахунку характеристик вибуху” де $\overline{R}$ – приведений радіус зони вибуху

$$\Delta P = \frac{7}{3} \times \left(\sqrt{1 + R^3} - 1\right)^{-1},$$ кПа

(2.16)

при (L=1 m, $M_{зар}$= 4 г)

$$\bar{R}_1 = \frac{1}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}004 \times 0{,}66}} = \frac{1}{0{,}174} = 5{,}74$$

1) $$\Delta P = \frac{7}{3} \times \left(\sqrt{1 + 5{,}74^3} - 1\right)^{-1} = \frac{7}{3} \times \left(\sqrt{1 + 189{,}119} - 1\right)^{-1} = \frac{7}{3} \times (12{,}79)^{-1} = 2{,}33 \times 0{,}078 = 0{,}18$$

при (L=2 m, $M_{зар}$= 4 г)

$$\bar{R}_2 = \frac{2}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}004 \times 0{,}66}} = \frac{2}{0{,}174} = 11{,}49$$

2) $$\Delta P = \frac{70}{11{,}49} \times \left(\sqrt{\lg 11{,}49 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{11{,}49} \times \left(\sqrt{1{,}060 - 0{,}332}\right)^{-1} = 6{,}09 \times 1{,}17 = 7{,}12$$ кПа

при (L=3 m, $M_{зар}$= 4 г)

$$\bar{R}_3 = \frac{3}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}004 \times 0{,}66}} = \frac{3}{0{,}174} = 17{,}24$$

3) $$\Delta P = \frac{70}{17{,}24} \times \left(\sqrt{\lg 17{,}24 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{17{,}24} \times \left(\sqrt{1{,}24 - 0{,}332}\right)^{-1} = 4{,}06 \times 1{,}05 = 4{,}263$$ кПа

при (L=4 m, $M_{зар}$= 4 г)

$$\bar{R}_4 = \frac{4}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}004 \times 0{,}66}} = \frac{4}{0{,}174} = 22{,}99$$

4) $$\Delta P = \frac{70}{22{,}99} \times \left(\sqrt{\lg 22{,}99 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{22{,}99} \times \left(\sqrt{1{,}36 - 0{,}332}\right)^{-1} = 3{,}04 \times 0{,}99 = 3{,}0096$$ кПа

при (L=5 m, $M_{зар}$= 4 г)

$$\bar{R}_5 = \frac{5}{\sqrt[3]{2 \times 1 \times 0{,}004 \times 0{,}66}} = \frac{5}{0{,}174} = 28{,}73$$

5) $$\Delta P = \frac{70}{28{,}73} \times \left(\sqrt{\lg 28{,}73 - 0{,}332}\right)^{-1} = \frac{70}{28{,}73} \times \left(\sqrt{1{,}46 - 0{,}332}\right)^{-1} = 2{,}44 \times 0{,}94 = 2{,}294$$ кПа.

З розрахунків видно, що допустима маса заряду та відстані, на якій буде утворюватись граничне значення тиску в 4,263 кПа, не залежить від значення маси заряду, яка дорівнює 0,004 кг. Дані щодо розподілу тиску залежно від відстані наведено в таблиці 3.6.

| L, м | 1,00 | 2,00 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| ΔP, кПа | 8,52 | 7,12 | 4,263 | 3,0096 | 2,294 |

Таблиця 3.6

Залежність тиску від відстані до генератора ударних хвиль при вибуху заряду ВР масою в 4 г

Допустиме значення маси заряду становитиме 0,004 кг. На відстані 4 м від вогнища вибуху буде утворюватися тиск, рівний 3,0096 кПа. Але при використанні концентратора, тиск на вказаній відстані збільшиться мінімум у 8 разів, оскільки енергія вибуху не буде розсіюватись у вигляді сфери, а концентруватиметься в сегменті з кутом приблизно 30 градусів [319-321].

Моделювання кута поширення та зони дії ударної хвилі на відстані до 4 м показано на рис. 3.12. Для розрахунку проекції ударної хвилі, яка поширюється під кутом в $30^{o}$ , приймемо, що ударна хвиля розділяється на дві половини – кожна з яких буде рівна прямій та гіпотенузі, яка поширюється разом з нею з кутом в $15^{o}$. Таким чином, проекція УХ буде покривати на відстані 1 м коло з діаметром D1 = 0,534 м. Результати на відстанях 2, 3 та 4 м показані в таблиці 3.7.

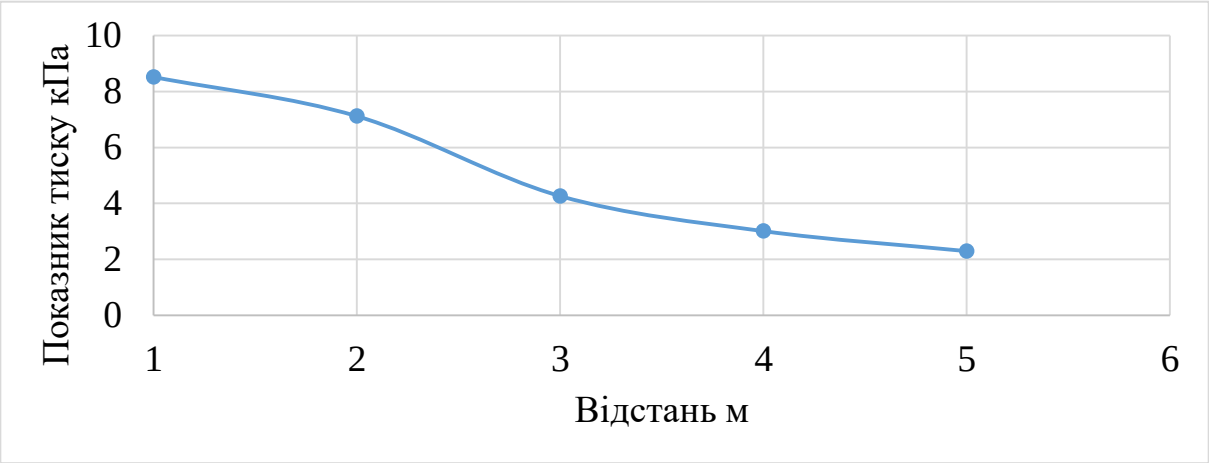



Рисунок 3.12 – Залежність тиску від відстані при масі заряду 4 г

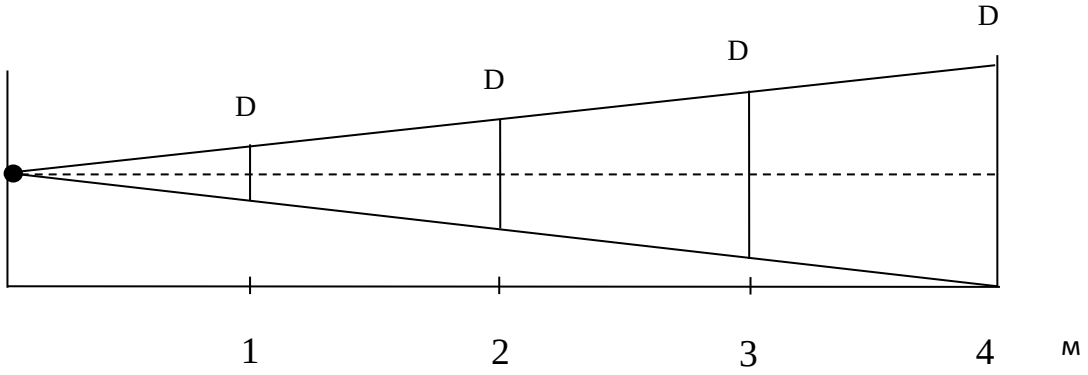



Рисунок 3.13 – Параметри ударної хвилі при масі заряду 4 г

Таблиця 3.7

Проекція тиску УХ на відстані 4 м від джерела УХ

| D1, м | D2, м | D3, м | D4, м |
|---|---|---|---|
| 0.534 | 1.068 | 1.602 | 2,136 |

Як видно з таблиці 3.7, при напрямненому вибуху приймаємо, що ударна хвиля буде поширюватися під мінімальним кутом в $30^{o,}$ що відповідає надзвуковій швидкості поширення УХ в 8М, що дорівнює швидкості детонації піроксилінового пороху, яка становить близько 3000м/с.

### 3.5. Висновки за розділом

- Теоретично обґрунтовано, що дія ударної хвилі на дифузійне полум'я може привести до його гасіння внаслідок одночасної дії чинників, які поділяються на ті, що діють перед, у фронті та за фронтом ударної хвилі. Їх почергова дія на дифузійне полум'я повинна привести до відриву, зміщення, охолодження та фрагментації полум'я. Обґрунтовано, що дія серій ударних хвиль повинна чинити вищу вогнегасну дію ніж дія одинарної ударної хвилі внаслідок багаторазового повторення зазначених ефектів.

- Теоретично встановлено, що ударні хвилі повинні значно підвищити вогнегасну ефективність об'ємних вогнегасних речовин. Виявлено, що основними явищами, які будуть сприяти підвищенню ефективності пожежогасіння в процесі проходження ударної хвилі через аерозольне середовище, буде відрив полум'я, захоплення інполярними частинами полум'я речовини об'ємної дії, збільшення тиску газоаерозольної суміші в зоні полум'я та локальне підвищення концентрації частинок внаслідок ефекту Бернуллі.
- Теоретично обґрунтовано, що підвищення ефективності гасіння об'ємними вогнегасними речовинами відбувається через одночасний вплив багатьох факторів, а саме: підвищення тиску у фронті ударної хвилі, збільшення концентрації частинок вогнегасного аерозолю, стискання та розтягування зони горіння та інгібувальний вплив вогнегасної речовини. Виявлено, що основними чинниками, які будуть сприяти підвищенню ефективності пожежогасіння в процесі проходження ударної хвилі через полум'я, буде його відрив, захоплення інполярними частинами полум'я об'ємної вогнегасної речовини, збільшення тиску вогнегасної речовини в зоні полум'я та локальне підвищення концентрації частинок дисперсної фази твердої вогнегасної речовини внаслідок ефекту Бернуллі. Одночасна дія всіх цих факторів на полум'я повинна призвести до відриву полум'я та його загасання.
- Теоретично розраховані маси вибухового заряду та значення тиску, що утворюється на відстані в 4 м, які становлять: для 1 г заряду – 2,43 кПа, для 4 г – 3,0096 кПа. Також проведено теоретичні розрахунки зміни зони тиску на відстані від 1 до 5 м для заряду в 4 г. Значення тисків становили відповідно від 8,52 кПа до 2,294 кПа. Значення $\Delta P$, отримане на відстані 4 м, є в допустимих межах і може бути використане з метою пожежогасіння.

- Обґрунтовано, що створений спосіб гасіння повинен забезпечити мінімізацію викидів в атмосферу $CO_2$, та комбінованих газових сумішей на його основі, оксидів азоту. Виключити або мінімізувати використання інших екологічно неприйнятних засобів гасіння дифузійного полум'я – піноутворювачів, хладонів, їх комбінацій та інш. Також визначено, що зазначений спосіб повинен забезпечити зменшення часу гасіння пожеж до секунд, через що унеможливити викид значних кількостей продуктів повного та неповного горіння в атмосферу.

# РОЗДІЛ 4
# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ УДАРНИМИ ХВИЛЯМИ У КОМБІНАЦІЇ З ГАЗОВИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ-РОЗРІДЖУВАЧАМИ ТА ВОГНЕГАСНИМИ АЕРОЗОЛЯМИ

## 4.1 Експериментальні дослідження з визначення вогнегасної здатності бінарних сумішей вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин - розріджувачів

Відомо [125], що хімічна природа пального суттєво впливає на процес горіння піротехнічних виробів, крім цього пальне виступає в ролі пластифікатора і зручність формування та вогнегасна ефективність аерозолів буде залежати від природи пального та його повноти термічного перетворення при горінні. Тому наступним етапом було проведення досліджень із встановлення вогнегасної ефективності аерозолів при близьких до стехіометричних концентраціях компонентів.

### 4.1.1 Визначення ефективності рецептури АУС для гасіння комбінованим способом

Враховуючи що в роботах [322-331] зазначено, що АУС взяті в концентраціях близьких до їх стехіометричних, які також широко використовується в піротехніці та забезпечують найвищу ефективність гасіння і відповідно мінімальну вогнегасну концентрацію. Одержані результати отримані за вищенаведеною методикою представлені в таблицях 4.1 - 4.2. В якості пального було обрано вже випробувані в роботі [82] як компонент АУС ідітол та сахароза, які доступні та широко використовуються в піротехніці. В якості окисника – нітрат калію. АУС

готували перемішуванням та подальшим розчиненням компонентів в розчиннику у співвідношеннях: ідітол – 20 %  нітрат калію – 80%.

Таблиця 4.1

Вогнегасна ефективність аерозолів, одержаних спалюванням АУС на основі ідітолу

| № з/п | Вміст компонентів АУС (% мас.) | | (г/м$^3$) |
|---|---|---|---|
| | $KNO_3$ | ідітол | |
| 1 | 80 | 20 | 22,6* |
| 2 | 80 | 20 | 25,6 |
| 3 | 78 | 20 | 27,4 |
| 4 | 75 | 20 | 28,6 |

*- для CH4

Таблиця 4.2

Вогнегасна ефективність аерозолю, одержаного спалюванням сахарозовмісних АУС

| № з/п | Вміст компонентів АУС (% мас.) | | (г/м$^3$) |
|---|---|---|---|
| | $KNO_3$ | сахароза | |
| 1 | 70 | 30 | 16,7 |
| 2 | 68 | 28 | 23,0 |

Результати з визначення мінімальної вогнегасної концентрації за розробленою методикою наведеною в розділі 2 показали, що високу ефективність  проявили обидва зразки АУС як на основі ідітолу, так і сахарози, компоненти яких є доступними  та недорогими. Сахароза як паливо було відкинута враховуючи, що форс полум’я при її використанні є

дещо інтенсивніший, а зразки АУС на її основі довго сохнуть та є гідрофільні оскільки в якості розчинника використовується вода. Крім цього, механічна міцність зразків є невисокою і від незначних ударів вони можуть зазнавати пошкоджень. На противагу сахарозі, ідітол представляє собою смолу, яка легко подрібнюється розчиняється в розчинниках та відповідно її можна легко змішувати з окисником. Таким чином, враховуючи простоту виготовлення, дешевизну та доступність компонентів – ідітолу та нітрату калію, а також задовільні експлуатаційні показники, для подальших досліджень було обрано АУС на основі ідітолу та нітрату калію. Крім того, зазначений АУС має невисоку швидкість згорання, помірний форс полум'я та тривалий період зберігання.

### 4.1.2. Особливості впливу бінарних сумішей вогнегасного аерозолю та газів - розріджувачів на дифузійне полум'я n-гептану.

Відомо [322-327], що при спалюванні АУС з кожного його грама утворюється 0,3-0,5 л газоаерозольної суміші, яка складається з дисперсних частинок солей калію, натрію або кальцію. При згорянні АУС утворюються також інертні гази-флегматизатори – $CO_2$, $N_2$, водяна пара та ін., і дисперсні частинки солей. При взаємодії цих частинок утворюється складна система, структура і склад якої постійно змінюється з часом. Так, в момент утворення газоаерозольної системи вона складається з ультрадисперсних часточок солей калію, які можуть формувати структури з вмістом води та $CO_2$. Такі структури будуть чинити набагато ефективнішу вогнепригнічувальну дію завдяки комбінованій дії інгібіторів та флегматизаторів. У таблиці 4.3 наведено склади АУС й продуктів їхнього горіння. Як видно з таблиці, при горінні вміст газів-флегмаизаторів є невеликим, хоча з аналізу видно, що збільшення їх концентрації веде до підвищення вогнегасної ефективності.

Щодо газів-розріджувачів, до яких, зокрема, входять діоксид вуглецю, азот, аргон та їх суміші, то вони нетоксичні, не утворюють токсичних продуктів термічного розкладу, не руйнують озоновий шар, є більш доступними і дешевими, ніж хладони, їх суміші та інші вогнегасні засоби об'ємної дії. Однією з перших газових вогнегасних речовин, яку запропоновано як альтернативу хладонам, – був саме діоксид вуглецю ($CO_2$). Відомий спосіб гасіння пожежі, що включає подачу в осередок пожежі діоксиду вуглецю у вигляді снігового аерозолю [57-59].

Таблиця 4.3

Характеристики АУС [84, 332]

| Характеристика АУС | АПГ | ГВА | ПАГ |
|---|---|---|---|
| Температура горіння, °С | 2467 | 1127 | 1227 |
| | Компонентний склад ТПК (%) | | |
| $KNO_3$ | - | 51,0 | 85,0 |
| $KClO_4$ | 85,0 | - | - |
| KCl | - | 25,0 | - |
| Полімерні смоли | 9 | 22 | 15 |
| Каталізатор горіння | 6 | 2 | - |
| | Газоподібні продукти аерозолю (%) | | |
| $H_2O$ | 27 | 2 | 5 |
| $CO_2$ | 28 | 38 | 7 |
| CO | 7 | 4 | 22 |
| $H_2$ | 2 | 1 | 23 |
| $N_2$ | - | 7 | - |
| Загалом | 64 | 52 | 57 |
| | Конденсовані продукти аерозолю (%) | | |
| $K_2CO_3$ | - | 33 | 39 |
| KCl | 35 | 14 | - |
| KOH | 1 | 1 | 4 |
| Загалом | 36 | 48 | 43 |

Недоліком способу є велика витрата газу, мала ефективність, оскільки інертні гази чинять на вогнище пожежі лише охолоджувальний та розбавляючий вплив, не впливаючи на хімізм реакції горіння. Для

досягнення позитивного ефекту необхідне витіснення кисню з зони горіння та зниження його концентрації нижче 16 % і відповідно заміна його газами флегматизаторами. Подача газу-флегматизатора призводить до значної витрати газу та необхідності відповідної кількості подаючої арматури та ємностей для його зберігання.

Основними вогнегасними факторами аерозолю являється ефективне флег-матизування та гасіння гомогенного горіння, що підтвердили автори роботи [168] при незначних концентраціях аерозолю – 15 г/м$^3$ та $CO_2$ – 9 %. Таким чином, поєднання двох вогнегасних компонентів в одному, дозволяє отримати універсальний вогнегасний засіб для гасіння як гомогенних, так і гетерогенних горючих середовищ. Сумісне застосування вогнегасних аерозолів та газів підводить до питання їх сумісності, а загалом до можливого синергізму між компонентами аерозолю та газу.

Відомо, що в результаті згоряння аерозольутворювальних речовин зазвичай утворюються карбонатні та хлоридні солі лужних металів. Вирішення питання сумісного застосування аерозолів та газів пов’язане з їх характеристиками. Аналіз загальних закономірностей процесів інгібування показує, що підвищити ефективність інгібувальних засобів можна знизивши вміст окислювача в горючій суміші або в зоні горіння. Відповідно, робить висновок автор [192], газові флегматизатори, додатково розбавляють, знижують концентрацію кисню в горючій системі і тим самим різко підвищують ефективність вогнегасної дії інгібітора. Автори [159-161] вказують, що додавання газів флегматизаторів, а зокрема азоту приводить до зменшення в 2,5 рази вогнегасної концентрації хладону 114В2 при гасінні n-гептану. Розбавлення суміші природного газу з повітрям на 10 % $N_2$ зменшує вогнегасну концентрацію хладону до 2-х разів, а добавка 20 % – приводить до зменшення концентрації хладону до 0,5–0,6 %. Те саме спостерігається при добавці $CO_2$. В роботі [176], показано що, суміш $CO_2$ з хладоном 1301 має значно нижчі вогнегасні

концентрації ніж азот та аргон. Автори [181], розрахувавши температуру полум'я, показали, що гази флегматизатори знижують температуру полум'я, а інгібувальний ефект на полум'я посилюється завдяки зменшенню температури реакції горіння, що приводить до синергізму та відповідно підвищення ефективності пожежогасіння такою сумішшю.

Таким чином, гомогенні вогнегасні суміші інгібіторів та теплових флегматизаторів володіють значними вогнегасними характеристиками. Для встановлення залежностей та вогнегасної ефективності було проведено експериментальне визначення вогнегасної ефективності сумішей аерозолю та газу $CO_2$. Визначення ефективності гасіння бінарною газоаерозольною сумішшю проводили за раніше описаним методом «Камери». Здатність гасіння визначали таким чином. Запалювальна суміш алюмінію та нітрату калію підпалювалась над поверхнею n-гептану. Давався час горіння 10 секунд, після чого камеру заповнювали аерозолем та подавали газ. Після заповнення сумішшю протягом 180 секунд фіксували ознаки горіння. В першій серії дослідів було визначено здатність аерозольно-газової суміші (АГС) гасити горіння n-гептану при подачі суміші після його займання за вказаною методикою.

Результати експерименту показані в табл. 4.4. Як видно з результатів дослідів, суміш добре гасить та запобігає горінню n-гептану, на який діє таке високотемпературне джерело, як піротехнічна суміш пудри алюмінію з нітратом калію. Лише в одному випадку, коли концентрація газу була недостатньо високою і при підпалюванні n-гептану в результаті займання його парів сталося два хлопки. В решті випадків, як при підпалюванні n-гептану, так і при заповненню сумішшю, коли гептан горів в присутності запалювальної суміші, горіння припинялось у всіх випадках.

Таблиця 4.4

Ефективність гасіння n-гептану бінарними сумішами вогнегасного аерозолю з $CO_2$

| № | Склад рецептури | Час подачі АГС | Результат |
|---|---|---|---|
| 2 | Аерозоль – 51 г/м$^3$ | Після запалювання ЗС | Гасіння,<br>Відсутність спалахів |
| 4 | Аерозоль – 15 г/м$^3$ $CO_2$ -4 % | Після запалювання ЗС | Гасіння. Відсутність повторного займання |
| 5 | Аерозоль – 10 г/м$^3$ $CO_2$ -15 % | Після запалювання ЗС | Гасіння. Відсутність повторного займання |

Залежність вогнегасної концентрації АУС (на основі ідітолу) від добавки $CO_2$ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану показана на рис. 4.1.

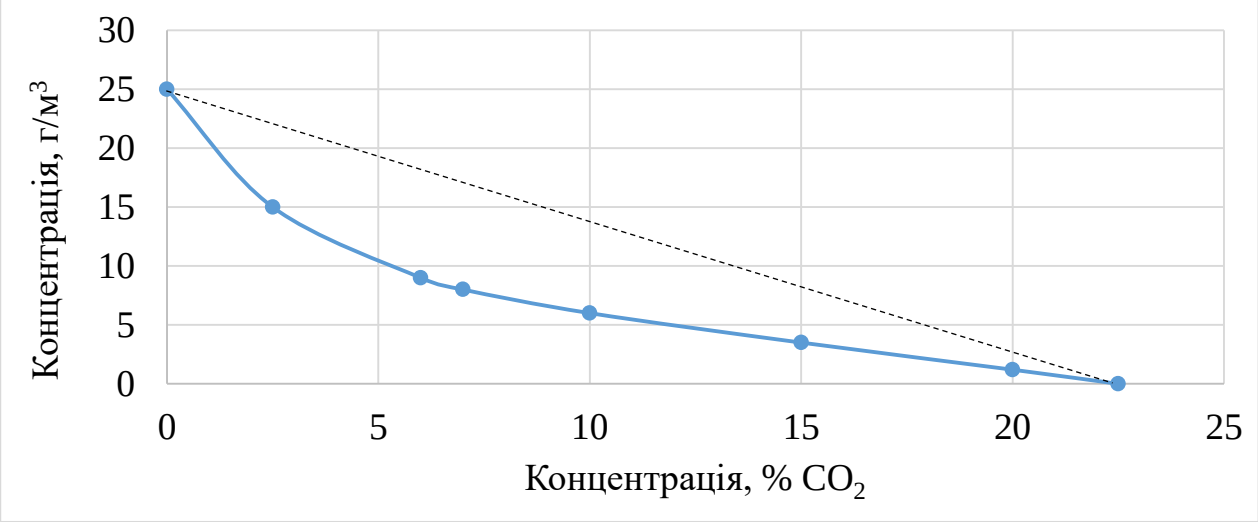



Рисунок 4.1 – Залежність вогнегасної концентрації АУС (на основі ідітолу) від добавки $CO_2$ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану

З результатів експерименту видно, що навіть незначна кількість введеного інертного газу в об’єм твердофазового аерозолю суттєво знижує вогнегасну концентрацію останнього, а при подальшому збільшенні – зводить процес гасіння до створення повністю негорючого середовища, тобто забезпечується флегматизування. Відомо [316], що вогнегасна ефективність аерозолів не залежить від порядку введення інертних газів, а залежить тільки від їх концентрації. Під час пожежі частина аерозолю після контакту з полум’ям виноситься вгору гарячими потоками конвекції, і для їх охолодження через взаємодію з навколишнім повітрям необхідний певний проміжок часу. Крім того, певна частина цього аерозолю після охолодження може седиментувати і буде виведена з процесу гасіння. Все це призводить до зменшення концентрації аерозолю. Введення відносно холодного газу з температурою 20-24°С сприяє швидкому встановленню такого теплового режиму, при якому вогнегасна дія аерозолю проявляється більш ефективно. Роль газової фази у підвищенні вогнегасної ефективності аерозолів може бути пояснена тим, що компоненти газової фази $CO_2$ і $H_2O$ сприяють утворенню карбонатних і гідратованих форм твердої фази. Як вказано в [151, 154], при збільшенні вологості вогнегасна ефективність аерозолю оксидів металів K, Na, зростає. При горінні заряду АУС утворюється $K_2O$, який може прореагувати з $CO_2$ або з $H_2O$ з утворенням $K_2CO_3$ або KOH, або одночасно з $CO_2$ і $H_2O$ з утворенням $KHCO_3$. У цих випадках об’єм газової фази, а відповідно і аерозолю, зменшується, що спричиняє збільшення концентрації твердої фази в одиниці об’єму аерозолю. Таким чином, добавка $CO_2$ значно впливає на вогнегасну ефективність аерозолю і її роль в процесах гасіння аерозолями необхідно розглядати нарівні та одночасно з наявністю твердої фази.

Зважаючи на те, що досліджуваною нами вогнегасною речовиною є суміш аерозолю та $CO_2$, необхідно зосередити увагу також на взаємодії газової та аерозольної фаз.

Про те, що найчастіше вогнегасні дисперсні склади впливають на процес припинення горіння комбінованим способом -- сукупністю кількох, або навіть всіх перерахованих видів впливу, йдеться у роботах [118, 323, 324]. Тому правильніше вважати, що при використанні будь-яких вогнегасних дисперсних складів діють всі перераховані механізми гасіння, тільки проявляються вони в різній мірі і з різним внеском в загальну ефективність припинення процесу горіння. Основна складність полягає у встановленні головного (домінуючого) механізму вогнегасної дії компонентів. Це обумовлено тим, що даний механізм може бути різним залежно від особливостей конкретного процесу горіння, способу і інтенсивності подачі порошку в зону горіння.

Таким чином, не враховуючи концентрацію твердої фази, добавка до неї інертних газів, таких як $CO_2$, $N_2$ чи $H_2O$, повинна підвищити теплопоглинальну здатність бінарної суміші аерозолю та газів флегматизаторів.

Як видно з таблиці 4.5, при збільшенні вогнегасної ефективності теплопоглинальна здатність бінарної аерозолегазової суміші зростає з приблизно 9% - при концентрації аерозолю 50 г/м$^3$ з добавкою 50% $CO_2$ до 27% - при добавці бінарної суміші з співвідношеннями компонентів – 150 г/м$^3$ та добавкою 50% $CO_2$. Величина загального теплопоглинання і частка теплоти згоряння метаноповітряної суміші, що поглинається аерозолем, який складається з 50 % (мас.) $K_2CO_3 \cdot 2\ H_2O$ та 50 % $CO_2$ збігається з результатами авторів [229], які вказують на високу теплопоглинальну здатність аерозолів при високих їх концентраціях.

Таблиця 4.5

Значення теплоти поглинання вогнегасного аерозолю [232, 235]

| $C_A$, г/м$^3$ | ∑ Q, кДж | % поглинання |
|---|---|---|
| 50 | 315,750 | 8,9 |
| 75 | 473,625 | 13,3 |
| 100 | 631,500 | 17,8 |
| 150 | 947,250 | 26,7 |

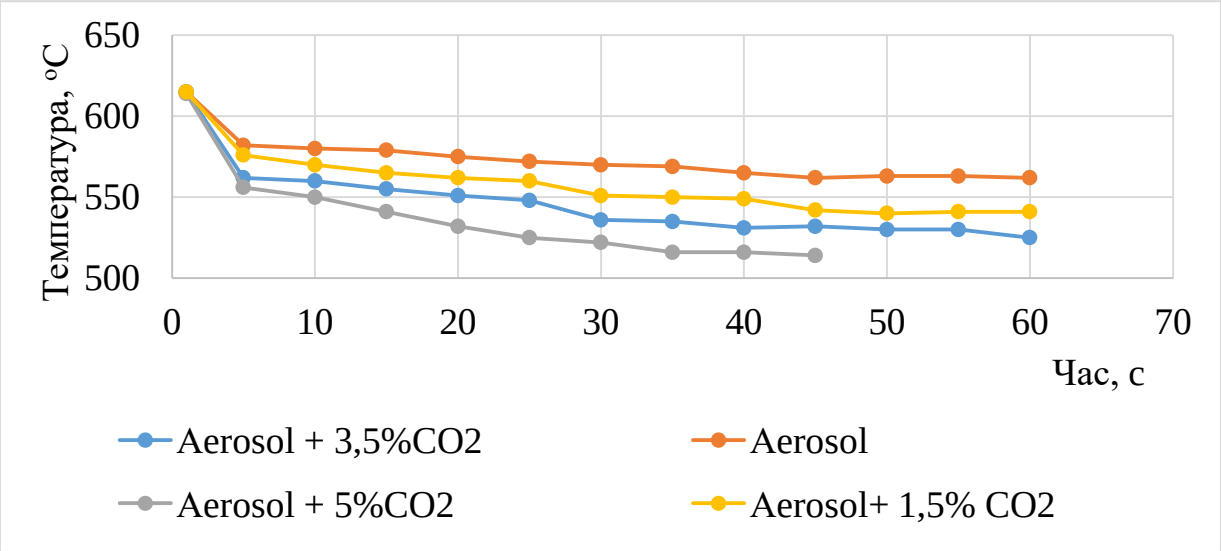
Отже, добавляння $CO_2$ до аерозолю на основі неорганічних солей калію значно підвищує вогнегасну ефективність отриманої бінарної аерозольногазової суміші. Результатом добавляння до аерозолю вуглекислого газу стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів кінцевої бінарної суміші до 30% при оптимальних співвідношеннях компонентів в бінарній аерозольно-газовій суміші – аерозолю 15 г/м$^3$ – вуглекислого газу – 4%, при яких суміш є вогнегасною для дифузійного полум'я n-гептану.

### 4.1.2.1. Вплив добавок $CO_2$ на температуру дифузійного n-гептанового полум'я.

Далі було досліджено дію на дифузійне та кінетичне полум'я бінарної аерозольно-вуглекислої суміші (БАВС). При цьому був встановлений вплив БАВС на температуру n-гептанового дифузійного полум'я. Отримані результати показані на графіку (рис. 4.2).

Як видно з результатів експерименту, охолоджувальна ефективність аерозолю з добавкою $CO_2$ є значно вищою за дію азоту, враховуючи що кількість добавки $CO_2$ в 2 рази менша за азот. При цьому, як видно з графіка вона більш ефективно зменшують температуру дифузійного n-гептанового полум'я (рис. 4.2) вже при низьких концентраціях добавки. Так при добавлянні 1,5 % $CO_2$ до аерозолю температура полум'я у перші 10 секунд зменшується приблизно на 65 $^oC$. Подальше добавляння ще 1 % $CO_2$ призводить до зниження температури ще на 85 $^oC$. При

максимальному збільшенні концентрації $CO_2$ до 5 % відбувається зниження температури полум'я загалом на 134 °С, до 565 °С. Таким чином, можна стверджувати про значно вагоміший вплив на температури дифузійного та кінетичного полум'я при дії на них БАВС. Подальше




добавляння $CO_2$ вище 5 % приводить до затухання полум'я.

Рисунок 4.2 – Залежність зміни температури (t) дифузійного полум'я n-гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолю в БАВС в 10 г/м$^3$

Що стосується кінетичного полум'я, то на рисунку 4.3 показано динаміку зменшення його температури при добавлянні зазначених кількостей БАВС. У всіх випадках температура полум'я при внесенні його в БАВС різко зменшувалась. Мінімально температура зменшувалась на 80 °С при внесенні самого лише аерозолю та максимально майже на 230 °С при внесенні БАВС в кінетичне полум'я з співвідношенням аерозолю 10 г/м$^3$ та $CO_2$ – 5%.

При дії на кінетичне полум'я БАВС з концентраціями аерозолю до 25 г/м$^3$ і добавкою $CO_2$ до 15% також не вдавалось досягнути гасіння такого полум'я. Полум'я набувало червонуватого забарвлення, незначно відривалось, але не гасло. Вплив добавки БАВС на температуру

кінетичного полум'я n-гептану показаний на рис 4.3. Як видно з графіка, на цьому рисунку добавка БАВС вже при незначних концентраціях зменшує температуру кінетичного полум'я.

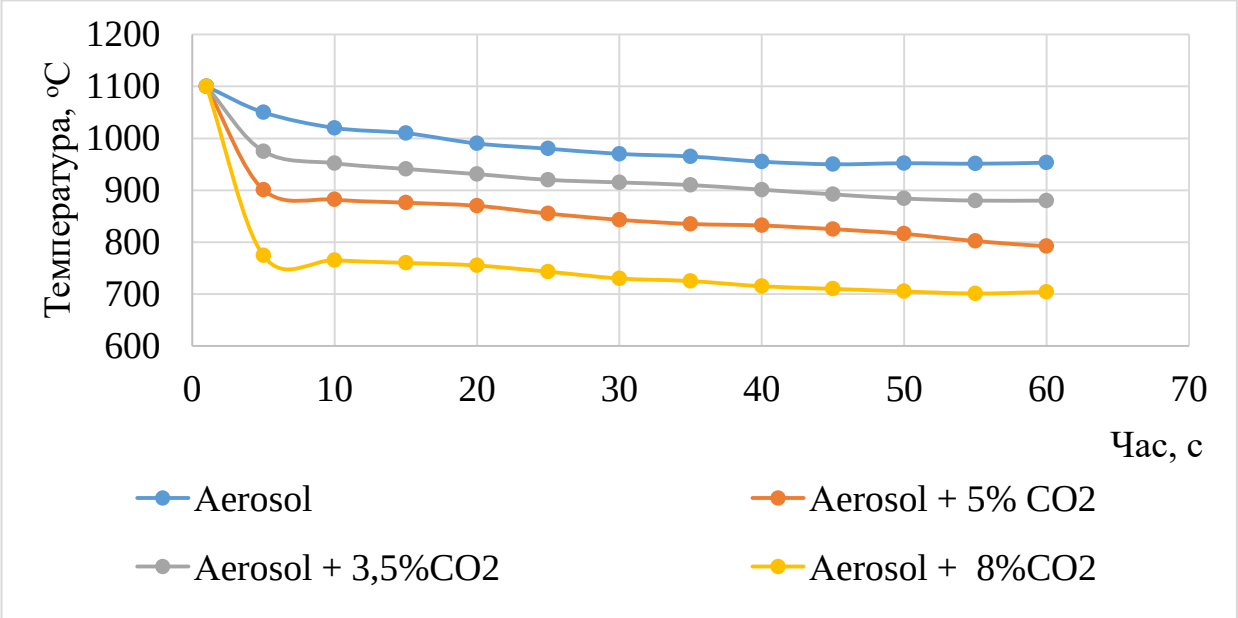



Рисунок 4.3 – Залежність зміни температури (t) кінетичного полум'я n-гептану в часі (τ с) залежно від концентрації $CO_2$ при сталій концентрації аерозолю в БАВС в 35 г/м$^3$

Виходячи з результатів досліджень [333], можна констатувати цікаві закономірності, які полягають у різниці значень, на які знижується температура, як дифузійного так і кінетичного полум'я при дії на них бінарних вогнегасних сумішей з значною різницею в концентраціях аерозолю та газів. Особливість полягає в тому, що бінарна газоаерозольна суміш при взаємодії з кінетичним полум'ям швидше всього не потрапляє у великій кількості всередину нього, але приводить до зниження його температури завдяки обтіканню самого полум'я. Також цікавим є те, що БАВС при подачі її всередину пальника разом з горючою сумішшю загасити кінетичне полум'я n-гептану неможливо навіть при великих її концентраціях, в той же час дифузійне полум'я гаситься при цьому значно легше, а різниця в концентраціях БАВС становить до 4 разів.

### 4.1.2.2. Вплив співвідношення аерозолю та азоту на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-азотної суміші при гасінні дифузійного полум'я n-гептану

Для підтвердження того, що сумісна дія аерозолю з добавками азоту приведе до значного підвищення вогнегасної ефективності кінцевої бінарної аерозольно-азотної суміші (БААС), було проведено серію експериментів на установці «Камера» та отримано відповідні залежності, які показані на рис. 4.4. Графік зміни вогнегасної концентрації був побудований з умовою, що індивідуальна вогнегасна концентрація аерозолю, утвореного з АУС на основі ідітолу, для n-гептану становить 25,6 г/м$^3$, а азоту для n-гептану – 33 % [333].

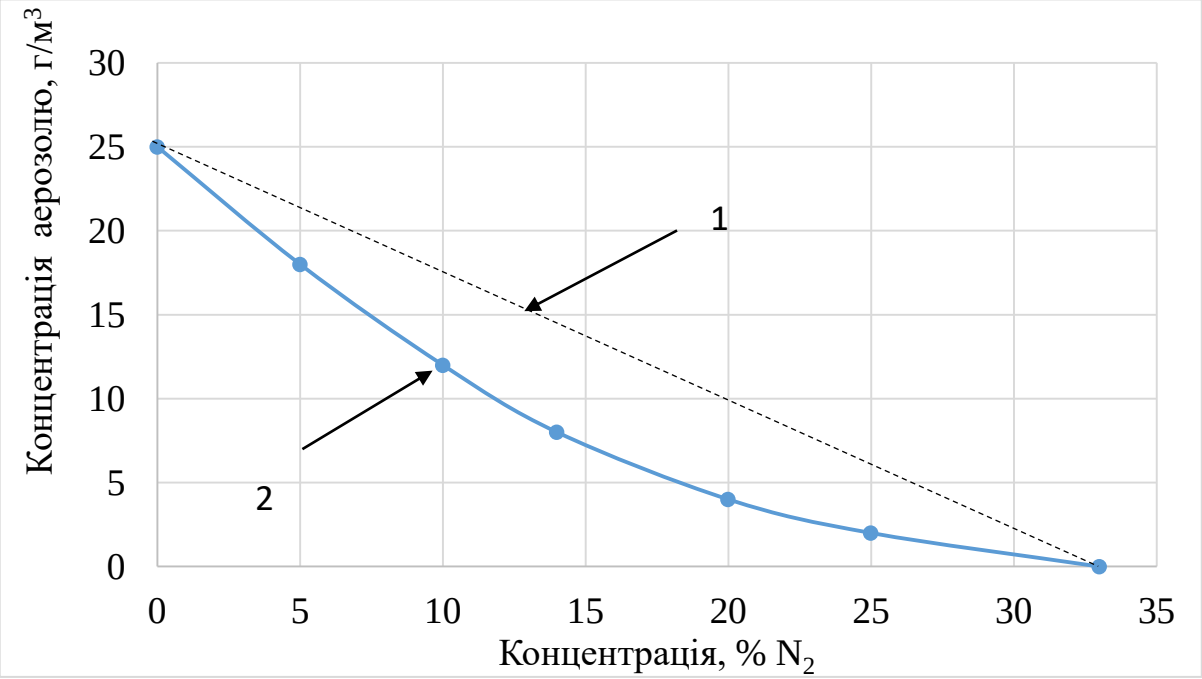



Рисунок 4.4 – Графік змінення вогнегасної концентрації БААС для дифузійного полум'я гептану, залежно від співвідношення аерозолю г/м$^3$ та азоту % $N_2$: 1 - пряма залежності (теоретична) у разі адитивності 2 - експериментальна пряма

На рисунку 4.4 наведено графік залежності зміни вогнегасної концентрації для дифузійного полум'я n-гептану від співвідношення вмісту вогнегасного аерозолю, та азоту за їх сумісного комбінованого подавання у випробувальну камеру.

Як видно з графіка, експериментальні значення компонентів БААС, розташовані нижче значень у разі адитивності, відповідно зафіксовано синергізм між компонентами БААС.

**4.1.2.3. Залежність вогнегасної ефективності БААС при гасінні кінетичного полум'я n-гептану, від зміни концентрації $N_2$ при сталій концентрації аерозолю 45 г/м$^3$**

Для виявлення особливостей гасіння, залежностей та вогнегасної ефективності БААС від зміни концентрації азоту в ній, було проведено дослідження зміни температури при впливі на кінетичне полум'я БААС з співвідношенням аерозолю 45 г/м$^3$ та добавками азоту 5, 10, та 15%. Кінетичне полум'я, отримували завчасно перемішуючи пару n-гептану з повітрям на відповідному пальнику.

Далі було досліджено вогнегасну дію на кінетичне полум'я БААС. При дії на кінетичне полум'я БААС з концентраціями до 100 г/м$^3$ і добавкою азоту до 30% досягнути гасіння такого полум'я не вдавалось. Полум'я набувало блакитного забарвлення, швидкість його зменшувалась, воно незначно відривалось, але процес горіння продовжувався.

На рисунку 4.5 показано динаміку зменшення температури при добавлянні зазначених кількостей азоту. У всіх випадках температура полум'я при внесенні його в БААС різко зменшувалась. Мінімально температура зменшувалась на 50 $^o$C при внесенні пальника в чистий аерозоль та максимально майже на 200 $^o$C при внесенні пальника в БААС з співвідношенням аерозолю 45 г/м$^3$ азоту – 15%.

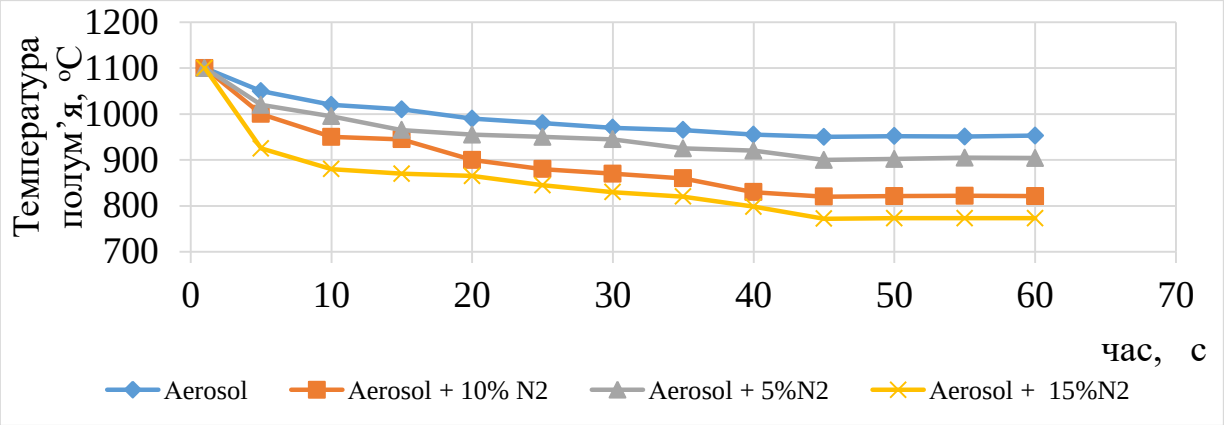



Рисунок 4.5 – Залежність зміни температури (t) кінетичного полум'я n-гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолю в БААС в 45 г/м$^3$

Далі було проведено дослідження з визначення впливу БААС на температуру n-гептанового дифузійного полум'я. Отримані результати показані на рис. 4.6.

Як видно з результатів експерименту, охолоджувальна ефективність аерозолю з добавкою різної концентрації азоту є незначною, але все ж таки зменшує температуру дифузійного n-гептанового полум'я (рис. 4.6). Сам аерозоль зменшує температуру полум'я теж приблизно на 40 °С при концентрації лише 10 г/м$^3$. При добавлянні 2,5 % азоту до аерозолю температура полум'я у перші 5 секунд зменшується приблизно на 50 °С. Подальше добавляння 5 % азоту призводить до зниження температури за перших 5 секунд до 65 °С спочатку і пізніше загалом до 70 °С. При найбільшому збільшенні концентрації азоту до 10 % відбувається більш різке зниження температури полум'я на приблизно 75 °С, і в кінцевому результаті температура зменшується загалом на 100 °С, до 565 °С. Таким чином зниження температури при добавці азоту відбувається, але не досить значне, і загалом динаміка зменшення температури полум'я не дуже відрізняється від зниження температури при нижчих концентраціях

азоту.

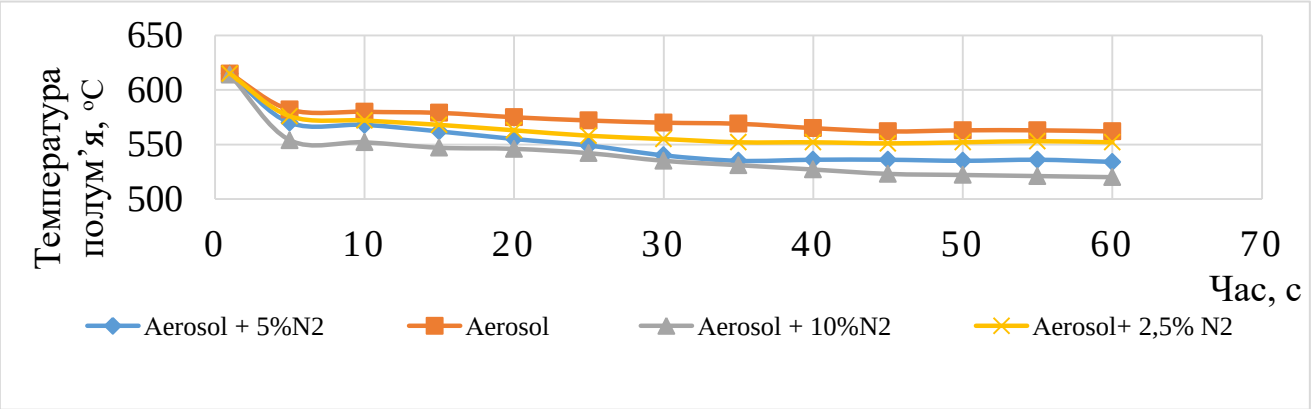



Рисунок 4.6 – Залежність зміни температури (t) дифузійного полум'я n-гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолю в БААС в 10 г/м$^3$

Для підтвердження того, що дія БААС завдає комбінованого впливу на кінетичне та дифузійне полум'я, було визначено особливості гасіння аерозолем та аерозольно-азотною сумішшю та проведено розкадрування процесу гасіння зазначеною сумішшю.

Результати розкадрування показані на рис.4.7. Як видно з рис.4.7 поз. 1, при гасінні кінетичного полум'я відбувається спочатку змінення кольору полум'я після чого полум'я незначно відривається та повертається в стабільний стан. Відрив відбувається на 25-60 секунді. При цьому в цей момент температура полум'я знижується майже на 150 °С.

Далі показано процес розкадрування гасіння аерозольно-азотною сумішшю. Для визначення особливостей впливу БААС на кінетичне та дифузійне полум'я було проведено відеофіксацію гасіння БААС камерою NIKON 1 J4 з частотою кадрів 120 на секунду. Результати розкадрування дифузійного полум'я n-гептану БААС із співвідношенням аерозолю – 15 г/м$^3$ та азоту – 7,5% показано на рис. 4.7. На рисунку 4.8 показано вплив на кінетичне полум'я БААС з співвідношенням аерозолю – 45 г/м$^3$ та азоту від 10 % до 20 %.

При гасінні дифузійного полум'я (рис.4.7) воно слабо забарвлювалось, після чого воно починало пульсувати, поз 3-4 рис. 4.7, зменшувалось у

розмірах та гасло. Зріз пальника показано на рисунках горизонтальною рискою, а розміри полум'я та його відрив показані стрілками.

Загалом поведінка дифузійного та кінетичного полум'я при дії на них БААС є різною, зважаючи на те, що кінетичне полум'я загасити БААС так само і як БАВС навіть при значних концентраціях не вдається, а дифузійне полум'я гаситься при низьких концентраціях компонентів БААС. Ймовірною причиною цього є різна температура полум'я, яка для кінетичного полум'я становить близько 1100 $^{o}$C, а для дифузійного полум'я в два рази менше – 615 $^{o}$C. При цьому, при добавлянні до аерозолю азоту гасіння дифузійного полум'я відбувається не його відривом, а в результаті збільшення частоти пульсацій до 24-35 Гц, що було визначено методом відеофіксації. Полум'я в процесі пульсування зменшується в розмірі і гасне (рис.4.8, поз. 5).

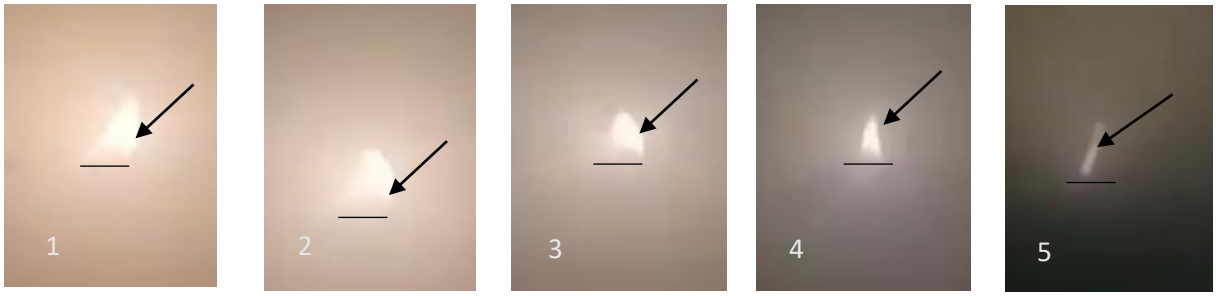



Рисунок 4.7 – Процес гасіння дифузійного полум'я n-гептану БААС при співвідношенні аерозоль -15 г/м$^3$, $N_2$ -7,5%

Як видно з рис.4.8 поз. 1 при дії на кінетичне полум'я БААС відбувається спочатку змінення кольору полум'я, подеколи воно незначно відривається та згодом повертається у вихідне становище і продовжує горіти. Причому при збільшенні кількості азоту до 15% (рис 4.8) відрив максимальний становить 4 мм, та при 20% (рис.4.9) воно відривається дещо більше, до — 12мм, що показано стрілкою (горизонтальною рискою позначено зріз пальника).

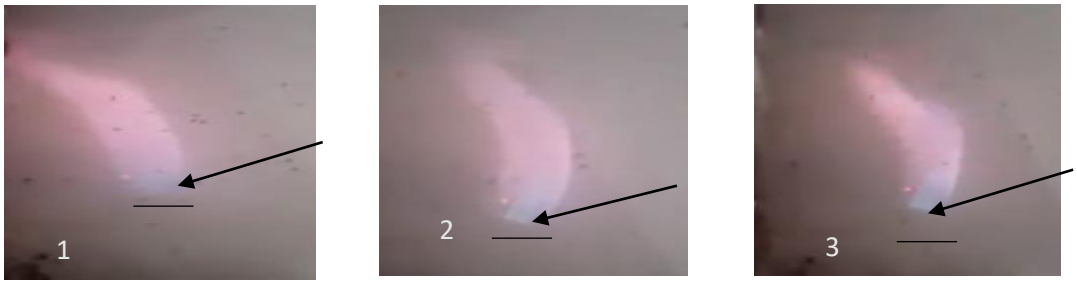



Рисунок 4.8 – Вплив БААС на кінетичне полум'я n-гептану: 1 – БААС аерозоль – 45 г/м$^3$ та 10 % азот; 2 – БААС аерозоль – 45 г/м$^3$ та 15 % азот; 3 –БААС аерозоль – 45 г/м$^3$ та 20 % азот

### 4.1.2.4. Обговорення результатів дослідження впливу добавок азоту на вогнегасну ефективність та особливості гасіння БААС кінетичного та дифузійного полум'я n-гептану

При визначенні ефективності впливу азоту на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-азотної суміші, як витікає з отриманих результатів, закономірним є спільне зменшення вогнегасних концентрацій аерозолю та азоту. Це обумовлено синергічною дією між компонентами БААС завдяки розбавленню горючого середовища газом-флегматизатором та значним зростанням інгібувальної дії аерозолю. Внесення дифузійного полум'я n-гептану в камеру з БААС, коли повітря подається в горючу суміш ззовні при стехіометричному співвідношенні горючого та окисника, не призводить до його гасіння навіть при значних концентраціях БААС. Причому, як витікає з результатів експерименту, для гарантованого гасіння, газоаерозольна суміш обов'язково повинна потрапляти всередину полум'я в зазначеній кількості разом з повітрям. Потрапляння аерозольно-азотної суміші всередину полум'я разом з повітрям призводить до значнішого зниження температури, ніж при внесенні кінетичного полум'я n-гептану всередину БААС, коли повітря подається ззовні при

концентрації аерозолю в 4 рази меншій. Таким чином зниження температури полум'я відбувається через комплексну інгібувально–охолоджувальну дію компонентів БААС на полум'я.

На основі результатів вимірювань температури кінетичного полум'я можна сказати, що сам аерозоль не чинить при невисоких концентраціях значної вогнепригнічувальної дії, і лише при збільшенні концентрації аерозолю, його вогнегасна дія значно зростає, що відбувається через ймовірно більший охолоджувальний ефект. Причому при внесенні в аерозоль гептанового пальника з кінетичним полум'ям, його температура різко знижувалась приблизно на 120 $^{o}$C, на 10 секунді, що видно з графіка на рис. 4.3, але це не призводило до його гасіння. Далі температура кінетичного полум'я незначно зменшувалась, та стабілізувалась на значенні приблизно в 950 $^{o}$C. Добавляння до аерозолю азоту в кількості 5% призводило до зменшення температури на початку до 1000$^{o}$C що видно з графіка на рис.4.5, після чого температура стабілізувалась на позначці 905 $^{o}$C. Подальше збільшення концентрації азоту до 10% призвело до зменшення температури в кінцевому результаті, до позначки 887 $^{o}$C, а добавка 15 % спричинила зниження температури до 866 $^{o}$C, причому зниження температури на перших 10 секундах відбулось навіть більше – до 849 $^{o}$C, а потім температура стабілізувалась на позначці 866$^{o}$C.

Вимірювання температури дифузійного полум'я показали подібні результати (рис.4.6) і при добавлянні самого аерозолю у концентрації 10 % температура полум'я знижувалась з 620 $^{o}$C до 580 на 5 секунді після чого температура зменшувалась ще приблизно до 560 $^{o}$C та стабілізувалась на 40 секунді на значенні в 564 $^{o}$C. Полум'я при цьому зменшувалось в розмірах та пульсувало з частотою 3-8 Гц. Добавляння 2,5% азоту до аерозолю ще більше зменшило температуру в момент внесення полум'я в БААС, далі також відбувалось зниження температури та на 35 секунді температура стабілізувалась на позначці приблизно 553 $^{o}$C. Збільшення

концентрації азоту в БААС з 2,5 % до 5 % призвело до більш різкого зниження температури, при внесенні пальника всередину камери на 5 секунді температура знизилась до 568 $^{o}$C після чого також продовжилось незначне зниження температури, яка стабілізувалась на 540 $^{o}$C. При збільшенні в БААС концентрації азоту до 10% початкове зменшення температури продовжувалось ще більше та сягнуло до 554 $^{o}$C після чого температура стабілізувалась на 522 $^{o}$C. Полум'я при цьому значно зменшилось в розмірах та перейшло в нестабільний стан – пульсувало з частотою близько 8 -12 Гц, частково відривалось та знову стабілізувалось. Таким чином, гасіння полум'я відбувалось при зменшенні його розмірів та внаслідок пульсації а не відриву, при цьому температура зменшувалась максимум на 250 $^{o}$C від початкової.

Результати розкадрування процесу гасіння аерозолем та аерозолем з добавкою азоту показали, що аерозоль без добавки азоту забезпечує зміну кольору дифузійного полум'я та подальше його гасіння. Добавка до аерозолю від 5 до 12% азоту призводить до зміни в механізмі гасіння, яка полягає у пришвидшенні моменту нестабільності полум'я, збільшення частоти його пульсації до 24-35 Гц та швидшого гасіння після незначного нестабільного стану за час на 30 % менший ніж без добавки азоту. Причому полум'я, як було зазначено, не гасилось, а збільшення концентрації $N_2$ в БААС призводило до незначного збільшення відриву та теж незначного зменшення розмірів полум'я (рис. 4.6).

Як видно з результатів експерименту, дія БААС на кінетичне та дифузійне полум'я не призводить до його сильного та різкого охолодження, а максимальне зменшення температури становить близько 230 $^{o}$C але полум'я не гасне. Таким чином дія БААС ймовірно призводить до зменшення теплоутворення завдяки розбавленню атмосфери азотом і добре узгоджується з результатами авторів [30], де вони теж вказали на зниження температури в результаті дії суміші хладону та вуглекислого

газу на вуглеводневе полум’я. Подальше збільшення концентрації аерозолю і азоту призводить спочатку до різкого зменшення температури, але вона зменшується далі протягом 30 – 40 секунд від внесення пальника в полум’я після чого стабілізується. Це можна пояснити зменшенням ефективності теплоутворення реакції, та можливо незначним збільшенням концентрації продуктів горіння n-гептану, та охолодженням аерозолю.

Зіставлення результатів зміни температури при внесенні в аерозоль дифузійного полум’я n-гептану та аерозолю з добавкою азоту теж призводить до зменшення температури в зазначеному діапазоні – тобто температура при введенні пальника зменшується приблизно на 100 $^{o}$C, після чого полум’я відривається і гасне. Таким чином, незважаючи на те, що дію БААС ще необхідно досліджувати та визначити домінуючий механізм гасіння, вона володіє значною вогнегасною ефективністю, яка є значно вищою за вогнегасну ефективність окремо взятих компонентів БААС аерозолю та азоту.

Таким чином, отримані дані щодо значень вогнегасної ефективності та особливостей гасіння БААС можуть бути основою, для створення екологічно чистих вогнегасних систем для гасіння горючих гомогенних та гетерогенних середовищ. Визначені співвідношення аерозолю та азоту забезпечують задовільні умови для життєдіяльності людини при гасінні пожеж у замкнутих об’ємах. При застосуванні для гасіння БААС концентрація кисню в захищуваному приміщенні не знижується нижче 16 %, що дає змогу перебувати нетривалий час людям всередині захищуваного об’єму. Сам аерозоль не чинить сильної токсичної дії [23] при вогнегасних концентраціях 40-50 г/м$^3$ і при меншій концентрації в суміші з нейтральним екологічно чистим азотом підходить як альтернатива вогнегасному компоненту для автоматичних систем для забезпечення гасіння об’ємів з перебуванням людей та живих організмів [335-337].

Таким чином проведеними в роботі дослідженнями встановлено, що добавка газів – розріджувачів до аерозолю неорганічних солей калію призводить до значного підвищення вогнегасної ефективності бінарної аерозольно-газової суміші завдяки синергізму між її компонентами. Результатом добавлення до аерозолю газів–розріджувачів стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів бінарної суміші до 30% при оптимальних співвідношеннях компонентів в БААС аерозоль –10 г/м$^3$ , азот – 12,1 %, та БАВС аерозоль – 10 г/м$^3$, азоту – 12,1 %, за яких суміш є вогнегасною, для дифузійного полум'я n-гептану при оптимальних концентраціях компонентів. Визначено інтенсивність та значення зменшення температури дифузійного полум'я при перебуванні його в бінарних газоаерозольних сумішах, які полягають у тому що добавка газів- розріджувачів ймовірно призводить до зменшення тепловиділення і, як наслідок, зменшення температури полум'я.

Отримані залежності та характеристики аерозольно-азотних сумішей можуть бути підґрунтям для створення ефективних вогнегасних систем для захисту та гасіння об'єктів з можливим короткостроковим перебуванням людей.

### 4.1.2.5. Встановлення ефективних рецептур бінарних газоаерозольних сумішей з високою вогнегасною ефективністю

В таблиці 4.6 наведено вогнегасні значення бінарних сумішей аерозолю з $CO_2$ та $N_2$. Як бачимо, добавка лише 2,5% $CO_2$ зменшує вогнегасну концентрацію аерозолю до 2 разів, що забепечує можливість перебування людини в цьому середовищі до 20 хвилин. При добавлянні $N_2$ до суміші також відбувається зменшення вогнегасної концентрації аерозолю, але не в такій мірі, як у випадку з $CO_2$. Подальше збільшення кількості $CO_2$ та $N_2$ в суміші приводить до збільшення вогнегасної ефективності до 3 –х разів.

Таблиця 4.6

Вогнегасні концентрації сумішей аерозолю з $CO_2$ та $N_2$

| Концентрації вогнегасної речовини | | | Примітка |
|---|---|---|---|
| Аерозоль г/м$^3$ | $CO_2$ % | $N_2$ % | |
| 18 | 2,5 | | Вогнегасна концентрація. безпечна для людини |
| 12 | 5 | | Вогнегасна концентрація. безпечна для людини |
| 5 | 12 | | Оптимальна вогнегасна концентрація |
| 18 | | 5 | Вогнегасна концентрація. безпечна для людини |
| 12 | | 12 | Вогнегасна концентрація. безпечна для людини |
| 7,5 | | 15 | Оптимальна вогнегасна концентрація |

Аналізуючи вогнегасні співвідношення зазначених компонентів можна стверджувати, що концентрація окремих компонентів в бінарній суміші є безпечною для людини, що дає можливість перебувати певний час в цьому середовищі людям.

### 4.2. Застосування ударних хвиль для припинення та запобігання горіння газових горючих середовищ

Планування експериментальних досліджень виконуємо згідно із рекомендаціями для планування експерименту в технологічних дослідженнях [338, 339]. Згідно цих рекомендацій найбільше

розповсюдження отримали повнофакторні експерименти, в яких фактори k варіюють на двох рівнях, тобто експерименти типу $2^k$. Менш популярні експерименти типу $3^k$, оскільки із зростанням числа рівнів факторів різко зростає кількість дослідів.

### 4.2.1. Математичне планування експерименту для визначення тривалості часу гасіння пожежі ударними хвилями

Методика проведення експериментальних досліджень.

Тому для проведення експериментальних досліджень приймаємо експерименти типу $2^k$. При виконанні повнофакторного експерименту кількість дослідів визначають за залежністю

$$N = 2^k. \tag{1}$$

При розроблені планів для різних значень k привертає увагу та обставина, що включення кожного нового фактора приводить до подвоєння числа дослідів в плані. Реалізація таких планів стає важкою і дорогою задачею та крім того вимагає великих витрат часу. Ефективність повного факторного експерименту в цьому випадку помітно знижується. Тому ця обставина привела до ідеї виконання дробового факторного експерименту.

Для позначення дробового факторного експерименту використовують запис виду $2^{k-p}$ , де p – кількість взаємодій в повному факторному експерименті типу $2^k$, яка підлягає заміні новими (додатковими) факторами. Якщо p = 1, то експеримент типу $2^{k-1}$ називається півреплікою від повного факторного експерименту типу $2^k$. При p = 2 маємо чвертьреплику і т. д.

Виходячи з наведених положень для виконання експериментальних досліджень приймаємо дробовий факторний експеримент. Такий підхід

пояснюється значною кількістю факторів, які впливають на аргумент при проведенні кожного із запланованих експериментальних досліджень.

Планування експериментальних досліджень для визначення тривалості часу гасіння пожежі методом ударної хвилі.

Фактори (основні), які впливають на тривалість часу гасіння пожежі τ в мс методом ударної хвилі:

- q – густина теплового потоку від осередку пожежі, кВт/м$^2$;
- А – концентрація аерозолі в середовищі пожежі, г/м$^3$;
- Г – концентрація газів $CO_2$ або $N_2$ в середовищі пожежі, %;
- Р – тиск ударної хвилі, Па.

Кодування факторів необхідне для перекладу натуральних значень факторів в безрозмірні величини, щоб мати нагоду побудувати план-матрицю експерименту. Результати кодування наведені в табл. 1.

Таблиця 4.7

Кодування факторів

| Код та рівні факторів | Густина теплового потоку q, кВт/м$^2$ | | Концентрація аерозолю А, г/м$^3$ | | Концентрація газу Г, % | | | | Тиск ударної хвилі Р, Па | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | при проведенні досліду на основі $CO_2$ | | при проведенні досліду на основі $N_2$ | | | |
| Код фактора | $\tilde{x}_1$ | $\ln \tilde{x}_1$ | $\tilde{x}_2$ | $\ln \tilde{x}_2$ | $\tilde{x}_3$ | $\ln \tilde{x}_3$ | $\tilde{x}_3$ | $\ln \tilde{x}_3$ | $\tilde{x}_4$ | $\ln \tilde{x}_4$ |
| Верхній (+1) | 90 | 4,5 | 12 | 2,48 | 16 | 2,77 | 21 | 3,04 | 6050 | 8,7 |
| Нульовий (0) | 48 | - | 7,45 | - | 9,75 | - | 12,25 | - | 3145 | - |
| Нижній (-1) | 6 | 1,79 | 2,9 | 1,06 | 3,5 | 1,25 | 3,5 | 1,25 | 240 | 5,48 |

Перетворюємо незалежні змінні $\tilde{x}_i$ в безрозмірні змінні за залежністю

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i\max})}{\ln \tilde{x}_{i\max} - \ln \tilde{x}_{i\min}} + 1. \qquad (4.2)$$

$$x_1 = \frac{2(\ln q - 4,5)}{4,5 - 1,79} + 1 = 0,74 \ln q - 2,32;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln A - 2,48)}{2,48 - 1,06} + 1 = 1,41 \ln A - 4,9;$$

при проведені досліду на основі $CO_2$

$$x_3 = \frac{2(\ln \tilde{A} - 2,77)}{2,77 - 1,25} + 1 = 1,32 \ln \tilde{A} - 3,64;$$

при проведені досліду на основі $N_2$

$$x_3 = \frac{2(\ln \tilde{A} - 3,04)}{3,04 - 1,25} + 1 = 1,12 \ln \tilde{A} - 3,4;$$

$$x_4 = \frac{2(\ln Đ - 8,7)}{8,7 - 5,48} + 1 = 0,62 \ln Đ - 4,4.$$

### 4.2.1.1. Складання план-матриці експерименту

Складаємо план-матрицю дробового факторного експерименту (чвертьреплику) типу $2^{4-2}$ (табл. 2). Рівняння для визначення тривалості часу τ гасіння пожежі з введенням членів, які враховують взаємодію факторів, записуємо в кодових змінних

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4, \qquad (4.3)$$

де y = τ, мс.

Таблиця 4.8

План-матриця дробового факторного експерименту типу $2^{4-2}$

| № досліду | $x_1$ | $x_2$ | $x_3 = x_1x_2$ | $x_4 = x_1x_3$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | +1 | +1 | +1 | +1 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 2 | –1 | +1 | –1 | +1 |
| 3 | +1 | –1 | –1 | −1 |
| 4 | –1 | –1 | +1 | –1 |

Рандомізація дослідів. Для гарної відтворюваності результатів дослідів приймаємо число повторних дослідів r = 2. Встановлюємо випадковий порядок постановки дослідів в часі. В даному випадку отримали таку послідовність проведення дослідів: 2, 4, 1, 4, 3, 1, 3, 2. В цій послідовності кожне поєднання рівнів (номери дослідів) трапляються двічі. Паралельні досліди передбачаються для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок.

### 4.2.1.2. Реалізація плану експерименту

В процесі виконання дослідів використовуємо план-матрицю дробового факторного експерименту типу $2^{4-2}$ (табл. 2), а отримані результати заносимо в табл. 4.9., та 4.10.

Таблиця 4.9

Умови та результати дослідів дробового факторного експерименту типу $2^{4-2}$

з вогнегасною системою на основі газу $CO_2$

| № | q | | А | | Г | | Р | | Перший дослід $y_{1i}$, мс | Другий дослід $y_{2i}$, мс | Середнє значення $\bar{y}_i$, мс | $\ln \bar{y}_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | Значення | $x_2$ | Значення | $x_3$ | Значення | $x_4$ | Значення | | | | |
| 1 | +1 | 90 | +1 | 12 | +1 | 16 | +1 | 6050 | 1425 | 1445 | 1435 | 7,27 |
| 2 | –1 | 6 | +1 | 12 | -1 | 3,5 | +1 | 6050 | 15 | 15 | 15 | 2,71 |
| 3 | +1 | 90 | –1 | 2,9 | -1 | 3,5 | –1 | 240 | 5000 | 5000 | 5000 | 8,52 |
| 4 | –1 | 6 | –1 | 2,9 | +1 | 16 | –1 | 240 | 85 | 75 | 80 | 4,38 |

Таблиця 4.10

Умови та результати дослідів дробового факторного експерименту типу $2^{4-2}$

з вогнегасною системою на основі газу $N_2$

| № | q | | A | | Г | | Р | | Перший дослід $y_{1i}$, мс | Другий дослід $y_{2i}$, мс | Середнє значення $\overline{y}_i$, мс | $\ln \overline{y}_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | Значення | $x_2$ | Значення | $x_3$ | Значення | $x_4$ | Значення | | | | |
| 1 | +1 | 90 | +1 | 12 | +1 | 21 | +1 | 6050 | 1580 | 1505 | 1542,5 | 7,34 |
| 2 | –1 | 6 | +1 | 12 | -1 | 3,5 | +1 | 6050 | 15 | 20 | 17,5 | 2,86 |
| 3 | +1 | 90 | –1 | 2,9 | -1 | 3,5 | –1 | 240 | 5000 | 5000 | 5000 | 8,52 |
| 4 | –1 | 6 | –1 | 2,9 | +1 | 21 | –1 | 240 | 125 | 120 | 122,5 | 4,81 |

Визначення значень коефіцієнтів регресії.

Дробовий факторний експеримент типу $2^{4-2}$ з вогнегасною системою на основі газу $CO_2$.

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{7,27 + 2,71 + 8,52 + 4,38}{4} = 5,72;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{1i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,27 + (-1)2,71 + (+1)8,52 + (-1)4,38}{4} = 2,17;$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{2i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,27 + (+1)2,71 + (-1)8,52 + (-1)4,38}{4} = -0,73;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{3i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,27 + (-1)2,71 + (-1)8,52 + (+1)4,38}{4} = 0,1;$$

$$b_4 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{4i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,27 + (+1)2,71 + (-1)8,52 + (-1)4,38}{4} = -0,73.$$

На підставі отриманих значень коефіцієнтів рівняння регресії має такий вигляд для вогнегасної системи на основі газу $CO_2$

$$y = 5,72 + 2,17x_1 - 0,73x_2 + 0,1x_3 - 0,73x_4 . \qquad (4.4)$$

Дробово-факторний експеримент типу $2^{4-2}$ з вогнегасною системою на основі газу $N_2$.

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{7,34 + 2,86 + 8,52 + 4,81}{4} = 5,88;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{1i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,34 + (-1)2,86 + (+1)8,52 + (-1)4,81}{4} = 2,05;$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{2i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,34 + (+1)2,86 + (-1)8,52 + (-1)4,81}{4} = -0,78;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{3i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,34 + (-1)2,86 + (-1)8,52 + (+1)4,81}{4} = 0,19;$$

$$b_4 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_{4i}) \cdot \ln \overline{y_i}}{N} = \frac{(+1)7,34 + (+1)2,86 + (-1)8,52 + (-1)4,81}{4} = -0,78.$$

На підставі отриманих значень коефіцієнтів рівняння регресії має такий вигляд для вогнегасної системи на основі газу $N_2$

$$y = 5,88 + 2,05x_1 - 0,78x_2 + 0,19x_3 - 0,78x_4 . \qquad (4.5)$$

Перевірка відтворюваності дослідів. При однаковому числі паралельних дослідів r на кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність процесу перевіряється за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S^2_{pi\max}}{S^2_p} \le G_{(0,05;N;f_r)}, \qquad (4.6)$$

де $S^2_{pi\max}$ – найбільше значення дисперсії розсіювання $S^2_{pi}$ (береться з третього стовпця табл. 5);

N = 4 – кількість дослідів для нашого випадку;

$f_r = r - 1 = 2 - 1 = 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки;

$G_{(0,05;\ N;\ fr)}$ – табличне критичне значення критерію Кохрена (табл. 6).

Перевірка відтворюваності дослідів з вогнегасною системою на основі газу $CO_2$. Визначаємо дисперсію розсіювання. Для цього скористаємося допоміжною табл. 4.11.

Таблиця 4.11

Визначення дисперсії розсіювання значень результатів експерименту $S^2_p$

| № досліду | $S_{pi} = \ln \acute{o}_{i(1,2)} - \ln \overline{\acute{o}_i}$ | $S^2_{pi}$ |
|---|---|---|
| 1 | 7,26 – 7,27 = -0,01 | 0,0001 |
| 1 | 7,27 – 7,27 = 0 | 0 |
| 2 | 2,71 – 2,71 = 0 | 0 |
| 2 | 2,71 – 2,71 = 0 | 0 |
| 3 | 8,52 – 8,52 = 0 | 0 |
| 3 | 8,52 – 8,52 = 0 | 0 |
| 4 | 4,44 – 4,38 = 0,06 | 0,036 |
| 4 | 4,32 – 4,38 = -0,06 | 0,036 |
| $S^2_p = \sum_{i=1}^{8} S^2_{pi} = 0,0721$ | | |

Таблиця 4.12

Значення $G_{(0,05;N;f_r)}$

| N | $f_r$ | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 0,9985 | 0,9750 | 0,9392 |
| 3 | 0,9669 | 0,8709 | 0,7977 |
| 4 | 0,9065 | 0,7679 | 0,6841 |
| 5 | 0,8412 | 0,6838 | 0,5981 |

Визначаємо критерій Кохрена та порівнюємо із допустимим значенням

$$G = \frac{0,036}{0,0721} = 0,4993 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065.$$

Відтворюваність процесу забезпечується.

Дисперсія відтворюваності (похибка досліду)

$$S_{\hat{a}}^2 = \frac{S_p^2}{N(r-1)} = \frac{0,0721}{4(2-1)} = 0,018.$$

### 4.2.1.3 Перевірка адекватності лінійної моделі

**Перевірка відтворюваності** дослідів з вогнегасною системою на основі газу $N_2$. Визначаємо дисперсію розсіювання. Для цього скористаємося допоміжною табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Визначення дисперсії розсіювання значень результатів експерименту $S_p^2$

| № досліду | $S_{pi} = \ln \acute{o}_{i(1,2)} - \ln \overline{\acute{o}_i}$ | $S_{pi}^2$ |
|---|---|---|
| 1 | 7,36 – 7,34 = 0,02 | 0,0004 |
| 1 | 7,32 – 7,34 = -0,02 | 0,0004 |
| 2 | 2,71 – 2,86 = -0,15 | 0,0225 |
| 2 | 2,99 – 2,86 = 0,13 | 0,0169 |
| 3 | 8,52 – 8,52 = 0 | 0 |
| 3 | 8,52 – 8,52 = 0 | 0 |
| 4 | 4,83 – 4,81 = 0,02 | 0,0004 |
| 4 | 4,79 – 4,81 = -0,02 | 0,0004 |
| $S_p^2 = \sum_{i=1}^{8} S_{pi}^2 = 0,041$ | | |

Визначаємо критерій Кохрена та порівнюємо із допустимим значенням

$$G = \frac{0,0225}{0,041} = 0,5487 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065.$$

Відтворюваність процесу забезпечується.

Дисперсія відтворюваності (похибка досліду)

$$S_{\hat{a}}^2 = \frac{S_p^2}{N(r-1)} = \frac{0,041}{4(2-1)} = 0,01.$$

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії виконується за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;\, f_в)} \frac{s_в}{\sqrt{N}}, \qquad (4.7)$$

де $t_{(0,05;\ fв)}$ – табличне значення критерія Стьюдента при 5% рівні значущості з числом ступенів вільності $f_в = N$ (табл. 8).

Таблиця 4.14

Значення $t_{(0,05;\ fв)}$

| $f_в = N$ | $t_{(0,05;\ fв)}$ |
|---|---|
| 1 | 12,71 |
| 2 | 4,30 |
| 3 | 3,18 |
| 4 | 2,78 |
| 5 | 2,57 |

В нашому випадку $t_{(0,05;\ 4)} = 2,78$. Тоді для гасіння з вогнегасною системою на основі газу $CO_2$ $\Delta b = 2,78\frac{\sqrt{0,0721}}{\sqrt{4}} = 0,134$, а для гасіння з вогнегасною системою на основі газу $N_2$ $\Delta b = 2,78\frac{\sqrt{0,041}}{\sqrt{4}} = 0,202$.

Апріорно відомо, що коефіцієнт $b_3$ в обох рівняннях менший за $\Delta b_i$ (тобто він є не значущим), впливає на параметр у, тобто на цей параметр у впливає фактор Г. Тому є можливість включити в апроксимуючий поліном також коефіцієнт $b_3$.

Перевірка адекватності лінійної моделі виконується за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, якщо нерівність у випадку, якщо $S^2_{â} << S^2_{àä}$

$$F = \frac{s^2_{â}}{s^2_{àä}} \le F_{(0{,}05;\, f_{àä};\, f_{â})}, \tag{4.8}$$

де $s^2_{ad}$ - дисперсія адекватності;

$$s^2_{àä} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (\ln \bar{y}_i - y_{ì î ä.ç})^2}{N - r - 1}, \tag{4.9}$$

N = 4 – число незалежних оцінок дисперсії (кількість незалежних дослідів);

r = 2 – число паралельних дослідів (число повторних дослідів);

$\bar{y}_i$ – середнє значення відгуку в і-му досліді;

$y_{моді}$ – розраховане за моделлю значення відгуку в і-му досліді (за залежністю (4));

$F_{(0{,}05;\, f_{ad};\, f_{â})}$ – критерій Фішера при 5%-му рівні значущості з числом ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{ад}$ = N–r–1 та числом ступенів вільності дисперсії відтворюваності $f_в$ = N (табл. 4.9).

Визначаємо значення $y_{мод.і}$ за моделлю (4.4)

$$y_{мод.1} = 5{,}72 + 2{,}17\cdot(+1) - 0{,}73\cdot(+1) + 0{,}1\cdot(+1) - 0{,}73(+1) = 6{,}53;$$
$$y_{мод.2} = 5{,}72 + 2{,}17\cdot(-1) - 0{,}73\cdot(+1) + 0{,}1\cdot(-1) - 0{,}73(+1) = 1{,}99;$$
$$y_{мод.3} = 5{,}72 + 2{,}17\cdot(+1) - 0{,}73\cdot(-1) + 0{,}1\cdot(-1) - 0{,}73(-1) = 9{,}25;$$
$$y_{мод.4} = 5{,}72 + 2{,}17\cdot(-1) - 0{,}73\cdot(-1) + 0{,}1\cdot(+1) - 0{,}73(-1) = 4{,}91.$$

Тоді $s^2_{ад}$ буде

$$s^2_{ад} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\bar{y}_i - y_{i\,мод.})^2}{N-r-1} = \frac{(7,27-6,53)^2+(2,71-1,99)^2+(8,52-9,25)^2+(4,38-4,91)^2}{4-2-1} = 1,88.$$

Критерій Фішера

$$F = \frac{0,018}{1,88} = 0,0957 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086,$$

тобто модель (4) адекватна.

Таблиця

4.15

Значення $F_{(0,05;\,f_{ад};\,f_в)}$

| $f_в = N$ | $f_{ад} = N-r-1$ | |
|---|---|---|
| | 1 | 2 |
| 1 | 161,45 | 199,5 |
| 2 | 18,513 | 19,0 |
| 3 | 10,128 | 9,5521 |
| 4 | 7,7086 | 6,9443 |
| 5 | 6,6079 | 5,7861 |
| 6 | 5,9874 | 5,1433 |
| 7 | 5,5914 | 4,7374 |
| 8 | 5,3177 | 4,4590 |

Визначаємо значення $y_{мод.i}$ за моделлю (5)

$$y_{мод.1} = 5,88 + 2,05\cdot(+1) - 0,78\cdot(+1) + 0,19\cdot(+1) - 0,78(+1) = 6,56;$$

$$y_{мод.2} = 5,88 + 2,05\cdot(-1) - 0,78\cdot(+1) + 0,19\cdot(-1) - 0,78(+1) = 2,08;$$
$$y_{мод.3} = 5,88 + 2,05\cdot(+1) - 0,78\cdot(-1) + 0,19\cdot(-1) - 0,78(-1) = 9,3;$$
$$y_{мод.4} = 5,88 + 2,05\cdot(-1) - 0,78\cdot(-1) + 0,19\cdot(+1) - 0,78(-1) = 5,58.$$

Тоді $S^2_{ad}$ буде

$$s^2_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(\bar{y}_i - y_{i\,\text{îä.}^3})^2}{N-r-1} = \frac{(7,34-6,56)^2 + (2,86-2,08)^2 + (8,52-9,3)^2 + (4,81-5,58)^2}{4-2-1} = 2,42.$$

Критерій Фішера

$$F = \frac{0,01}{2,42} = 0,0041 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086,$$

тобто модель (4.5) адекватна.

Переведення рівнянь (4.4) і (4.5) з кодованими факторами у вигляд з натуральними змінними.

Для приведення рівнянь (4.4) і (4.5) з кодованими факторами у вигляд з натуральними змінними використаємо залежність (4.2), за допомогою якої отримано значення кодових значень в залежності від натуральних,

Тоді при проведені досліду на основі $CO_2$ отримуємо

$$y = 5,72 + 2,17(0,74\ln q - 2,32) - 0,73(\ln A - 4,9) + 0,1(1,32\ln \tilde{A} - 3,64) -$$
$$-0,73(0,62\ln P - 4,4) = 7,116 + 1,6\ln q - 0,73\ln A + 0,132\ln \tilde{A} - 0,45\ln P.$$

При переході до тривалості гасіння будемо мати

$$\ln \tau = \frac{e^{7,116} \ln q^{1,6} \ln \tilde{A}^{0,132}}{\ln A^{0,73} \ln P^{0,45}}.$$

Після потенціювання отримуємо

$$\tau = \frac{1230,6 q^{1,6} \tilde{A}^{0,132}}{A^{0,73} P^{0,45}}, \text{ мс.} \quad (4.10)$$

Основна увага нами спрямована на визначення значення тиску ударної хвилі в залежності від густини теплового потоку та концентрації складових вогнегасної речовини. Крім цього, ставиться умова, що процес гасіння повинен виконуватися на протязі часу $\tau \leq 1000$ мс.

В цьому випадку значення тиску ударної хвилі при використанні вогнегасної системи на основі газу $CO_2$ можна визначити за залежністю

$$P = \frac{1,59 q^{3,56} \tilde{A}^{0,29}}{A^{1,62}}, \text{ Па.} \quad (4.11)$$

При проведені досліду на основі $N_2$ отримуємо

$$y = 5,88 + 2,05(0,74 \ln q - 2,32) - 0,78(\ln A - 4,9) + 0,19(1,12 \ln \tilde{A} - 3,4) -$$
$$-0,78(0,62 \ln P - 4,4) = 7,72 + 1,52 \ln q - 0,78 \ln A + 0,21 \ln \tilde{A} - 0,48 \ln P.$$

При переході до тривалості гасіння будемо мати

$$\ln \tau = \frac{e^{7,72} \ln q^{1,52} \ln \tilde{A}^{0,21}}{\ln A^{0,78} \ln P^{0,48}}.$$

Після потенціювання отримуємо

$$\tau = \frac{2251,2q^{1,52}\tilde{A}^{0,21}}{A^{0,78}P^{0,48}}, \text{ мс.} \qquad (4.12)$$

За аналогією значення тиску ударної хвилі при використанні вогнегасної системи на основі газу $N_2$ можна визначити за залежністю

$$P = \frac{5,41q^{3,17}\tilde{A}^{0,44}}{A^{1,62}}, \text{ Па.} \qquad (4.13)$$

Для аналізу отриманих результатів розглянемо вплив складових залежностей (4.11) і (4.13) на величину тиску ударної хвилі Р.

Розглянемо вплив густини теплового потоку q на значення ударної хвилі Р за залежністю (4.11) при використанні вогнегасної системи на основі газу $CO_2$. Приймаємо межі зміни q = 6…18 кВт/м$^2$; q = 6…50 кВт/м$^2$ Визначаємо кількість точок для побудови графічних залежностей

$$N_{CO_2} = \sqrt{\frac{q_{\max}}{q_{\min}}} + 3 = \sqrt{\frac{18}{6}} + 3 \approx 5. \; N_{CO_2} = \sqrt{\frac{q_{\max}}{q_{\min}}} + 3 = \sqrt{\frac{50}{6}} + 3 \approx 6$$

Інтервал варіювання

$$I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{N_{CO_2} - 1} = \frac{18-6}{5-1} = 3 \text{ кВт/м}^2; \; I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{N_{CO_2} - 1} = \frac{50-6}{6-1} = 8,8 \text{ кВт/м}^2.$$

Тоді $q_1$ = 6 кВт/м$^2$; $q_2$ = 9 кВт/м$^2$; $q_3$ = 12 кВт/м$^2$; $q_4$ = 15 кВт/м$^2$; $q_5$ = 18 кВт/м$^2$. Результати розрахунку за залежністю (4.11) зображені на рис. 4.9.

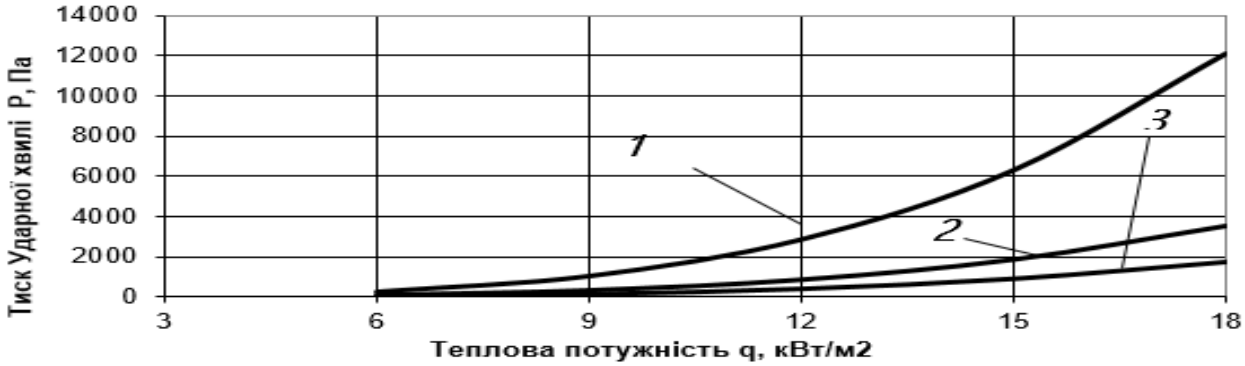



Рисунок – 4.9 Вплив потужності теплового потоку на величину тиску ударної хвилі: 1 – при Г($CO_2$) = 3,5%; А = 2,9 г/м$^3$; 2 – при Г($CO_2$) = 9,75%;

А = 7,45 г/м$^3$; 3 – при Г($CO_2$) = 16%; А = 12 г/м$^3$

За аналогією було отримано графічну залежність впливу густини теплового потоку на величину тиску ударної хвилі при її використанні на основі газу $N_2$ (рис. 4.10).

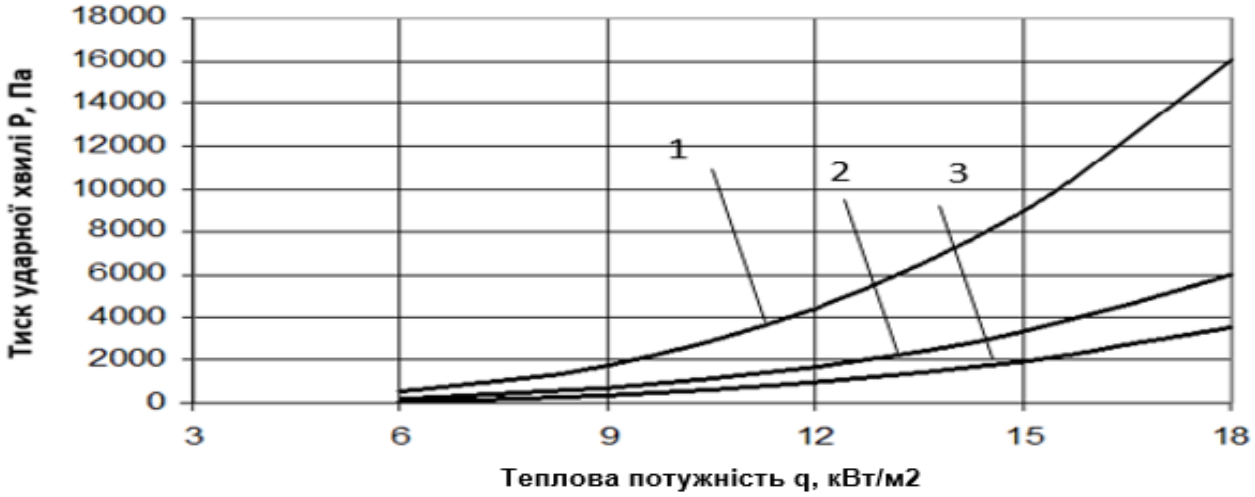



Рисунок 4.10 – Вплив теплової потужності полум'я на величину тиску вибухової хвилі: 1 – при Г($N_2$) = 3,5%; А = 2,9 г/м$^3$; 2 – при Г($N_2$) = 12,25%; А = 7,45 г/м$^3$; 3 – при Г($N_2$) = 21%; А = 12 г/м$^3$

Для випадку q = 6…50 кВт/м$^2$: $q_1$ = 8,8 кВт/м$^2$; $q_2$ = 17,6 кВт/м$^2$; $q_3$ = 26,4 кВт/м$^2$; $q_4$ = 32,5 кВт/м$^2$; $q_5$ = 41,2 кВт/м$^2$; $q_6$ = 50 кВт/м$^2$. Результати розрахунку за залежністю (4.11) зображені на рис. 4.11.

$$P_1 = \frac{1{,}59 q^{3{,}56} \tilde{A}^{0{,}29}}{A^{1{,}62}} = q^{3{,}56} \cdot 0{,}41;\ P_2 = q^{3{,}56} \cdot 0{,}12;\ P_3 = q^{3{,}56} \cdot 0{,}06.$$

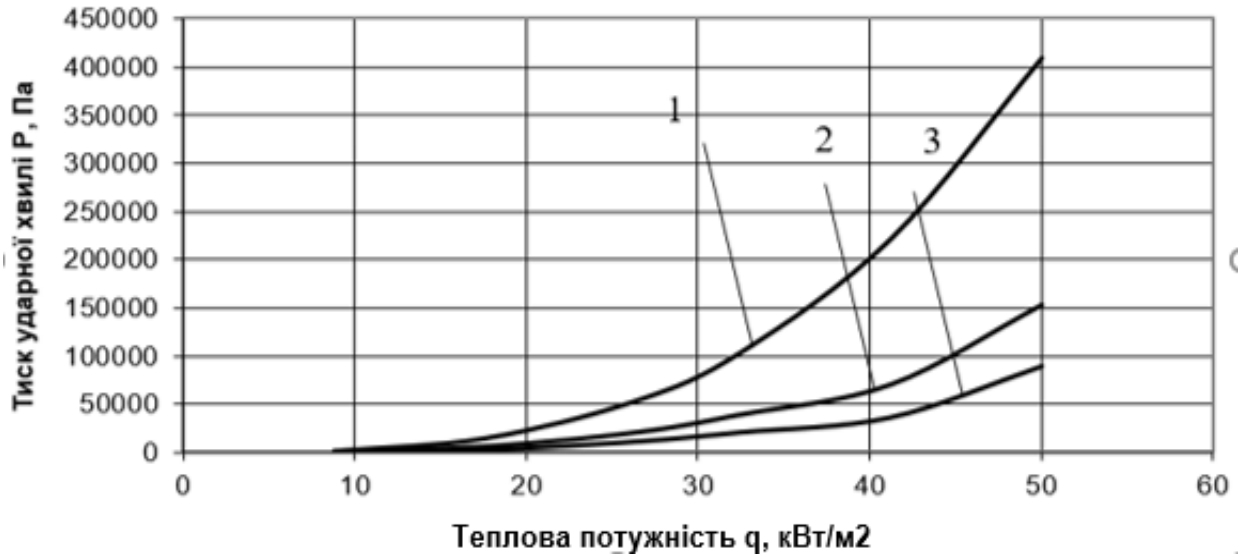



Рисунок 4.11 – Вплив теплової потужності полум'я на величину тиску ударної хвилі: 1 – при $\Gamma(CO_2) = 3{,}5\%$; $A = 2{,}9$ г/м$^3$;
2 – при $\Gamma(CO_2) = 9{,}75\%$;$A = 7{,}45$ г/м$^3$;
3 – при $\Gamma(CO_2) = 16\%$; $A = 12$ г/м$^3$

За аналогією було отримано графічну залежність впливу густини теплового потоку на величину тиску ударної хвилі при використанні в її основі газу $N_2$ (рис 4.3).

$$P = \frac{5{,}41 q^{3{,}17} \tilde{A}^{0{,}44}}{A^{1{,}62}}.$$

Визначаємо кількість результатів для побудови графічної залежності

$$N_{N_2} = \sqrt{\frac{q_{\max}}{q_{\min}}} + 3 = \sqrt{\frac{50}{6}} + 3 \approx 6.$$

Визначаємо значення інтервалу

$$I = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{N_{CO_2} - 1} = \frac{50 - 6}{6 - 1} = 8{,}8 \text{ кВт/м}^2.$$

Будуємо три графічні залежності 1 – при $\Gamma(N_2) = 3{,}5\%$, $A = 2{,}9$ г/м$^3$; 2 – при $\Gamma(N_2) = 12{,}25\%$, $A = 7{,}45$ г/м$^3$; 3 – при $\Gamma(N_2) = 21\%$, $A = 12$ г/м$^3$.

Розрахунки для кожної графічної залежності виконуємо з використанням залежності (4.13), які приводимо до виду

$$P_1 = \frac{5,41q^{3,17}\tilde{A}^{0,44}}{A^{1,62}} = q^{3,17} \cdot 1,68;\ P_2 = q^{3,17} \cdot 0,63;\ P_3 = q^{3,17} \cdot 0,37.$$

Результати розрахунків зображені на рис. 4.12.

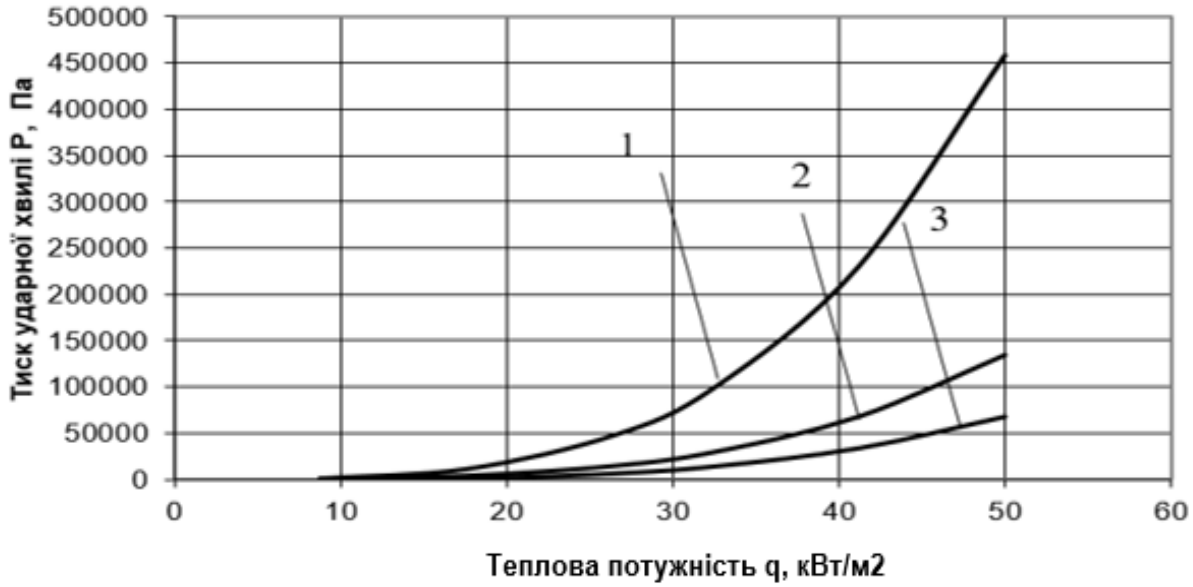



Рисунок 4.12 – Вплив теплової потужності полум'я на величину тиску ударної хвилі: 1 – при $\Gamma(N_2)$ = 3,5%; A = 2,9 г/м$^3$; 2 – при $\Gamma(N_2)$ = 12,25%; A = 7,45 г/м$^3$; 3 – при $\Gamma(N_2)$ = 21%; A = 12 г/м$^3$

Визначаємо густину теплового потоку від факела полум'я за залежністю [340]

$$q = \frac{\sigma(T_ô^4 - Ò_o^4)}{\frac{1}{À_ô} + \frac{1}{À_o} - 1 + \frac{3\bar{\alpha}\tilde{o}}{4}},\ \text{Вт/м}^2$$

де σ = 5,7·10$^{-8}$ Вт/(м$^2$K$^4$) – стала Стефана–Больцмана; $T_ф$ − температура факела, K; $T_o$ – температура середовища, K; $A_ф$ = 0,9 – ступінь чорноти факела полум'я [341]; $A_o$ = 0,6 – ступінь чорноти об'єкта, на який передається тепловий потік [341]; $\bar{\alpha}$ - осереднений за спектром коефіцієнт поглинання середовища (за даними роботи [342] $\bar{\alpha}$ = 0,45/$l_c$, де $l_c$ – найбільша товщина шару середовища між факелом полум'я і об'єктом, на

який передається тепловий потік, м); x – дійсна відстань між факелом полум'я і об'єктом, м.

Після підстановки даних, отримуємо

$$q = \frac{5,7 \cdot 10^{-8}(893^4 - 293^4)}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,6} - 1 + \frac{3\frac{0,45}{1,75}1,75}{4}} = 16900 Âò / ì^2$$

Отже q = 16,9 кВт/м$^2$.

Площа проекції факела $S_ф$ при його ширині 0,04 м і висоті 0,12 м дорівнює $S_ф$ = 0,0024 м$^2$. Тоді теплова потужність факела буде Q = 16,9·0,0024 = 0,06 кВт.

Відповідно до закону Ньютона-Рихмана кількість тепла q, яка віддається одиницею поверхні тіла за одиницю часу, пропорційна різниці температур поверхні тіла, наприклад, $T_Ф$ і навколишнього середовища $T_0$. В цьому випадку густину теплового потоку можна визначити з використанням залежності

$$q = \alpha(T_ф - T_0),$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі при горінні факела, Вт/м$^2$К (α = 25 Вт/м$^2$К [343]).

Тоді

$$q = 25(893 - 293) = 15000 \text{ Вт/м}^2.$$

Отже q = 15 кВт/м$^2$.

Для подальших розрахунків приймаємо Q = 0,06 кВт. При використані ударної хвилі в комбінації з $CO_2$ та відстані між факелом і системою для вибуху L = 1,75 м, а сила тиску була при різних концентраціях $CO_2$ в межах 1900…11000 Па. В цьому випадку площа дії ударної хвилі складала 0,7 м$^2$. Тоді сила дії ударної хвилі на факел була в межах 1330…7700 Н.

Виходячи з цього положення бачимо що для руйнування і гасіння факела необхідно співвідношення між потужністю ударної хвилі та його

руйнування і тепловою потужністю k = 22167…128333 Н/кВт, або 31667…163332 Па/кВт.

### 4.3. Визначення вогнегасної ефективності одинарних ударних хвиль

За попередньо описаною методикою були отримані результати експериментів з визначення вогнегасної ефективності ударної хвилі потужністю від 150 Па. Результати вимірювання потужностей ударних хвиль датчиком BMP-180 [236] показані на графіках (рис. 4.13.) і (рис.4.14.), а результати експерименту з визначення вогнегасної ефективності ударної хвилі вказані в таблиці 4.16.




Рисунок 4.13 – Показник тиску ударної хвилі потужністю 215 Па, час (τ≈250 мс)

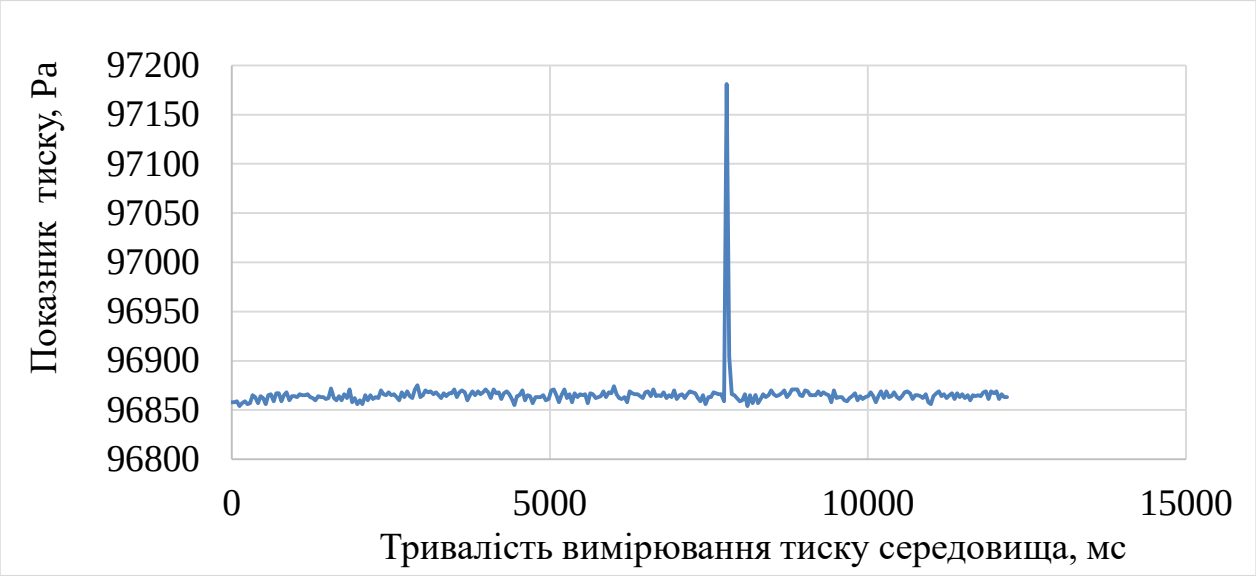



Рисунок 4.14 – Показник тиску ударної хвилі потужністю 316 Па, час (τ≈200 мс)

Як зазначалося вище, моменти, які підтверджували вогнегасну ефективність, а також перехідні стани нестабільності були зафіксовані камерою Nikon1 j4 з частотою 1200 кадрів в секунду. Відповідно було зафіксовано моменти нестабільності полум'я при тиску УХ - 190 Па (рис. 4.15), моменти гасіння одинарною ударною хвилею потужністю УХ в 215 Па (рис. 4.16), і потужністю 316 Па (рис. 4.17). Інтенсивність випромінювання полум’я для зазначеного тигля становила 4 кВт/ м$^2$.

Таблиця 4.16

Вогнегасна ефективність УХ при впливі ударної хвилі потужністю від 100 Па до 215 Па на відстані 1,75 м під час гасіння n-гептану $C_7H_{16}$

| № | Р Па | Результат |
|---|---|---|
| 1 | 100 | Без змін |
| 2 | 130 | Невелика турбулізація полум'я. |
| 3 | 160 | Турбулізація, частковий відрив полум'я. |
| 4 | 190 | Турбулізація, крайня нестабільність, відрив полум'я. (рис. 4.15) |
| 5 | 215 | Фрагментація, гасіння полум'я через відрив (рис. 4.16) |

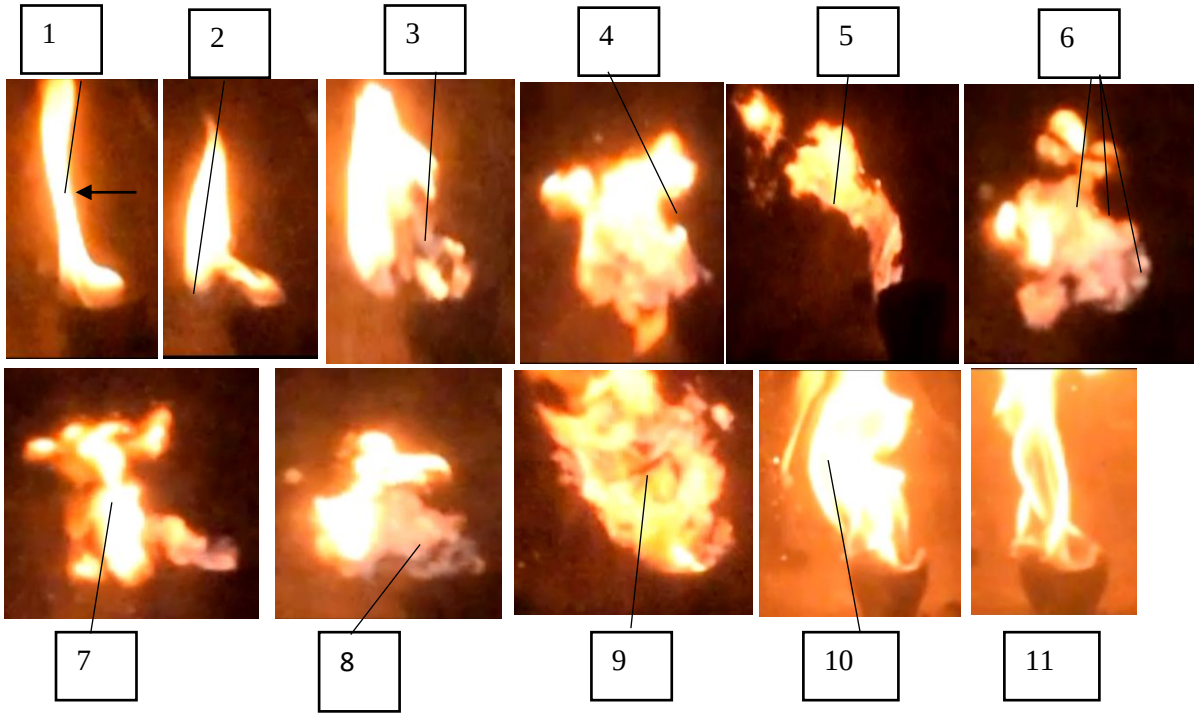



Рисунок 4.15 – Розкадрування моменту впливу на полум'я ударної хвилі P = 190 Па, час (τ ≈ 800 мс): Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі. F=4 кВт/м$^2$.

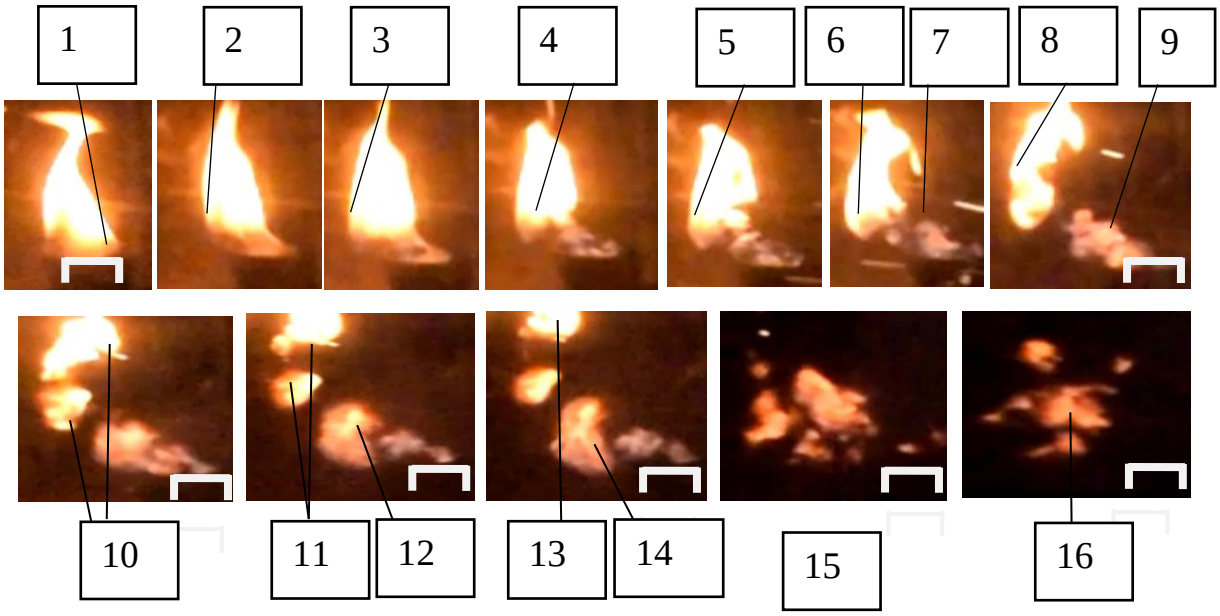



Рисунок 4.16 – Розкадрування процесу гасіння полум’я n-гептана потужністю 4 кВт/м$^2$ ударною хвилею з тиском P = 215 Па: Тривалість гасіння (τ ≈ 350 мс). Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі

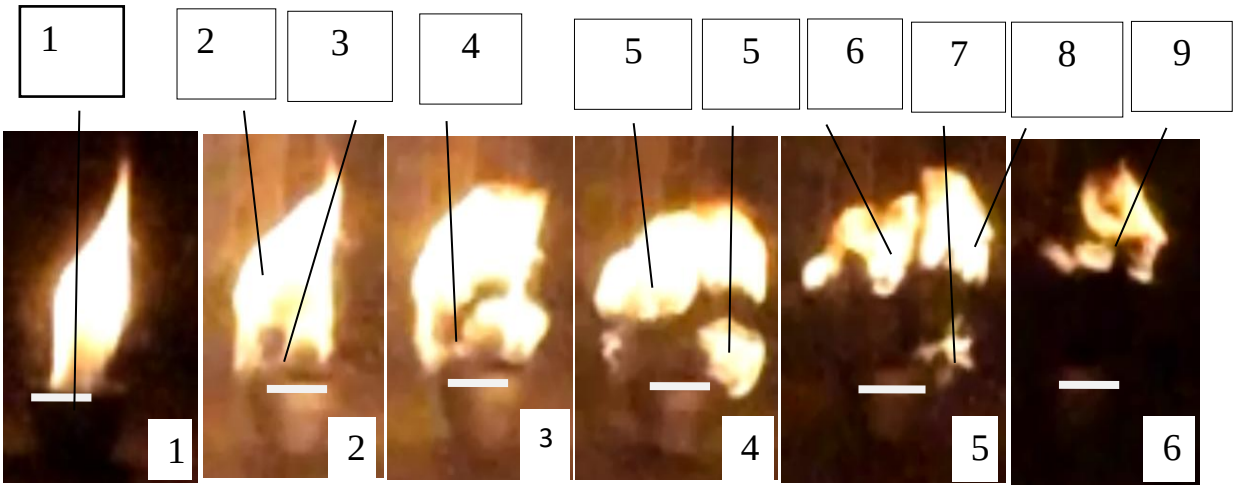



Рисунок 4.17 – Розкадрування моменту гасіння полум'я n-гептану $C_7H_{16}$ ударною хвилею P = 316 Па. Час гасіння (τ ≈ 300 мс): Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі. F=4 кВт/м$^2$

Результати експерименту показали, що в діапазоні потужностей УХ від 100 до 160 Па полум'я відчуває певний вплив, що призводить до його незначної нестабільності, але не гасіння. При цьому полум'я турбулізується, збільшується в об'ємі, іноді трохи відривається, але до фрагментації, після якої відбувалося б гасіння, не доходить. Після цього полум'я стабілізується. Так при дії ударної хвилі з тиском у фронті близько 190 Па, час турбулізації полум'я дорівнював близько 800 мс. При розкадруванні, показаному на рисунку 4.15, можна помітити етапи проходження УХ через полум'я і його стан при цьому. Так на рисунку 4.15 (п. 1) показаний контакт фронту УХ з полум'ям. Стрілкою вказано місце розташування тигля, більшою стрілкою напрямок руху ударної хвилі, видно характерну дугу підходу УХ до полум'я (час τ близько 5 мс); рис. 4.15 (п. 2) – видимий зсув полум'я від поверхні на цілий корпус тигля τ =25 мм; рис. 4.15 (п. 3) – початок відриву, стрілкою вказана зона відриву полум'я яка розтягується і збільшується в розмірах τ =42 мс; рис. 4.15 (п. 4) – частковий відрив і чітка турбулізація полум'я; рис. 4.15 (п. 5) – подовження полум'я, часткова фрагментація; рис. 4.15 (п. 6) – збільшення обсягу, турбулізація і фрагментація полум'я, зниження температури на окремих ділянках – зміна кольору. рис. 4.15 (п. 6-7) – збільшений об'єм,

турбулізація, фрагментація; рис. 4.15 (п. 10,11) – повернення полум'я в стабільний стан τ =800 мс. Як видно на початковому етапі взаємодії з УХ, полум'я проходить декілька характерних етапів, які можуть призвести до гасіння на початковій стадії при достатній потужності УХ. Але якщо потужності УХ не вистачає – істотного відриву полум'я від поверхні горючої рідини не буде, і полум'я переходить у нестабільний стан, в якому перебуває близько секунди, і повертається у стабільний стан.

Наступна серія дослідів була проведена з УХ більшої потужності – 215 Па, вплив якої призвів до гасіння полум'я. При впливі ударної хвилі тиском близько 215 Па гасіння відбувалося таким чином рис. 4.16 (п. а) Початок впливу УХ на полум'я, стрілкою вказано місце тигля, більшою стрілкою напрямок руху ударної хвилі; рис 4.16 (п. 2) – стрілкою вказано крайню точку зміщення полум'я при контакті з фронтом УХ; рис. 4.16 (п. 3) – подальше зміщення і частковий відрив полум'я; рис. 4.16 (п. 4) – відрив полум'я на розмір полум'я від тигля. Стрілкою вказано крайню точку зсуву; рис. 4.16 (п. 5) – відрив полум'я. Стрілкою вказано крайню точку від тигля; рис. 4.16 (п. 7). Відрив і початок фрагментації полум'я; рис. 4.16 (п. 7) – повний відрив полум'я. Початок фрагментації рис. 6.8 (п. 7) – поділ полум'я на 3 частини; рис. 4.16 (п. 11-13) – подальша фрагментація на більш дрібні частини; рис. 4.16 (п. 14-16) – розсіювання частин полум'я, гасіння.

У разі гасіння ударної хвилею тиском близько 215 Па процес можна поділити на 3 умовні етапи. Перший етап включає в себе вплив зони з надлишковим тиском на полум'я, ефект від якого видно на рис. 4.16 (п. 2-8). При цьому відбувається відрив полум'я і утворення зони нагрітих газів і продуктів горіння між полум'ям і поверхнею тигля, що можна побачити по «сліду», відірваного полум'я, який, судячи з кольору газу, має меншу температуру. При цьому в процесі відриву полум'я цей «слід» стає більш довгим, і паралельно відрив, в ньому відбувається з догоранням горючої

суміші, що видно на рис. 4.16 (п. 11-14). Далі йде етап, на якому на полум'я діє зона релаксації, під дією якої полум'я розтягується і фрагментується (рис. 4.16, п. 10-14). При цьому чітко помітно утворення трьох окремих об'єктів полум'я ( рис. 4.16, п. 11,12), а також (4.16, п. 13,14). Після проходження УХ утворені фрагменти полум'я догоряють, розсіюються і гаснуть (рис. 4.16, п. 15,16).

При подальшому збільшенні потужності УХ процес гасіння відбувається трохи швидше за дещо іншим механізмом. Процес гасіння УХ потужністю близько 316 Па показаний на рис. 4.17. Як бачимо, при проходженні УХ через полум'я n-гептану, воно трохи зсувається від краю тигля – і вже починає фрагментуватися (час отримання кадру 20 мс) (рис. 4.17, п. б і в), далі йде подальша фрагментація полум'я і його поділ на окремі об'єкти (п. г-е). Далі полум'я чітко фрагментується на 3 фрагмента, які ще більше відриваються від краю тигля і розлітаються в різні сторони (рис. 4.17, п. 6-9). Після фрагментації полум'я гасне (рис. 4.17, п. 10).

Таким чином, на підставі проведених досліджень вогнегасної ефективності УХ випливає, що вогнегасна ефективність ударної хвилі в умовах випробувальної камери досить висока, як і теоретично було спрогнозовано і обґрунтовано. Експеримент показав, що дія ударної хвилі потужністю близько $\Delta P = 215$ Па (+35 Па) на полум'я n-гептану призводить до гасіння через видимий відрив і фрагментацію полум'я, а тиск в 316 Па призводить до більш ефективного гасіння і вже відразу після незначного відриву відбувається фрагментація.

В результаті розтягування полум'я в зоні горіння при проходженні УХ значно знижується адіабатна температура горіння. Таким чином, якщо температура горіння знизиться до 1000 $C^o$ то процес горіння припиниться, що цілком ймовірно при впливі УХ на полум'я і на простір навколо нього.

Зрозуміло, що дія ударної хвилі виведе газову суміш за межі стехіометричної концентрації, а й за межі області займання, відповідно

збільшиться обсяг надлишкових компонентів реакції, які не прореагували, що підтверджується кадрами, на яких видно зміну кольору полум'я (рис. 4.17, п. 6, 8, 12, 14), що відповідно призведе до різкого зниження тепловиділення полум'я і, як наслідок, температури горіння, і в результаті до гасіння ударною хвилею, що підтверджується в роботах [344 - 346].

Існує велика ймовірність того, що в основному вогнегасний ефект ударної хвилі полягає в динамічному впливі газового середовища на полум'я. Аналогічний приклад – це вплив на полум'я вітру зі швидкістю 2 м/с: полум'я відхиляється на 45°, при цьому значно збільшується коефіцієнт захоплення повітря [118], який може призвести до різкого охолодження і відриву полум'я завдяки зменшенню швидкості згоряння. Подібні умови відтворюються при проходженні ударної хвилі через полум'я, але швидкість проходження ударної хвилі набагато більше, ніж 2 м/с і становить  залежно від вибухової речовини, значення більше ніж швидкість звуку – 340 м/с  (1 М) в 3 і більше разів. Зрозуміло, що різниця між ударною хвилею і подувом вітру полягає в потужності і швидкості впливу на полум'я. Дія ударної хвилі, як і бокового вітру, призведе до дестабілізації полум'я в просторі і втрати ним своєї відповідної структури. При впливі ударної хвилі в момент її проходження через полум'я може відбутися його часткова турбулізація. А при турбулізації, як відомо [118], відбувається захоплення ще великих газових обсягів, які оточують полум'я, що призведе до досягнення більш нестабільного стану, коли полум'я може відірватися. Виходячи з цього, очевидно, що ударна хвиля призведе до ефекту гасіння лише за умови відповідної потужності, вектора впливу, забезпечуючи відрив полум'я і, відповідно, подальше його гасіння. Але в цьому випадку можливе подальше відновлення горіння через повторне займання від бортів резервуара  або нагрітих конструкцій.

Таким чином, для визначення ефективності гасіння запропонованим методом необхідно визначити безпечні і водночас ефективні з точки зору

гасіння потужності ударних хвиль. Виходячи з цього, діапазон досліджуваних тисків був визначений враховуючи безпечні потужності ударних хвиль, які не можуть призвести до значних руйнувань конструкцій і травматичних впливів на людину, що становить відповідно до 500 Па, а це 1/10 від безпечного тиску для людини [347].

Також зазначений діапазон тиску ударної хвилі підтверджується аналізом подібних досліджень, але з акустичним впливом на полум'я. Так в роботі [264] зазначено, що горіння дифузійного полум'я припиняється при мінімальному звуковому тиску близько 35-45 Па, але при цьому не зазначений час впливу, при якому горіння припинялося.

Таким чином з результатів експерименту видно, що використання ударних хвиль для гасіння є досить ефективним, але при цьому вони повинні володіти достатньою потужністю, щоб забезпечити ефект гасіння. Виходячи з результатів теоретичного аналізу проведеного в розділі 3, підвищення вогнегасної ефективності повинні забезпечити серії ударних хвиль, дію котрих експериментально показано в наступному підрозділі.

### 4.4. Визначення вогнегасної ефективності серій ударних хвиль

З метою визначення вогнегасної ефективності серій ударних хвиль та їх потужності та частоти впливу на дифузійне полум’я n-гептану $C_7H_{16}$ (ДПГ), було проведено серію експериментів з різними значеннями потужності та частоти впливу ударних хвиль за попередньо наведеною методикою. Спочатку було проведено визначення вогнегасної здатності серій з 3-х ударних хвиль тиском УХ Р = 175 Па (рис.4.18).




Рисунок 4.18 – Тиск окремої УХ в серії з трьох УХ (Р≈ 175 Па )

Результати експерименту (4.19) показали, що при збільшенні частоти впливу серії з 3-х ударних хвиль на дифузійне полум'я n-гептану до 8-12 Гц, гасіння відбувається при зниженні тиску одинарної УХ до 175 Па.

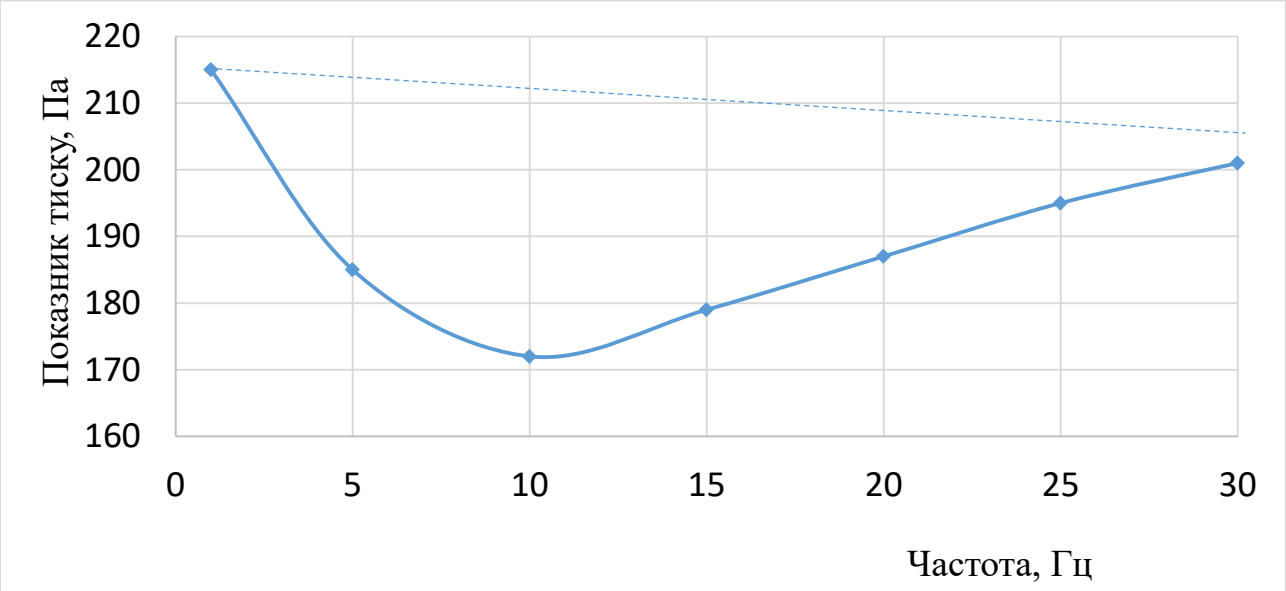


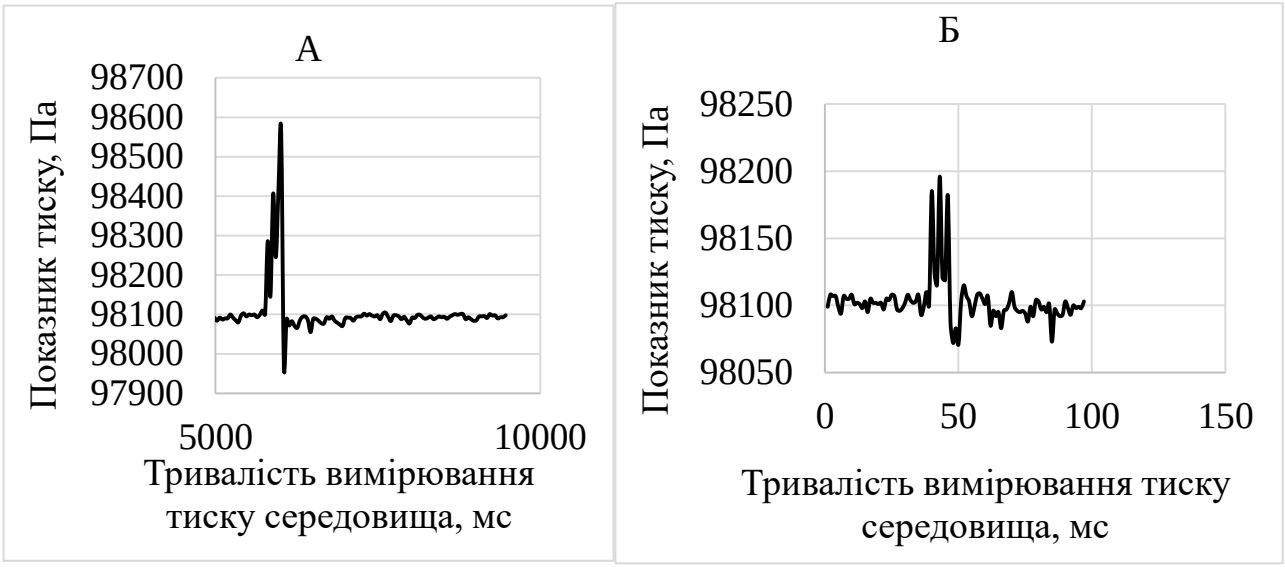

Рисунок 4.19 – Залежність вогнегасної ефективності УХ від їх частоти та потужності

Як видно з результатів експерименту (рис. 4.19), збільшення частоти дії УХ на полум'я приводить до зменшення потужності окремої ударної хвилі в серії.

Збільшення частоти УХ до 10 Гц дає змогу зменшити тиск у фронті одинарної УХ до 172 Па. Подальше збільшення частоти впливу УХ на ДПГ не приводить до зменшення тиску в фронті УХ. При проходженні серій УХ з високою частотою відбувається збільшення їх кінцевого тиску внаслідок їх накладення в просторі біля стінки. Так при частоті в 20 Гц кінцевий тиск біля стінки камери в результаті збільшується до 560 Па, що видно з графіка за результатами експерименту на (рис. 4.20, п. а). Вплив на полум'я серій УХ забезпечує їх накладення з отриманням кінцевого тиску значно вищого за первинний тиск одинарної хвилі, що стверджує автор [240], який вказує, що пропускання через газ потужних ударних хвиль одна за одною приводить до збільшення тиску до 4 разів. При дії на полум'я серії 3 УХ з частотою 10 Гц та тиском біля 200 Па збільшення тиску майже не відбувається, що також видно графіка (рис. 4.20, п. б).

Як видно з графіка (рис. 4.20, п. 1) кінцевий тиск після 3-ї хвилі не відрізняється від тиску одинарної ударної хвилі. При цьому гасіння полум'я відбувається ймовірно від збільшення тривалості часу впливу на нього надлишкової фази який становить в сумі до 300 мс. Після 1 ударної хвилі полум'я відривається встигає фрагментуватись і не повертається у вихідне положення. Після цього фрагменти полум'я догорають, а потім проходять ще 2 УХ, які остаточно його гасять. Щодо тривалості дії надлишкової фази тиску у фронті УХ на полум'я, то автори роботи [316] вказують, що збільшення тривалості фази надлишкового тиску дає змогу гасити більші розміри полум'я, але при цьому автори застосовували значно потужніші заряди вибухової речовини.

Таким чином, для гасіння полум'я в зазначеному тиглі будуть оптимальними значення тиску УХ в діапазоні від 170 Па до 180 Па, при




частоті впливу УХ в діапазоні від 8 до 12 Гц.

Рисунок 4.20 – Збільшення тиску при проходженні серії з трьох УХ з частотою 20 Гц та вихідною потужністю одинарної УХ ≈ 175Па (А – 20 Гц. Б – 10 Гц)

Для виявлення особливостей гасіння серій УХ при визначених частотах на ДПГ було зафіксовано та проведено розкадрування процесу гасіння ДПГ при значеннях частоти УХ в 10 Гц, (рис. 4.21 ) та 20 Гц (рис. 4.22).

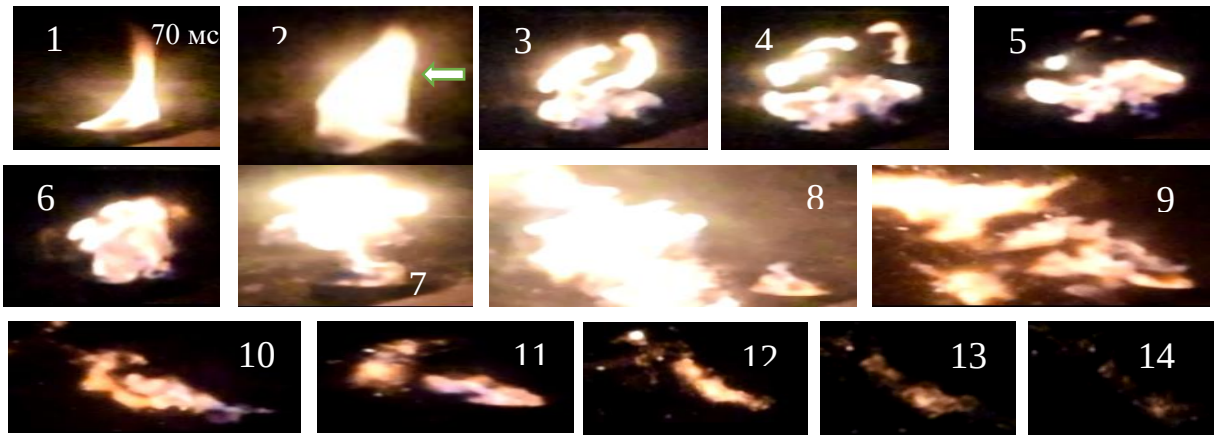



Рисунок 4.21 – Розкадрування процесу гасіння дифузійного полум'я гептану серіями по 3 ударні хвилі з частотою 10 Гц

Як видно з розкадрування, вплив серії УХ на ДПГ приводить до значної турбулізації полум'я, що видно на рис.4.21. (п. 3-12). При дії на полум'я першої УХ (4.21, п. 2 - 6) відбувається значне збільшення розмірів полум'я, його фрагментація під дією УХ та відрив від зрізу тигля. Наступна УХ (рис. 4.21, п. 7-9) приводить до змішення відірваного полум'я від тигля в протилежну сторону від напрямку УХ. При цьому видно, що полум'я відхиляється під кутом приблизно $45^{o}$ від тигля. Фрагментація при цьому посилюється, полум'я починає згасати, оскільки в зону горіння не надходить горюча пара n-гептану. Остання – третя УХ (рис.4.21, п. 12) завершує процес гасіння ДПГ повністю фрагментуючи та гасячи невеликий фрагмент полум'я, який залишився після дії 2-ї УХ. Час гасіння серією з 3-х УХ становить приблизно 320 мс, що в порівнянні з дією одинарної УХ, але більшої потужності УХ [348] є більший на 70 мс. Таким чином, дія на ДПГ серії з 3-х УХ потужністю близько 170 Па приводить до гасіння ДПГ після проходження 3-ї УХ внаслідок відриву та фрагментації полум'я. На рис. 4.20 було показано кінцевий тиск УХ близько 195 Па та частотою 20 Гц. Результати розкадрування впливу УХ з частотою 20 Гц на полум'я показані на рис. 4.22. При цьому тигель з n-гептаном був встановлений безпосередньо біля стінки камери.

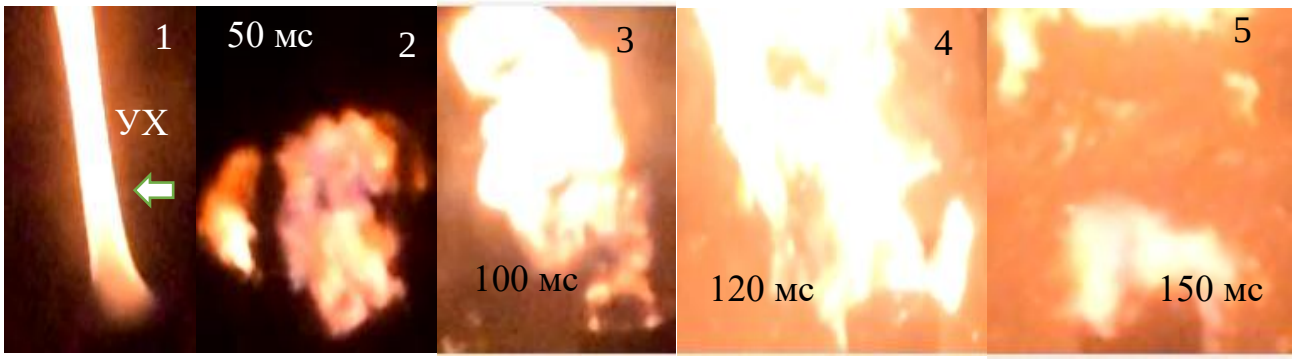



Рисунок 4.22 – Розкадрування дії серії 3 ударних хвиль з частотою 20 Гц на дифузійне полум'я n-гептана

Як видно з рис. 4.22, при проходженні УХ з частотою 20 Гц процес відриву полум'я відбувається так само (п. 2), але до остаточного гасіння це не приводить, оскільки після відриву полум'я значно турбулізується та збільшується в розмірах. Як видно з розкадрування, розміри полум'я після проходження 2-ї УХ (п. 4) значно збільшуються, що триває до 150 мс, коли проходить остання ударна хвиля (п. 5). При цьому вигоряння горючої суміші відбувається не повністю, полум'я продовжує існувати, але дія УХ закінчується.

Таким чином, гасіння серіями 3-х УХ з частотою 20 Гц та зазначеним тиском є менш ефективним, ймовірно внаслідок короткого часу впливу та недостатнього часу на вигорання фрагментів полумя в повітрі після дії серії з 3-х УХ на ДПГ. Експериментально встановлено, що дія серій з 3-х ударних хвиль з тиском в фронті близько 172 Па при частоті 8 - 15 Гц має найвищу вогнегасну ефективність в умовах експериментальної камери.

### 4.5. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем одинарних ударних хвиль та вогнегасних газів

Для підтвердження попередньо теоретично обґрунтованого підвищення вогнегасної ефективності газів $CO_2$ і $N_2$ під дією ударної хвилі, за основу були взяті експериментальні дані вогнегасної здатності одинарної УХ. Виходячи з результатів експерименту з гасіння дифузійного n-гептанового полум'я самою УХ, було проведено експериментальне визначення вогнегасної ефективності газів $CO_2$ і $N_2$ при впливі на полум'я ударною хвилею в їх середовищі. Спочатку визначали вогнегасну ефективність комбінованих систем, ударна хвиля – $CO_2$ або $N_2$ при значеннях тиску у фронті УХ приблизно 125 Па (рис.4.23) і 180 Па (рис. 4.24). Поведінка полум'я при впливі на нього УХ з тиском 125 Па 180 Па залежно від зміни концентрації $CO_2$ і $N_2$ показана в таблицях 4.17 і 4.18, а

на графіках (рис. 4.25, 4.26) показана залежність вогнегасної концентрації $CO_2$ і $N_2$ від потужності УХ.




Рисунок 4.23 – Ударна хвиля з надлишковим тиском 125 Па




Рисунок 4.24 – Ударна хвиля з надлишковим тиском 180 Па

Таблиця 4.17

Вплив ударної хвилі потужністю в 125 і 180 Па на вогнегасну ефективність $CO_2$ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану $C_7H_{16}$

| № | % $CO_2$ Р = 125 Па | Результат впливу УХ | % $CO_2$ Р = 180 Па | Результат впливу УХ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 14 | Нестабільність полум'я | 3 | Нестабільність полум'я |
| 2 | 16 | Частковий відрив полум'я | 6 | Частковий відрив полум'я |
| 3 | 20,3 | Гасіння відривом | 8,2 | Гасіння відривом |
| 4 | 21,2 | Миттєве гасіння | 10,2 | Миттєве гасіння |

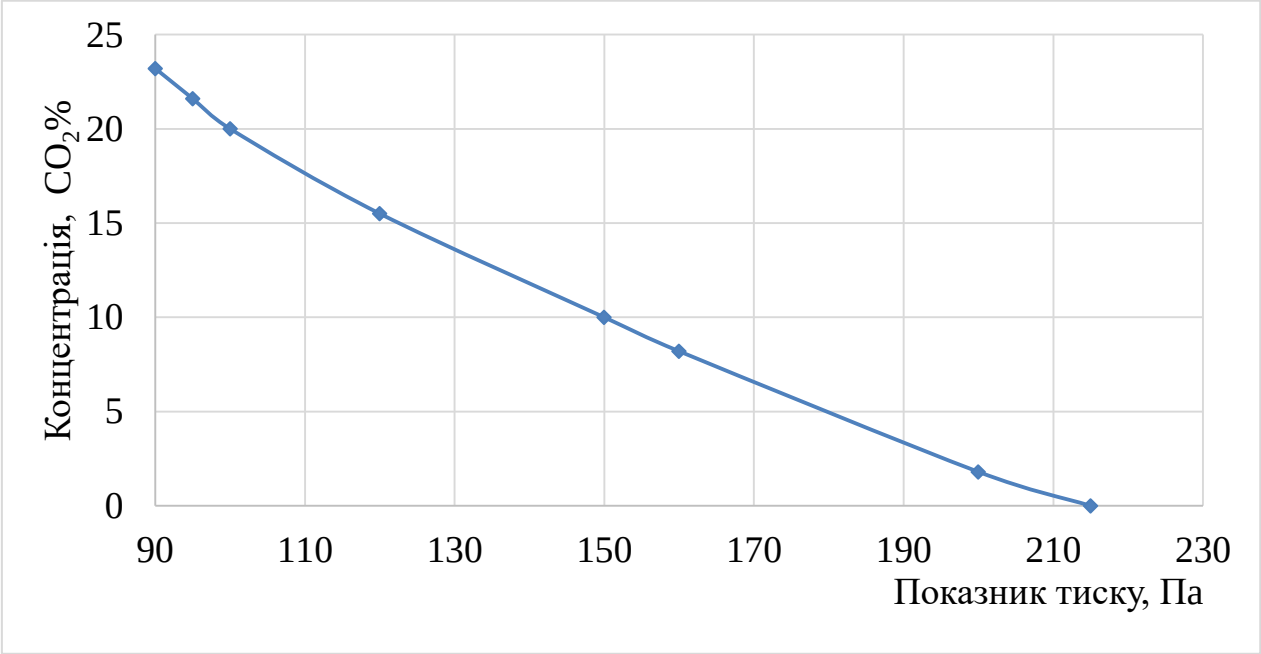



Рисунок 4.25 – Залежність вогнегасної концентрації $CO_2$ для n-гептану ($C_7H_{16}$) від потужності ударної хвилі (Па)

Таблиця 4.18

Вплив ударної хвилі потужністю в 125 і 180 Па на вогнегасну ефективність $N_2$ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану $C_7H_{16}$

| № | % $N_2$ Р = 125 Па | Результат впливу УХ | % $N_2$ Р = 180 Па | Результат впливу УХ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 24 | Нестабільність полум’я | 12 | Нестабільність полум’я |
| 2 | 26 | Частковий відрив полум’я | 14 | Частковий відрив полум’я |
| 3 | 28 | Гасіння відривом | 15,4 | Гасіння відривом |
| 4 | 30,2 | Миттєве гасіння | 18 | Миттєве гасіння |

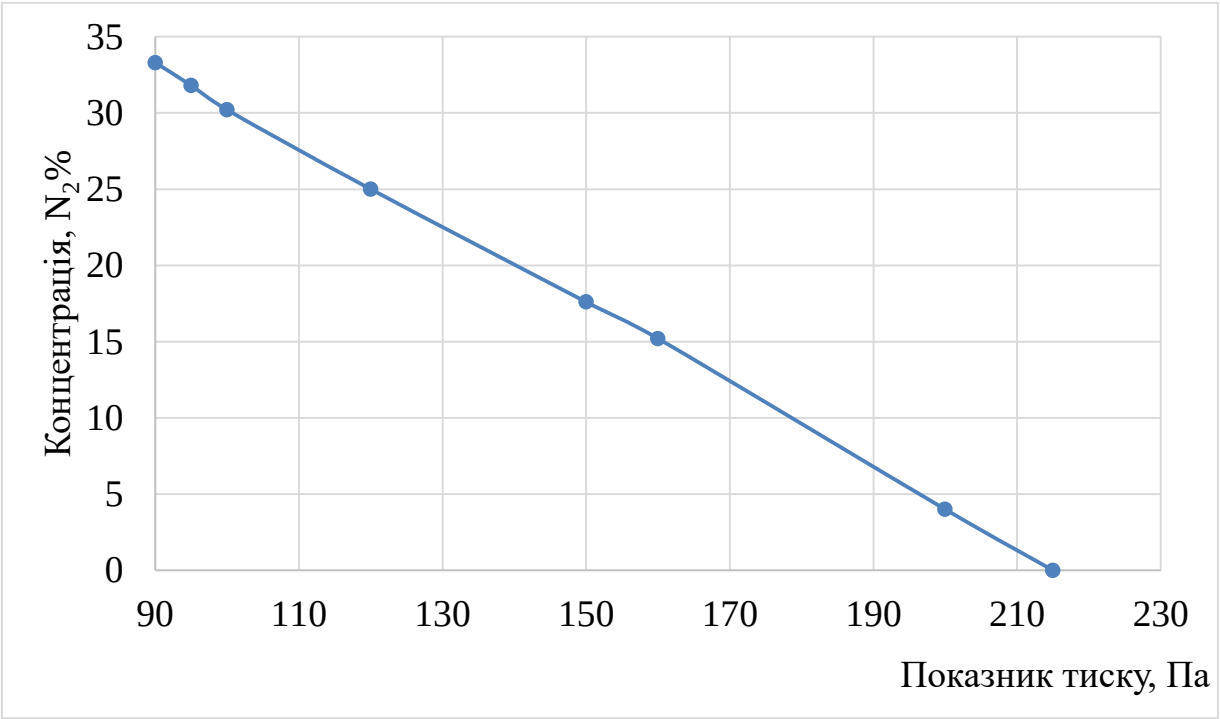



Рисунок 4.26 – Залежність вогнегасної концентрації $N_2$ для n-гептану ($C_7H_{16}$) від потужності ударної хвилі

Процес гасіння полум'я фіксували за допомогою камери Nikon 1 J4. Відеофіксація дозволяє визначити особливості поведінки полум'я в момент його гасіння при дії на нього УХ в зазначених умовах. На рис. 4.27 показано розкадрування етапів гасіння дифузійного полум'я $CO_2$ при дії полум'я n-гептану УХ з тиском у фронті 180 Па.

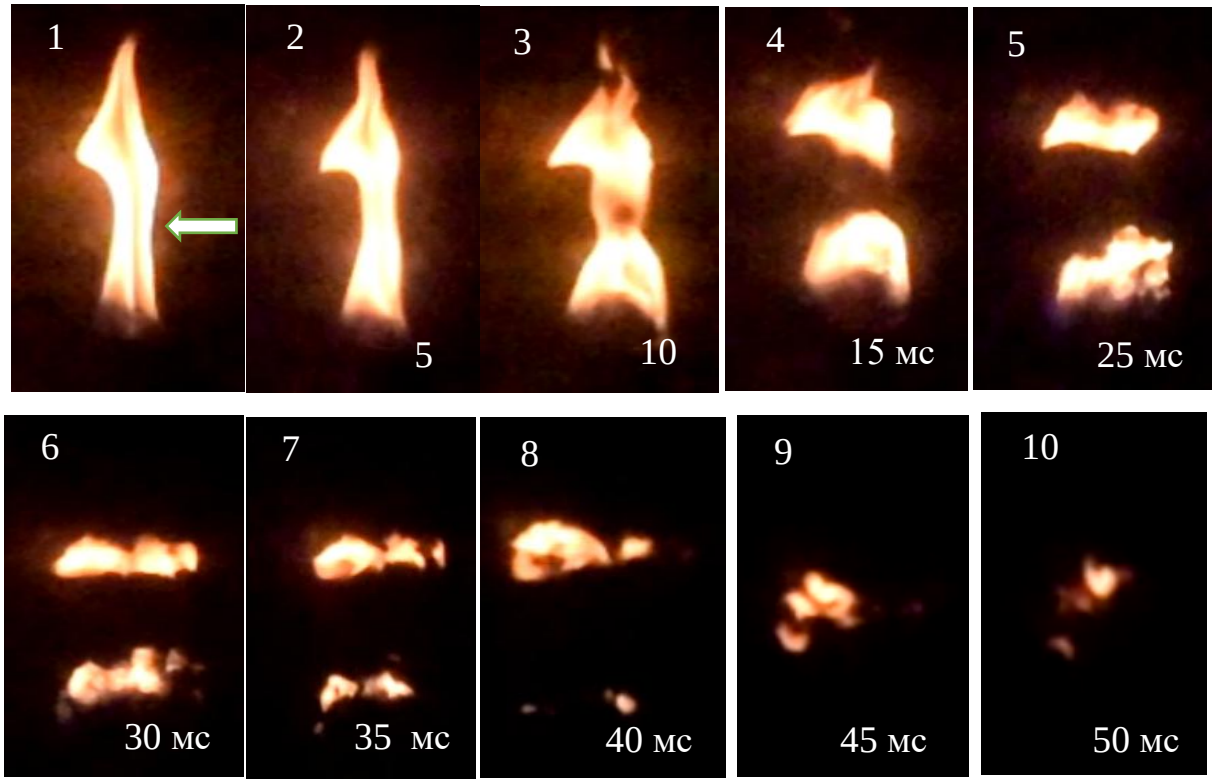



Рисунок 4.27 – Розкадрування у часі моменту гасіння дифузійного полум'я n-гептану ударною хвилею з потужністю P = 180 Па і концентрацією $CO_2$ = 8.2%, Час гасіння ≈ 50 мс: Стрілкою вказано напрямок ударної хвилі

Таким чином з таблиць 4.17. і 4.18. видно, що вогнегасна дія ударної хвилі з тиском у фронті в 125 Па забезпечує гасіння полум'я n-гептану при 20,3% $CO_2$ і 30,2% $N_2$. При збільшенні потужності ударної хвилі до 180 Па відбувається зменшення вогнегасної концентрації $CO_2$ до 8,2 %, а $N_2$ - до 15,4 % [349]. Для підтвердження висунутих вище припущень про дії комбінованої системи УХ + вогнегасний газ, на полум'я, було проаналізовано розкадрування процесу гасіння при дії УХ з тиском 180 Па

і газами $CO_2$ і $N_2$ на дифузійне полум'я n-гептану. При розкадруванні гасіння $CO_2$ (рис. 4.27) було виявлено, що гасіння полум'я УХ відбувається при тиску в 180 Па за 50 мс, що менше в 7 разів ніж при гасінні самою лише УХ (≈350 мс) без газу. При цьому при порівнянні рисунків видно, що полум'я у всіх випадках за наявності $CO_2$ фрагментується на 2 великі частини (рис. 4.27, п. 4 - 6), які пізніше теж незначно фрагментуються (рис. 4.27, п. 7 - 8), зменшуються в розмірах (рис. 4.27, п. 9 - 10) і гаснуть. Відмінністю у гасінні УХ з добавкою газу є те, що при гасінні УХ з $CO_2$ або $N_2$, і самої УХ, фрагментація в останньому випадку виявляється більшою, оскільки полум'я ділиться на кілька частин, що можна побачити на рисунку 4.16, п. 14 – 16. Крім цього, як видно з рис. 4.27, при гасінні з наявністю газу, (рис. 4.27, п. 2 – 8), полум'я майже не зміщується від рівня тигля, не нахиляється і не сильно фрагментується з нахилом, як у випадку гасіння лише самою УХ (рис. 4.27, п. 10 - 16), а відразу поділяється на дві великі частини (рис. 4.27, п. 4 - 5) і гасне на 50 мілісекунді. Далі було проведено розкадрування процесу гасіння дифузійного полум'я азотом при його концентрації 15,5% і потужності ударної хвилі в 180 Па. У випадку з азотом (рис. 4.28) процес майже повністю повторюється, полум'я так само поділяється на дві великі частини (рис. 4.28), після чого вони незначно зменшуються в розмірах, відриваються і гаснуть на 84 міллісекунді (рис. 4.28).

Виходячи з результатів експерименту, і як видно з розкадрування процесу гасіння УХ з добавкою $CO_2$ або $N_2$, час гасіння відповідно зменшується у 7 і 4,2 рази порівняно з часом гасіння самою УХ. При цьому, як видно з результатів розкадрування, час фрагментації без дії газів значно більший, і при порівнянні з комбінованим гасінням ударною хвилею і газами, у випадку з CO2 фрагментація починається на 5 мілісекунді, з N2 – на 15 мілісекунді, а в разі гасіння самою ударною хвилею помітна фрагментація полум'я починається на 100-110 мілісекунді.

Значне зменшення часу початку фрагментації при додаванні газів вказує на посилення вогнегасної дії ймовірно в результаті значного збільшення тепловіддачі у зоні горіння, збільшення щільності газового середовища у фронті ударної хвилі, введення в зону горіння інертних компонентів, які поглинають тепло.

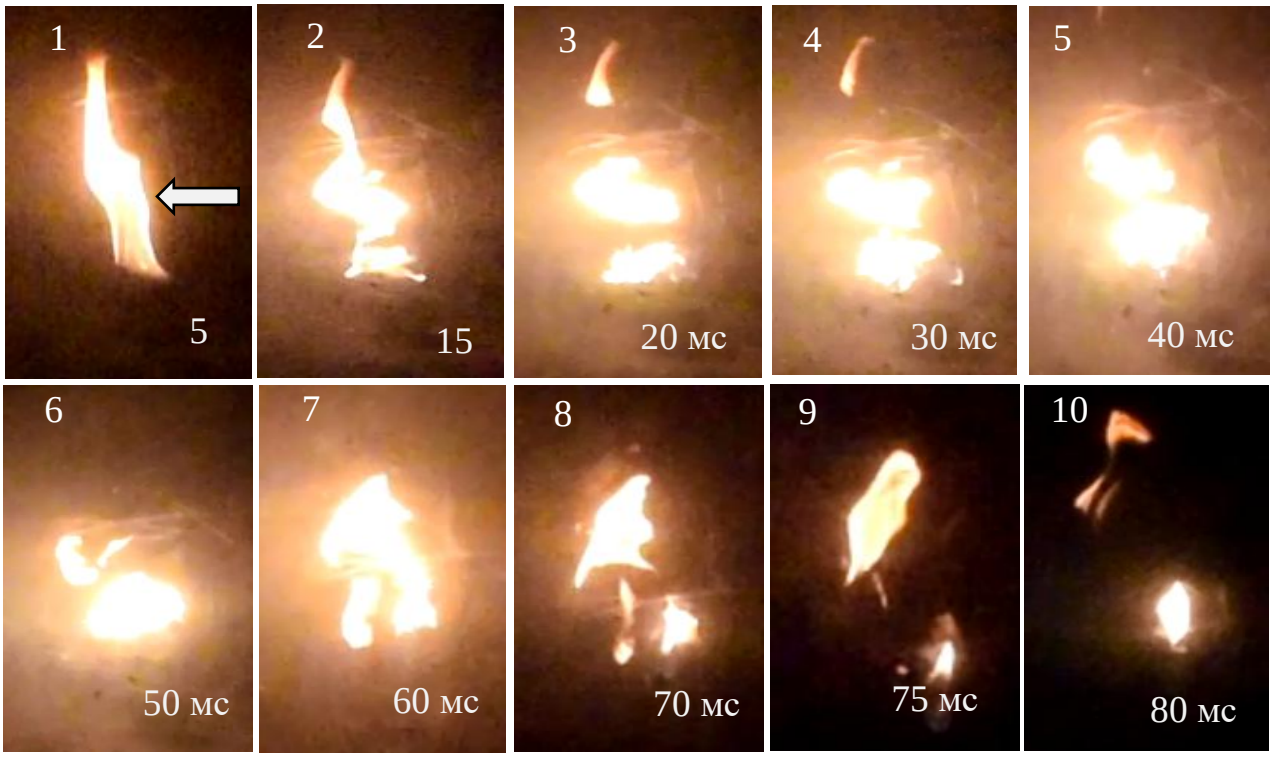



Рисунок 4.28 – Розкадрування в часі моменту гасіння дифузійного полум'я n-гептану ударною хвилею з потужністю P = 180 Па і концентрації $N_2$ = 23.4%. Час гасіння ≈ 84 мс: Стрілкою зазначений напрямок ударної хвилі

Таким чином, беручи до уваги значне зниження вогнегасної концентрації $CO_2$ і $N_2$, можна стверджувати, що підвищення вогнегасної ефективності такої комбінованої системи досягається внаслідок синергізму між вогнегасними газами і УХ. При цьому вогнегасні гази $CO_2$ і $N_2$ забезпечують додатковий вогнегасний ефект у результаті спільної дії вищеперерахованих чинників (табл. 3.4) що призводить до ймовірного значного підвищення енергії активації реакції горіння, та значного

ускладнення поширення полум'я неоднорідною газовою сумішшю, яка виникає після проходження УХ через полум'я.

Отже, ударна хвиля незначної потужності (215 Па) призведе до значного підвищення вогнегасної ефективності $CO_2$ і $N_2$ в умовах камери, при гасінні модельного вогнища горіння n-гептану в тиглі. При цьому ударні хвилі більшої потужності можуть значно підвищувати вогнегасну ефективність газових вогнегасних речовин, коли гасіння проводиться у великих масштабах, або в прихованих чи важкодоступних місцях завдяки їх відбиванню від стінок, обладнання, конструкцій, та інших перешкод, при значно нижчих концентраціях вогнегасних газів. При цьому у першу чергу, необхідно звернути увагу на те, що зниження вогнегасної концентрації газових вогнегасних речовин є прямим підтвердженням того, що дія УХ призведе до підвищення енергії активації, в основному внаслідок збільшення концентрації вогнегасного газу, який буде потрапляти в зону горіння в результаті фрагментації полум'я і створення по всьому його фронту умов для виникнення нестабільності Ріхтмаєра – Мєшкова, що призведе до фрагментації фронту горіння, його охолодження і гальмування реакції завдяки взаємопроникненню газів і їх турбулентному перемішуванню в перехідному шарі «полум'я–атмосфера». Таким чином, одночасний вплив усіх зазначених факторів значно підвищує ефективність гасіння газовими вогнегасними речовинами при впливі на полум'я ударної хвилі. Як було визначено в попередньому розділі, ударна хвиля при тиску 190 Па до гасіння не призводить, але як показали результати експерименту, при додаванні $CO_2$ або $N_2$ був встановлений факт гасіння дифузійного полум'я n-гептану навіть при незначних їх концентраціях (рис. 4.25, 4.26). При цьому значно зменшується час гасіння, і якщо порівнювати гасіння ударної хвилею з тиском в 316 Па то час гасіння навіть при цьому становив близько 300 мілісекунд. Крім того, прискорюється початок фрагментації полум'я і зменшується необхідний для гасіння тиск у фронті ударної хвилі,

при цьому зміщення полум'я не спостерігалося, як і у випадку гасіння менш потужною УХ з тиском 215 Па.

Відповідно отримані залежності, показали значне підвищення вогнегасної ефективності $CO_2$ і $N_2$ навіть при досить незначному тиску у фронті ударної хвилі.

### 4.6. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем гасіння із серій ударних хвиль та вогнегасних газів

Далі було експериментально визначено вогнегасну ефективність комбінованих вогнегасних систем - газова об'ємна вогнегасна речовина ($CO_2$, $N_2$) та серія потрійних ударних хвиль з частотою 1 - 30 Гц при гасінні дифузійного полум'я n-гептану. Результати експерименту показані на рис. 4.29 та 4.30.

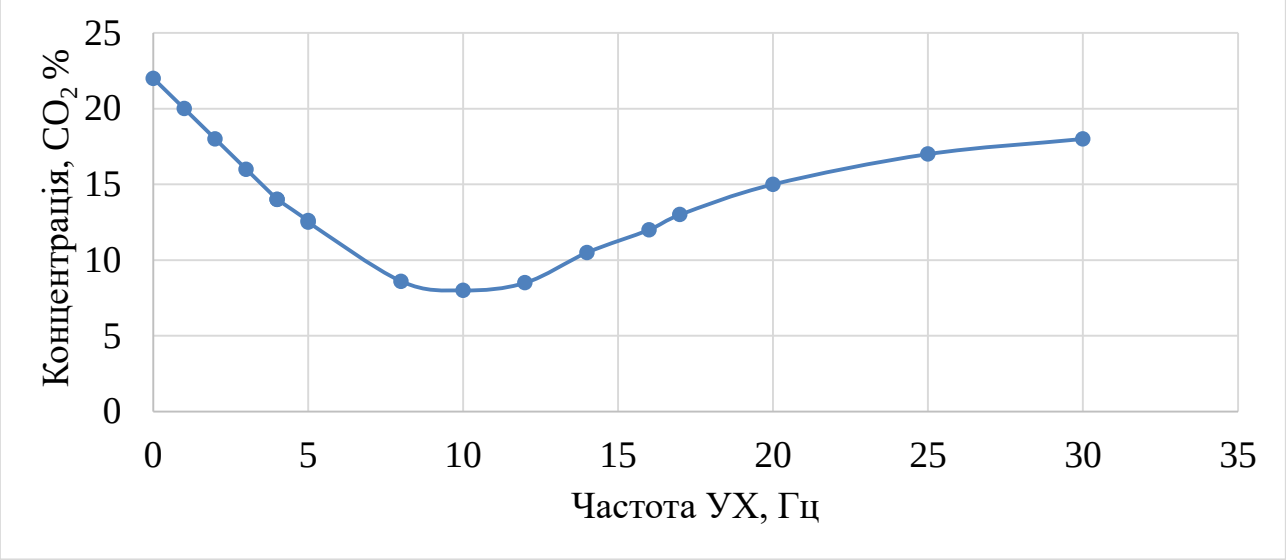



Рисунок 4.29 – Вогнегасна концентрація $CO_2$, при впливі на ДПГ ударних хвиль з різною частотою

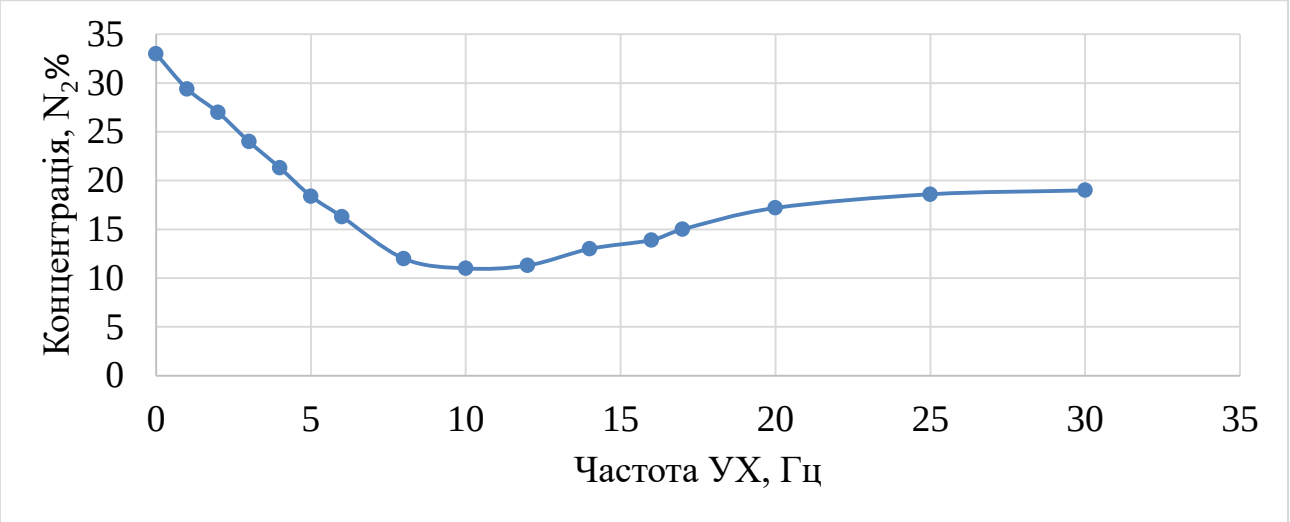



Рисунок 4.30 – Вогнегасна концентрація $N_2$, при впливі на дифузійне полум'я гептану ударних хвиль з різною частотою

Результати експериментів показали, що серії УХ значно підвищують вогнегасну ефективність газів $CO_2$ (рис. 4.29) та $N_2$ (рис. 4.30).

Як видно з результатів експерименту, при частоті УХ в діапазоні 8-12 Гц спостерігається значне зниження вогнегасної концентрації зазначених газів. Так комбінована система з параметрами (концентрація $CO_2$ - 4,8 % P(УХ) = 170 Па F(УХ) = 10 Гц) забезпечує гасіння ДПГ в тиглі з розмірами 40 на 35 мм та I = 4 кВт/м$^2$. Щодо гасіння азотом, то комбінований вплив системи з параметрами (концентрація $N_2$ - 10.2 % P(УХ) = 170 Па F(УХ) = 10 Гц також забезпечує гасіння ДПГ в зазначеному тиглі.

Таким чином, як видно з результатів експерименту, комбінована дія УХ в діапазоні частот 8-12 Гц та з тиском близько 170 Па приводить до гасіння в зазначеному тиглі. Якщо порівняти розкадрування процесу гасіння ДПГ без дії об'ємної вогнегасної речовини та з нею то чітко видно різницю в поведінці полум'я, яка полягає у зміні кольору полум'я без добавки вогнегасної речовини при значному зменшенні тиску в фронті УХ,

при якому відбувається гасіння. Синє забарвлення полум'я при дії на нього УХ вказує на більш повне змішування суміші внаслідок турбулізації полум'я при дії фронту УХ. Це збігається з твердженням авторів [350, 351], якій вказують, що акустичний вплив на полум'я, який дещо подібний до дії УХ і приводить до змін в полум'ї у вигляді його нестійкості, а також турбулізації, які на їх думку приводять до кращого перемішування горючого, і як наслідок до підвищення температури та більш повного згоряння частинок вуглецю. При дії звукового випромінювання зміна коефіцієнтів дифузії в полум'ї може досягти 31% [316]. Автори роботи [352, 353] проводили дослідження з впливу вихрового кільця УХ на дифузійне полум'я пропану. В результаті було встановлено, що ударна хвиля може ефективно гасити дифузійне полум'я пропану при швидкості в 10-40 м/с. У всіх випадках швидкість УХ падала з відстанню пройденою УХ від початкової швидкості 1.9 М вже на відстані 3 метри швидкість падає до 1,1 М .

Загалом над вивченням дії ударних хвиль при гасінні займань та зокрема лісових пожеж працювали автори робіт [257-259]. Висновком з цих робіт є те, що для гасіння необхідна потужна ударна хвиля, яка забезпечить остаточний відрив полум'я, а також те, що вплив ударної хвилі на дифузійне полум'я приводить до її збивання, але за умови недостатньої потужності ударної хвилі горіння може відновитись. На відміну від дії самої лише УХ, дія комбінованої системи може забезпечити відрив при значно менших значеннях тиску в фронті УХ та значно менших концентраціях вогнегасних газів, що видно з результатів та розкадрування на рис. 4.31, та 4.32.

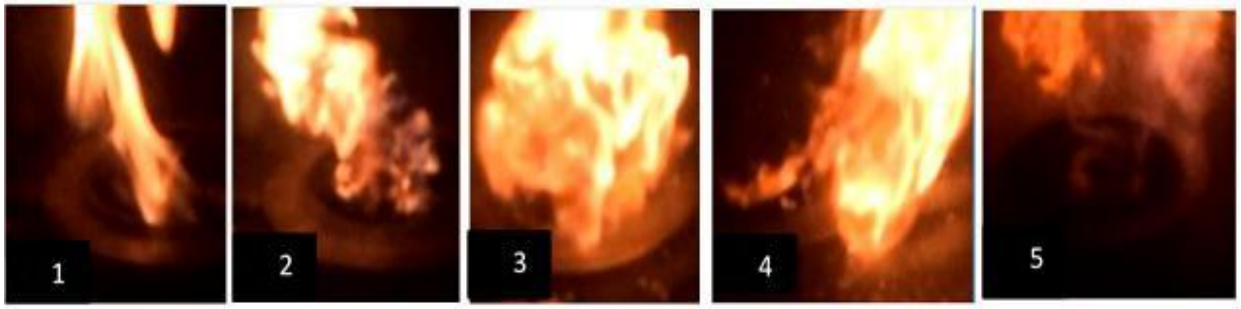



Рисунок 4.31 – Розкадрування при гасінні $CO_2$, та впливі на ДПГ ударних хвиль з частотою 10Гц

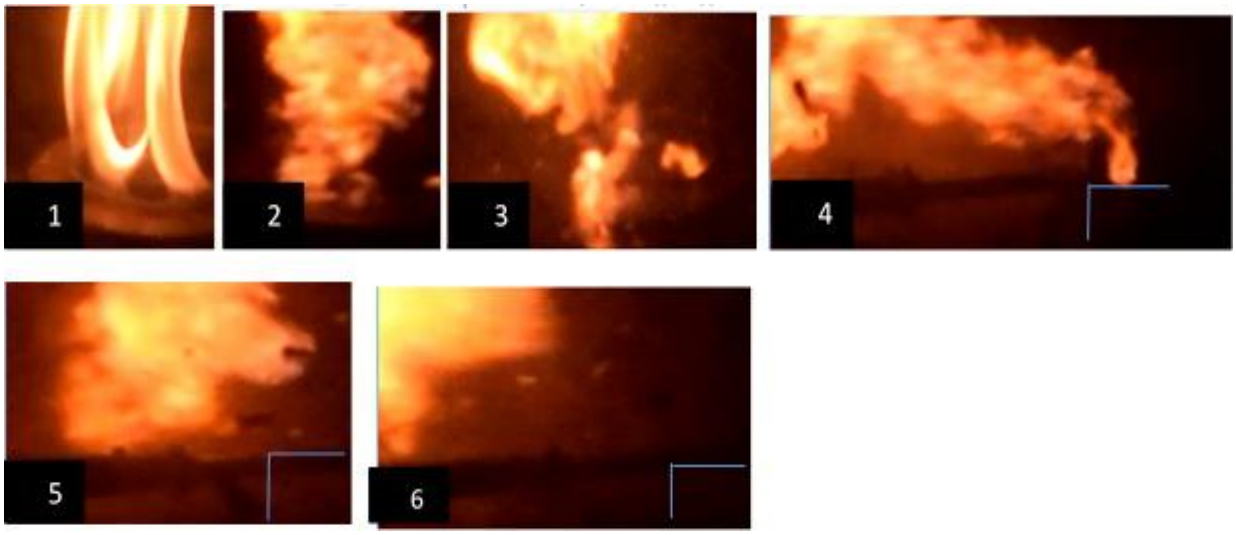



Рисунок 4.32 – Розкадрування при гасінні $N_2$, та впливі на ДПГ ударних хвиль з частотою 10 Гц

Результати розкадрування процесу гасіння комбінованою вогнегасною системою серії УХ+ОВР показали суттєві зміни в процесі гасіння при порівнянні з гасінням одинарною УХ. Так при впливі на полум'я одинарної УХ гасіння відбувається без значного відхилення полум'я в протилежний бік від дії УХ. При гасінні ж серією УХ полум'я сильно турбулізується, відхиляється спочатку в протилежний бік від дії УХ (рис. 4.32, п. 3.) потім в іншу сторону (п. 4) після проходження останньої УХ, після цього дещо відривається та загасає (п. 5). У випадку з азотом полум'я ще сильніше турбулізується (рис. 4.32, п. 2-4), значно збільшується в об'ємі, пізніше під дією УХ відривається, значно розтягується (п. 4.) та загасає під дією останньої 3-ї УХ (п. 6.). При цьому

полум’я було загашене у всіх випадках, як видно з розкадрування (рис. 4.31) за таким самим механізмом який описаний в роботах [345, 354]. При цьому відбувався відрив, фрагментація полум’я і подальше гасіння ДПГ. При дії на ДПГ комбінованої системи УХ+ОВР отримували значно вищий вогнегасний ефект завдяки синергізму між ОВР та УХ, про що свідчить зменшення як концентрації вогнегасних газів, так і потужності УХ при збільшенні частоти серії УХ. При цьому вогнегасна концентрація об’ємної вогнегасної речовини значно зменшується, як видно з графіків на рис. 4.29 та 4.30.

Виходячи з результатів експериментів можна сказати, що комбінована дія на дифузійне полум’я газової вогнегасної речовини та ударних хвиль з частотою близько 10 Гц приведе до значного кінцевого вогнегасного ефекту внаслідок синергізму між ударною хвилею та об’ємною вогнегасною речовиною. Спільна дія УХ та газів забезпечує реалізацію таких основних вогнегасних факторів впливу на дифузійне полум’я: розбавлення зони горіння газами розчинниками; змінення концентрації реагуючих компонентів в зоні горіння і внаслідок цього - зменшення швидкості поширення полум’я по горючій гомогенній суміші, що приводить до значно легшого відриву полум’я від осередку горіння. Виходячи з результатів експерименту можна стверджувати що гасіння серіями 3-х УХ з збільшенням частоти до 30 Гц з зазначеним тиском є менш ефективним, ймовірно внаслідок значно меншої тривалості надлишкового впливу серій з 3-х УХ на ДПГ.

Таким чином виявлений діапазон ефективних частот впливу УХ на полум’я комбінованої системи, який лежить в межах 8-15 Гц, що видно з графіків на рисунках 4.29 та 4.30. Вогнегасна концентрація газів при цьому становить для $CO_2$ – від 22% до 7,5% та для азоту – від 33.5% до 12,5 %.

### 4.7. Визначення вогнегасної ефективності комбінованих систем на основі ударних хвиль та бінарних сумішей вогнегасного аерозолю та вогнегасних газів $CO_2$, $N_2$

У зв’язку з очікуваним підвищенням вогнегасної ефективності було збільшено розмір експериментального тигля. Спочатку була визначена вогнегасна ефективність УХ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану (ДПГ) з тепловою потужністю випромінювання 14 кВт/м$^2$ (діаметр тигля 100 мм). Для цього була використана попередньо описана методика і встановлено, що вогнегасний тиск у фронті УХ при цьому становить 335 Па. Далі встановлено вплив УХ на вогнегасну ефективність бінарних газоаерозольних газових систем при гасінні ідентичного тигля з n-гептаном. Для визначення вогнегасної ефективності тернарної системи, що складається з вогнегасного аерозолю, газів ($CO_2$ або $N_2$) і УХ, була спочатку визначена вогнегасна ефективність аерозолю, отриманого з АУС на основі ідітолу при дії 1 УХ. Значення тиску одинарної УХ показано на графіку (рис. 4.33). Теплову інтенсивність випромінювання визначали приладом ПТП-01 на відстані 150 мм і отримали значення для тигля з діаметром 30 мм теплове випромінювання в 4 кВт/м$^2$, в 60 мм – 10 кВт/м$^2$ і для тигля 100 мм – 18 кВт/м$^2$ [355].




Рисунок 4.33 – Тиск одинарної ударної хвилі

Результати експерименту з визначення вогнегасної дії одинарної УХ та аерозолю показані на графіку (рис.4.34) а з серією з 3-х УХ та частотою 10 Гц – на графіку (рис.4.35). Експеримент з визначення вогнегасної ефективності проводили таким чином: брали відповідну масу АУС, спалювали її в обсязі камери, перемішували вентилятором газ і аерозоль для рівномірного їх розподілу, і задіювали генератор УХ пропускаючи при цьому одну або кілька УХ з відповідною частотою.

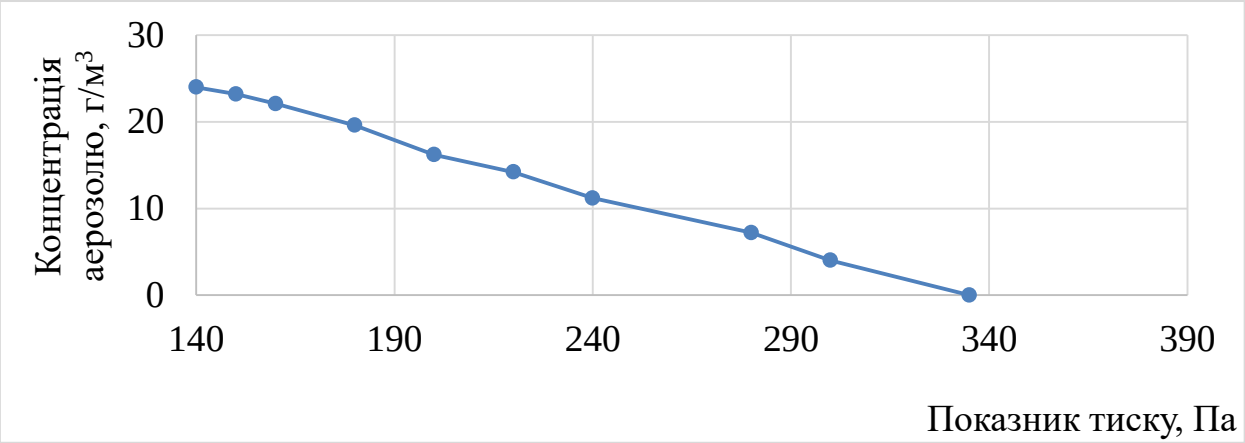



Рисунок 4.34 – Залежність вогнегасної ефективності аерозолю від потужності одинарної ударної хвилі

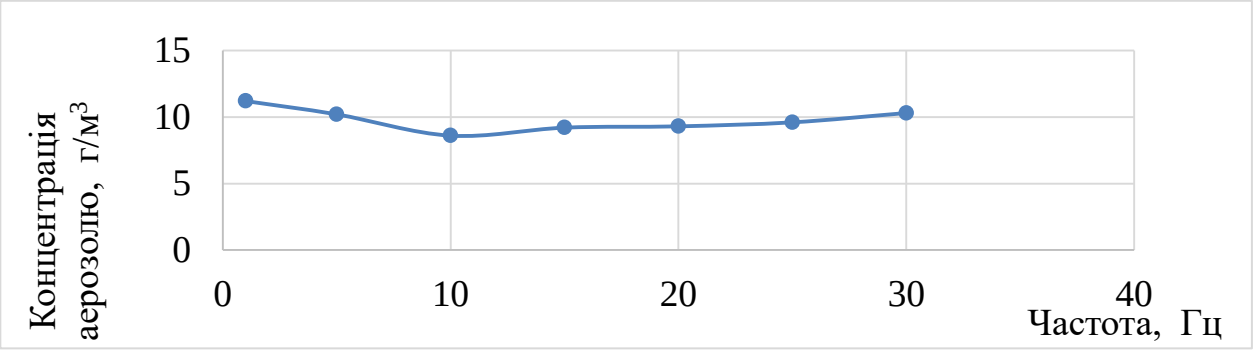



Рисунок 4.35 – Залежність вогнегасної ефективності аерозолю від частоти впливу ударної хвилі (серії по 3 УХ)

Як видно з рис. 4.34, при впливі на ДПГ 1 ударної хвилі вогнегасна концентрація аерозолю значно знижується. При збільшенні тиску УХ вогнегасна концентрація аерозолю падає і при досягненні 240 Па

зменшується до 11,2 г/м$^3$. При застосуванні серії УХ максимальне зниження вогнегасної концентрації відбувається при частоті УХ в 10 Гц (рис. 4.35). При цьому зниження вогнегасної концентрації триває до 33%. Ці результати збігаються з результатами робіт [355, 356]. Відомо [356-359], що сам аерозоль має досить високу вогнегасну концентрацією, завдяки малим розмірам (до 50 мкм) частинок. З огляду на це УХ в аерозольному середовищі зазнає значної дисипації [251, 360]. Додавання газів до аерозолю забезпечує досягнення двох важливих цілей – збільшення вогнегасної ефективності створеної бінарної системи [251, 362] і зменшення в ній концентрації вогнегасного аерозолю, що призводить до збільшення ефективного вогнегасної відстані УХ, внаслідок зменшення дисипації. Таким чином, добавка газів до аерозолю призведе до зменшення дисипації УХ в утвореному середовищі і збільшення ефективної відстані вогнегасної дії УХ і загальної вогнегасної ефективності тернарної вогнегасної системи. Далі було проведено визначення вогнегасної ефективності потрійних систем: вогнегасний аерозоль + газ - флегматизатор ($CO_2$, $N_2$) + УХ при впливі одинарної ударної хвилі.

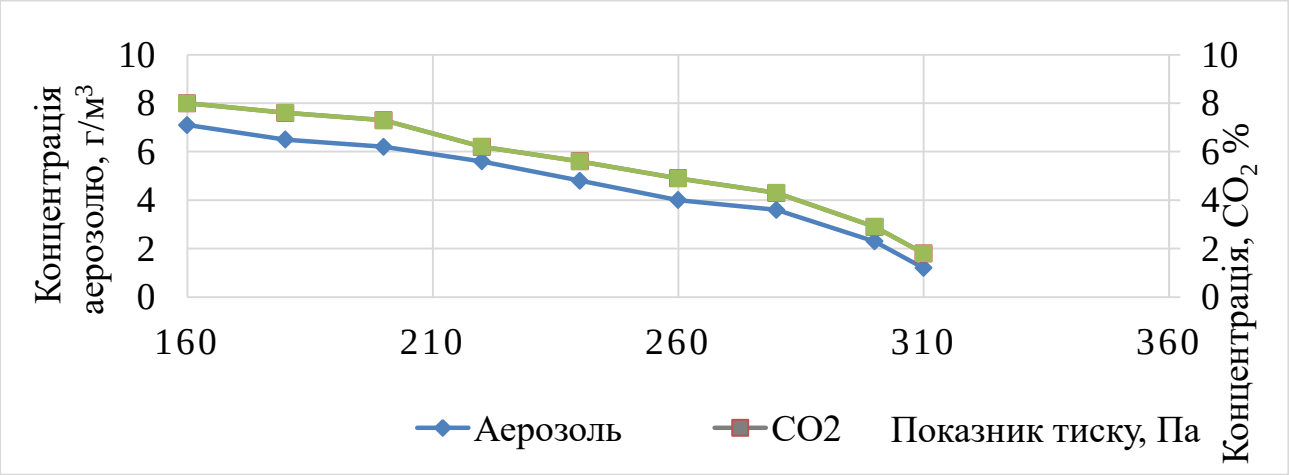



Рисунок 4.36 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші $CO_2$ і аерозолю від потужності одинарної ударної хвилі

Результати експериментів показані на рис. 6.36 і 6.37.

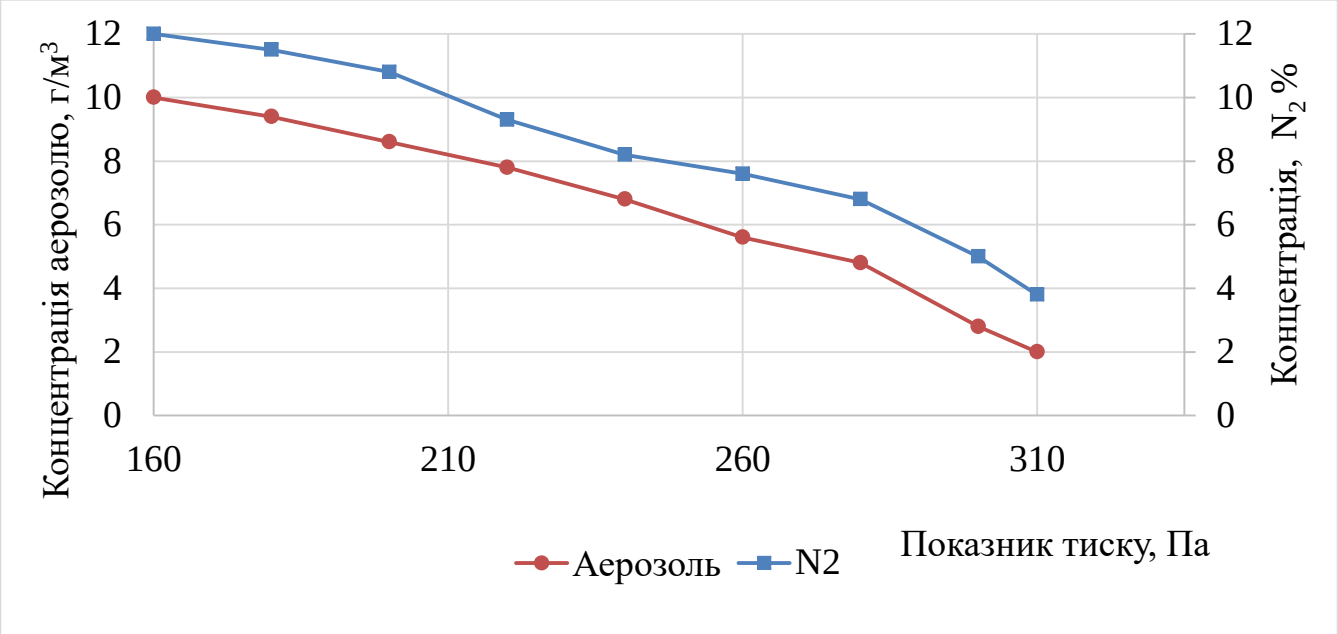



Рисунок 4.37 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші $N_2$ і аерозолю від потужності одинарної ударної хвилі

Як видно з графіків, при збільшенні тиску УХ вогнегасна концентрація аерозолю і газу $CO_2$ падає і оптимальними співвідношеннями компонентів в тернарній вогнегасній системі при тиску у фронті УХ близько 240 Па та співвідношення аерозолю – 4,8 г/м$^3$ а $CO_2$ – 5,6%. Оптимальне співвідношення приймаємо виходячи з умови, що тиск УХ в найдальшій точці забезпечить вогнегасні значення виходячи з параметрів гасіння тернарною системою вогнегасний аерозоль + газ + УХ.

Також було визначено вогнегасну ефективність бінарної суміші вогнегасного аерозолю і азоту і отримано співвідношення: аерозолю – 7,8 г/м$^3$, $N_2$ – 9,6%. З метою визначення часу і особливостей процесу гасіння було проведено розкадрування процесу гасіння (рис.4.38) тернарною вогнегасною системою при таких її параметрах: аерозолю – 4,8 г/м$^3$ і $CO_2$ – 5,6% і з тиском в 240 Па одинарної ударної хвилі. Як видно з розкадрування (рис.4.38), при гасінні зазначеної системою полум'я відривається і фрагментується вже на 40 мс (рис. 4.38, п.5), що значно

швидше, ніж в разі гасіння самою УХ, коли час гасіння становить 350 мс. При цьому, процес відриву відбувається при мінімальному тиску в 240 Па в фронті УХ, потім полум'я значно фрагментується і завдяки комбінованій дії УХ і газів загасає на 65 мс (рис. 4.38, п. 8). Рівень тигля на розкадруванні (рис.4.38.) вказано стрілкою.

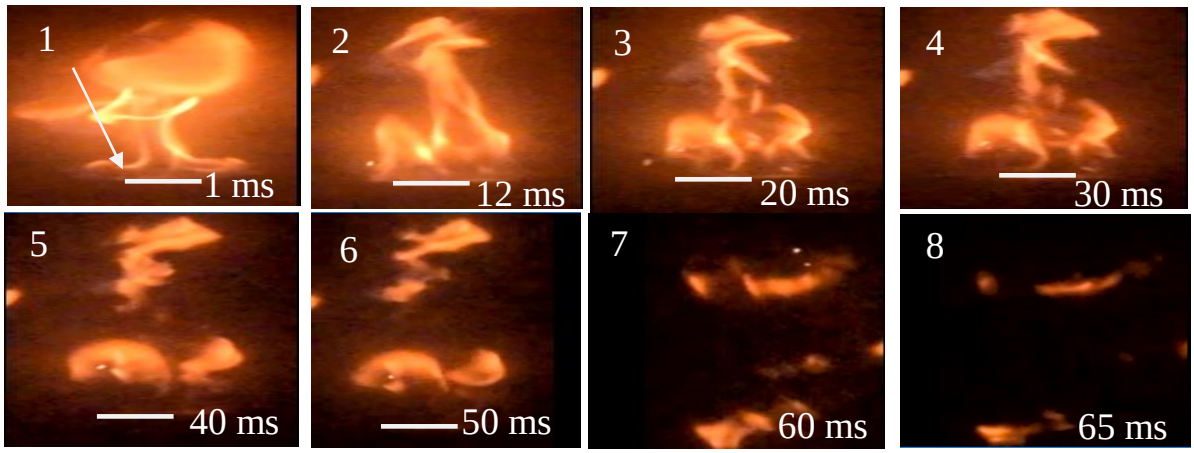



Рисунок 4.38 – Розкадрування процесу гасіння тернарною системою УХ (Р ≈ 240 Па); аерозоль - (4.8 г/м$^3$); $CO_2$ - (5.6%); Час гасіння 65 мс

Процес гасіння бінарною сумішшю з $N_2$ відбувається таким же чином, як і в випадку з $CO_2$ при дії УХ з тиском в 240 Па, при цьому полум'я також гасне внаслідок відриву і фрагментації через дії УХ. В результаті гасіння відбувається за час трохи більший, ніж при гасінні $CO_2$, і становить ≈ 94 мс.

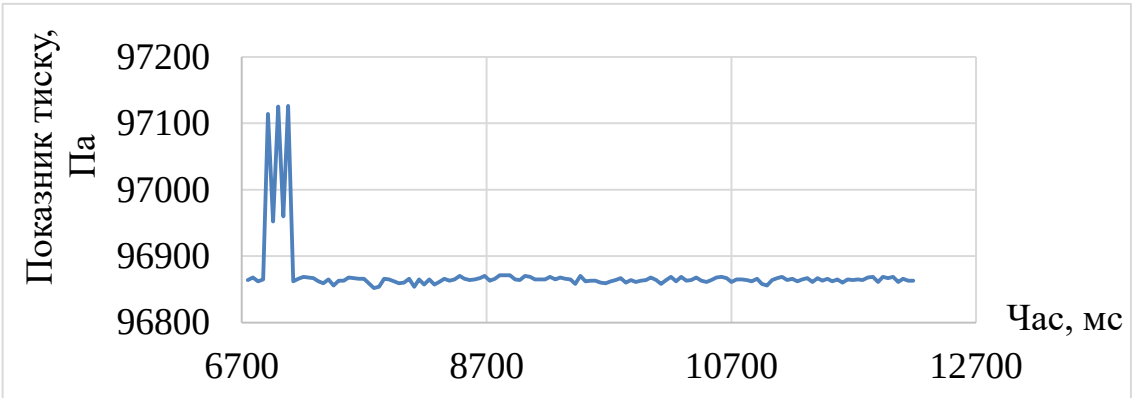



Рисунок 4.39 – Збільшення тиску при проходженні серії з 3-х УХ з частотою 10 Гц і потужністю Р ≈ 240 Па

Далі визначили вогнегасну ефективність бінарної суміші аерозолю отриманого з АУС на основі ідітолу з добавками газів $CO_2$ і $N_2$ при впливі серій УХ з частотою 10 Гц на ДПГ в газоаерозольній системі. Одне зі значень підвищення тиску в результаті дії 3-х УХ показано на графіку (рис. 4.39).

При цьому були отримані результати з вогнегасною концентрацією газів $CO_2$ і $N_2$ в зазначених умовах, які показані на графіках (рис. 4.40 та 4.41). На графіках (рис. 4.40) показана залежність вогнегасних концентрацій бінарної суміші аерозолю і $CO_2$ від частоти впливу серії 3-х ударних хвиль з Р (УХ ) ≈ 240 Па, а на графіку (рис. 4.41) показана залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолю і $N_2$ від частоти впливу серії з 3-х УХ ударних хвиль з Р (УХ) ≈ 240 Па.

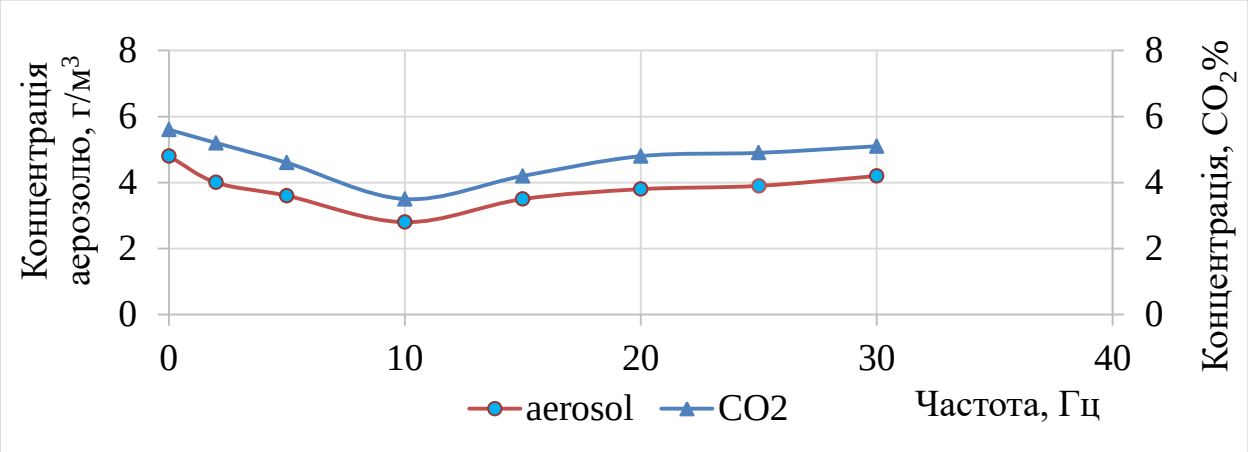



Рисунок 4.40 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолю і $CO_2$ від частоти впливу серії 3-х ударних хвиль з Р ≈ 240 Па

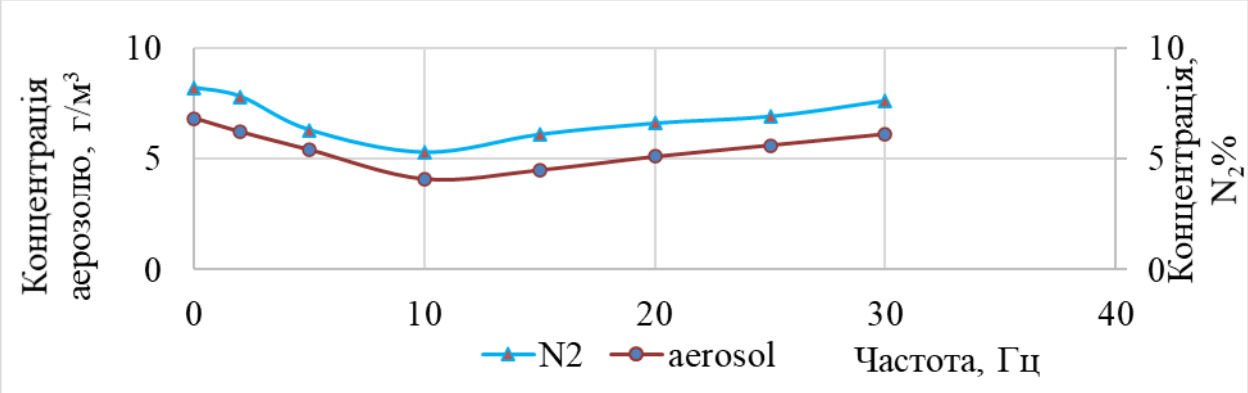


Рисунок 4.41 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолю і $N_2$ від частоти впливу серії 3-х ударних хвиль з P ≈ 240 Па

Як видно з графіків (рис 4.40 і 4.41) при частоті впливу серій УХ в 10 Гц вогнегасна концентрація компонентів бінарної газоаерозольної суміші знижується відповідно до 2,8% $CO_2$ і 3,5 г/м$^3$ аерозолю. Для азоту вогнегасні концентрації відповідно падають, для аерозолю до 4,1 г/м$^3$ і до 5,3% для $N_2$. Таким чином, при застосуванні тернарної системи: вогнегасний аерозоль + газ розчинник + дія серій УХ, у всіх випадках спостерігалося значне зменшення вогнегасних концентрацій аерозолю і газів при впливі УХ з частотою 10 Гц і тиском в 240 Па. Результати розкадрування процесу гасіння дифузійного полум'я n-гептану тернарною системою аерозолю, $CO_2$ і серіями УХ при частоті 10 Гц, показані на розкадруванні на рис.4.42.

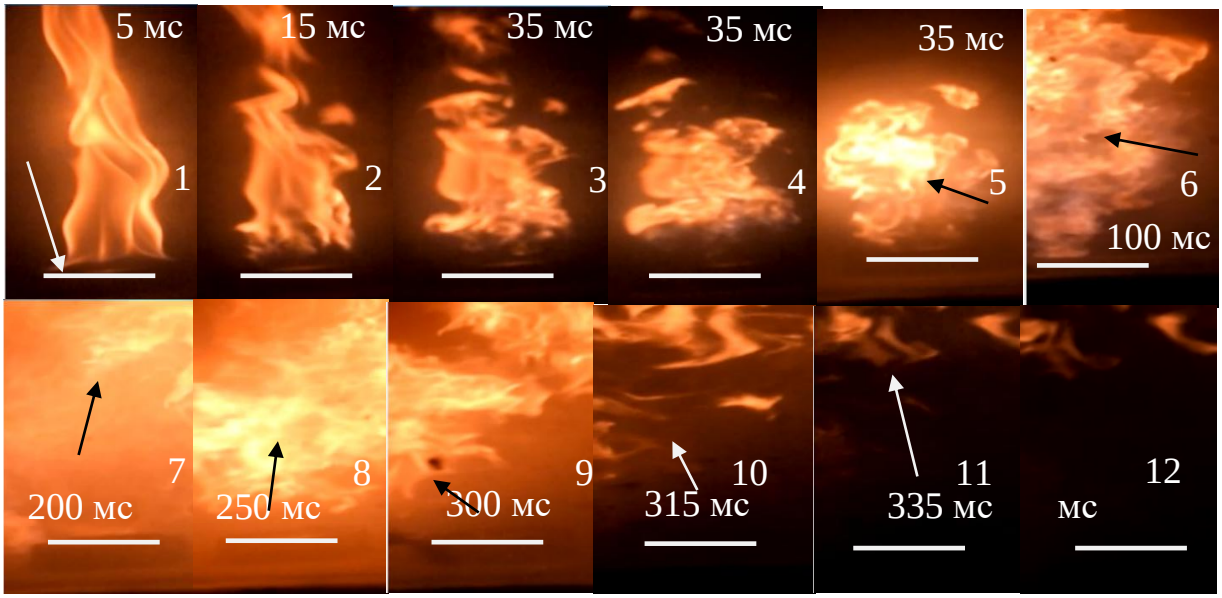



Рисунок 4.42 – Розкадрування процесу гасіння тернарною системою УХ (серія х 3-х УХ 10 Гц, P = 240Па) Аерозоль - 4.1 г/м$^3$; $N_2$ - 5.3%; Час гасіння – 55 мск

Розкадрування процесу гасіння зазначеною тернарною системою показало, що полум'я при одночасній дії УХ, аерозолю, та $CO_2$ значно

турбулізується і відривається при меншому тиску у фронті УХ, ніж в разі гасіння самим газом або аерозолем. При цьому, після першої УХ помітно значну турбулізацію полум'я починаючи з 5 до 100 мс (рис. 4.42, п 1-6), але гасіння полум'я при цьому не відбувається. Полум'я зміщується на деяку відстань від тигля, як показано на рисунку 4.42 стрілками, до проходження наступної ударної хвилі. Коли на 200 мс (рис. 4.42, п.7) проходить наступна УХ, це призводить до ще більшої турбулізації полум’я яке відривається від гирла витікання з тигля (тигель позначений лінією у всіх позиціях та вказаний стрілкою на рис. 4.42, п. 1). При цьому полум'я значно розтягується в просторі і хаотично збільшується в розмірах в діапазоні часу між 200 і 300 мс (рис. 4.42, п 7-9). Далі на 300 мс проходить 3-тя УХ, яка ще більше відносить полум'я від тигля, після чого воно значно фрагментується і приблизно через 55 мс гасне (п. 9-12).

## 4.8. Обговорення результатів експериментів з визначення вогнегасної ефективності комбінованої тернарної системи на основі УХ

Для підтвердження висунутих в третьому розділі припущень про високу вогнегасну ефективність комбінованої тернарної системи: УХ + вогнегасний газ + аерозоль, на полум'я, було проаналізовано розкадрування процесів гасіння при дії одинарної УХ з тиском 240 Па з аерозолем та газами $CO_2$ і $N_2$ на дифузійне полум'я n-гептану. При розкадруванні гасіння тернарною системою на основі $CO_2$ (рис. 4.38) було виявлено, що гасіння полум'я серією УХ відбувається при тиску в 240 Па за 35 мс після проходження останньої УХ, що менше в 10 разів ніж при гасінні самої лише УХ (≈350 мс) без газоаерозолю.

Таким чином, на розкадруванні можна побачити значну різницю при гасінні одинарною УХ, коли полум’я відразу після її проходження фрагментується, розсіюється і гасне та серією УХ, коли полум’я значно

турбулізується, дещо розтягується, але до гасіння при цьому не доходить. Про процес гасіння, який відбувається при дії на полум'я серій з 3-х УХ, можна сказати, що при цьому відбувається зниження вогнегасних концентрацій від 33% до 50% газів та аерозолів менше на 33-55 % у порівнянні з вихідними значеннями індивідуальних концентрацій компонентів суміші, взятих для одинарної УХ.

Як видно з результатів експериментів, вплив УХ приводить до значного зниження вогнегасної концентрації бінарної суміші аерозолю та газів розріджувачів. Розкадрування дії вогнегасної системи на ДПГ із зазначеними параметрами Р (УХ) = 240 Па, Са = 4,8 г/м$^3$; $CO_2$ = 5,6 %, показала значну різницю між поведінкою полум'я при дії на нього серій самої лише УХ, а також УХ в середовищі газів або аерозолю. При цьому можна сказати, що полум'я значно легше відривається і час відриву зменшується з 215 мс – при дії самої лише УХ, до 35 мс – при гасінні тернарною системою та серією УХ. Висока ефективність тернарної системи (УХ+газ+аерозоль) пояснюється комбінованою дією вогнегасних чинників компонентів тернарної вогнегасної системи. Крім цього, вогнегасний аерозоль та газ-розріджувач, як відомо [166, 327] є синергентами, що приводить до значно вищої вогнегасної ефективності вогнегасної системи ніж традиційні засоби пожежогасіння.

Свідченням синергізму можна вважати значне зниження вогнегасної концентрації аерозолю, газів-розріджувачів і потужності УХ в 5 і більше разів, при гасінні ДПГ в порівнянні з індивідуальною вогнегасної концентрацією окремих компонентів суміші, які відповідно становлять: для гептану $C_7H_{16}$ Св ($CO_2$) = 23%, Св (А) = 22,5 г/м$^3$ і Р(УХ) = 215 Па, (для тигля заданих параметрів з тепловою випромінювальною здатністю 4 кВт/м$^2$). Відповідно, якщо порівняти зміну концентрацій об'ємних засобів гасіння, які показані в табл. 6.4, можна простежити чітку тенденцію до зменшення їх вогнегасної концентрації при їх комбінованій дії разом з УХ.

Таким чином маємо кілька варіантів вогнегасних систем з УХ, експериментальні параметри яких узагальнені. в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19

Результати експериментальних досліджень в лабораторних умовах з визначення ефективності гасіння об'ємним способом дифузійного полум'я n-гептану вогнегасними речовинами та ударними хвилями

| Вплив УХ (одинарна, серії) | Тиск УХ Па | Теплова потужність полум'я кВт/м$^2$ | Концентрація вогнегасної речовини | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_2$, % | $N_2$, % | Вогнегасний аерозоль г/м$^3$ |
| одинарна УХ | 215 | 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| одинарна УХ | 180 | 4 | 5,1 | 0,0 | 0,0 |
| одинарна УХ | 180 | 4 | 0,0 | 10,2 | 0,0 |
| одинарна УХ | 180 | 4 | 0,0 | 0,0 | 10,3 |
| серії УХ (10 Гц) | 172 | 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| серії УХ (10 Гц) | 172 | 10 | 4,8 | 0,0 | 0,0 |
| серії УХ (10 Гц) | 170 | 10 | 0,0 | 10,8 | 0,0 |
| серії УХ (10 Гц) | 170 | 10 | 0,0 | 0,0 | 8,2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| одинарна УХ | 240 | 18 | 4,9 | 0,0 | 5,6 |
| одинарна УХ | 240 | 18 | 0,0 | 8,2 | 6,8 |
| серії УХ (10 Гц) | 240 | 18 | 3,5 | 0,0 | 2,8 |
| серії УХ (10 Гц) | 240 | 18 | 0,0 | 5,3 | 4,1 |

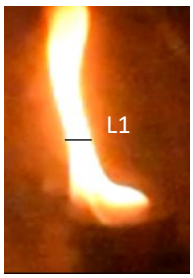
Виходячи з аналізу узагальнених даних, наведених у таблиці 4.19, при дії одинарної і серій УХ на полум'я n-гептану видно, що її вплив на полум'я призводить до значного підвищення вогнегасної ефективності об'ємних вогнегасних речовин і, як видно з таблиці, залежить від теплової потужності полум'я. Так при тепловій потужності випромінювання 4 кВт/м$^2$ і дії одинарної УХ з тиском в фронті ≈180 Па, як бачимо з таблиці, вогнегасна концентрація $CO_2$ зменшується до 5,1%. Використання серій УХ з частотою в 10 Гц призводить до подальшого зменшення вогнегасної концентрації і навіть при більшому розмірі полум'я (10 кВт/м$^2$) спостерігається зменшення вогнегасної концентрації $CO_2$ до 4,8 при майже однаковому тиску у фронті УХ в ≈180 Па. Подальше збільшення розмірів полум'я (18 кВт/м$^2$) тягне за собою збільшення вогнегасного тиску у фронті УХ до 240 Па, але вогнегасна концентрація для $CO_2$ і аерозолю залишаються майже на колишньому рівні і становлять приблизно 4,9% $CO_2$ і 5,6 г/м$^3$ аерозолю, для одинарної і 3,5 $CO_2$ і 2,8 г/м$^3$ аерозолю – для серій УХ з частотою 10 Гц. Для азоту також спостерігається зменшення до 8,2 $N_2$ і 6,8 г / м$^3$ аерозолю для одинарної і до 5,3% $N_2$ і 4,1 г/м$^3$ аерозолю для серій УХ. Таким чином комбіноване використання вогнегасного газу, аерозолю і серій УХ з частотою в 10 Гц призводить до значного

підвищення вогнегасної ефективності такої системи, що видно на прикладі гасіння полум'я n-гептану заданих параметрів [363, 364].

Що стосується механізму припинення горіння в результаті дії ударних хвиль, то в результаті аналізу розкадровок можна побачити, що у всіх випадках на початку моменту гасіння полум’я збільшується в об’ємі відразу за проходженням ударної хвилі, після чого відбувається його фрагментація та потухання. Побачити процес збільшення об’єму полум’я можна на рис. 4.43, на якому зображено витяги з рисунків 4.15-4.34. Збільшення об’єму полум’я вимірювалось посередині його висоти та позначалось L1 – до дії УХ та L2 – після дії УХ. Як видно з рис.4.43, полум’я після проходження ударної хвилі збільшується в об’ємі в 1,4 -5 разів порівняно з його первинними розмірами за 5–35 мс після проходження УХ, після чого починається відразу його фрагментація та подальше збільшення в об’ємі. Утворені фрагменти починають розходитись в просторі та догорати після чого між зоною парів і газів та зоною горіння утворюється розрив, через який полум’я не здатне відновитись.

Як видно з рисунка 4.43, розширення полум’я відбувається відразу після проходження УХ через полум’я. Це приводить, як і було обґрунтовано попередньо, до раптового зменшення тиску в зоні горіння та припинення ланцюгових реакцій, що в свою чергу забезпечує різке зменшення швидкості поширення полум’я.

Таким чином фрагментація, а потім і гасіння полум’я, відбувається внаслідок розтягнення (розриву) полум’я в зоні релаксації УХ. Крім цього, в фронті полум’я після проходження ударної хвилі будуть виникати нестійкості Ріхтмаєра–Мєшкова, які забезпечують розділення полум’я на фрагменти. Поєднання цих факторів забезпечує гасіння дифузійного полум’я без, або з мінімальною кількістю об’ємної вогнегасної речовини.



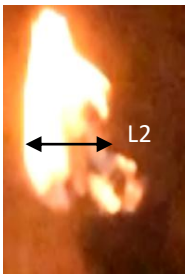




Рисунок 4.15– $P_{ух}$ = 190Па: L1= 10 мм ; L2=36мм; τ= 35мс; Q=4 кВт




Рисунок 4.16 $P_{ух}$ = 215Па: L1= 26мм; L2=31мм; τ =30мс; Q=4 кВт

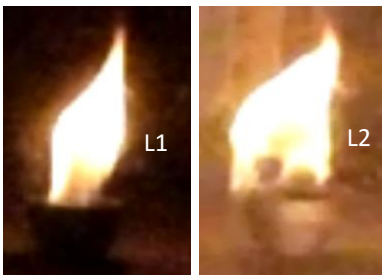



Рисунок 4.17 – $P_{ух}$ = 316Па L1= 30мм; L2=46мм; τ = 35мс; Q=4 кВт;







Рисунок 4.21– $P_{ух}$ = 180Па: L1= 10 мм; L2=30мм (35мс); τ = 25mc; Q=4 кВт

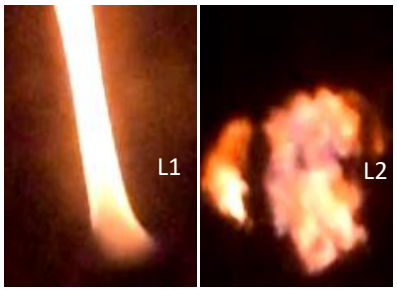



Рисунок 4.22 – $P_{ух}$ = 195 Па: F=(20Гц); L1= 11 мм; L2=58мм; τ = 35мс;

Q=4 кВт

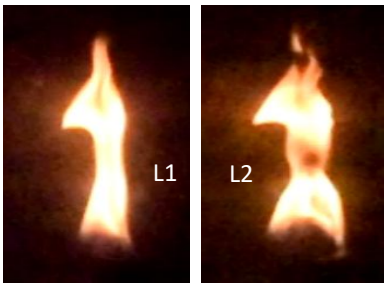



Рисунок 4.27 – $P_{ух}$ = 180 Па: $CO_2$ = 8.2%; L1= 14 мм; L2=44мм; T= 15мс; Q= 4 кВт







Рисунок 4.28 – $P_{ух}$ = 180 Па: $N_2$ = 26,4%; L1= 14 мм; L2=42 мм; τ = 15мс; Q=4кВт




Рисунок 4.38– $P_{ух}$ =195Па: Аерозоль = 4,8г/м$^3$; $N_2$ =5,6% ; L1= 66 мм; L2=106мм; τ = 35мс; Q=18 кВт

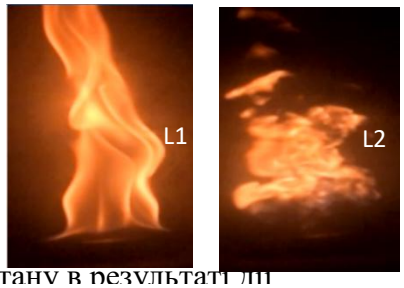



Рисунок 4.42– $P_{ух}$ = 240 Па (10Гц): Аерозоль = 4,1г/м$^3$; $N_2$ =5,3%; L1= 68 мм; L2=120 мм; τ = 35мс; Q=18кВт

Рисунок 4.43 – Розширення дифузійного полум'я n-гептану в результаті ім

### 4.9. Висновки за розділом

- Визначено вогнегасну ефективність бінарної аерозольно – діоксидвуглецевої суміші та встановлено, що добавка $CO_2$ до аерозолю неорганічних солей калію значно підвищує її вогнегасну ефективність завдяки синергізму між її компонентами. Результатом добавляння до аерозолю азоту стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів

бінарної суміші до 30 %. Визначено, що оптимальні співвідношення компонентів в аерозольно–азотній суміші становлять: аерозолю – 10 г/м$^3$ , азоту – 12,1 %, а в аерозольно- вуглекислотній: аерозолю – 10 г/м$^3$ , $CO_2$ – 6 % при яких суміш є вогнегасною, для дифузійного полум'я n-гептану та забезпечує збереження життєпридатної концентрації кисню.

- Встановлено, що гасіння дифузійного полум'я n-гептану відбувається не через його відрив, а через його зменшення в розмірах та пульсацію при частотах 24–35 Гц. Виявлено, що внесення кінетичного полум'я n-гептану в бінарній аерозольно-азотній суміші при концентраціях, які значно переважають вогнегасні для дифузійного полум'я n-гептану, до гасіння не приводило.
- Визначено інтенсивність та значне зменшення температури дифузійного та кінетичного полум'я при перебуванні його в бінарній аерозольно-азотній суміші. Різниця температур між початковим значенням температури та під дією бінарної аерозольно-азотної суміші становить максимум 230 $^oC$. Зниження температури відбувається внаслідок того, що добавка бінарної аерозольно-азотної суміші ймовірно призводить до зменшення тепловиділення реакції горіння і, як наслідок, зменшення температури полум'я.
- Визначено, що бінарні суміші вогнегасного аерозолю та газів розріджувачів забезпечують зниження викидів $CO_2$ в атмосферу до 3-х разів у порівнянні з його індивідуальними вогнегасними концентраціями. Визначено безпечні для людини бінарні вогнегасні суміші аерозолю з $CO_2$, $N_2$. Встановлено оптимальні вогнегасні концентрації аерозолю в суміші з $CO_2$ або $N_2$, які володіють меншими концентраціями ніж їх індивідуальні за рахунок синергізму компонентів.
- Проведено математичне планування експериментальних досліджень для визначення тривалості часу гасіння пожежі методом ударної хвилі. Виконано кодування факторів складання план-матриці експерименту.

Проведено рандомізацію дослідів та реалізовано план експерименту. В цьому випадку значення тиску ударної хвилі при використанні вогнегасної системи на основі газу $CO_2$ визначається за залежністю

- яка для $CO_2$ має вигляд $$P = \frac{1,59 q^{3,56} \tilde{A}^{0,29}}{A^{1,62}}$$, Па.

- 6. Значення тиску ударної хвилі у разі використання вогнегасної системи на основі газу $N_2$ визначаємо за залежністю $$P = \frac{5,41 q^{3,17} \tilde{A}^{0,44}}{A^{1,62}}$$, Па.

- Експериментально визначено, що вплив на полум'я n-гептану, ударної хвилі з тиском в фронті близько 215 Па в камері на відстані до 2-х метрів, призведе до його загасання через відрив і фрагментацію. Моменти, які підтверджували вогнегасну ефективність ударної хвилі, а також перехідні стани нестабільності були зафіксовані на відеоролики з частотою 1200 кадрів в секунду, з яких було отримано розкадрування за відповідними етапами, моментів нестабільності полум'я при різних тисках та частотах впливу УХ для теплової потужності полум’я від 4 кВт/м$^2$ до 18 кВт/м$^2$. Також для одинарних ударних хвиль встановлений час гасіння, який залежить від потужності ударної хвилі та дорівнює приблизно 100 -200 мс до повного затухання полум’я.

- 8. Експериментально встановлено, що вогнегасна ефективність серій ударних хвиль з частотою близько 10 Гц збільшується приблизно від 20 % у порівнянні з вогнегасною ефективністю одинарних ударних хвиль. За результатами розкадрування встановлено, що при дії одинарної ударної хвилі в серії з 3 ударних хвиль при їх частоті утворення 10 Гц та тиску близько 200 Па відбувається фрагментація полум’я безпосередньо над поверхнею горіння майже без відриву полум’я, після чого в результаті

проходження наступної УХ відбувається гасіння через подальшу фрагментацію полум’я.

- Встановлено, що при потужності ударної хвилі в 180 Па вогнегасна концентрація для $CO_2$ зменшується в 2.5 раза і в 2 рази для $N_2$ при гасінні дифузійного полум'я n-гептану. Підтверджено, що загальним результатом дії ударної хвилі та вогнегасного газу буде значне зменшення часу гасіння дифузійного полум'я n-гептану, який у випадку з $CO_2$ зменшується до 7 разів, а для $N_2$ – до 4.2 раза порівняно з часом гасіння самої ударною хвилею, який становить близько 350 мілісекунд.
- Експериментально встановлено, що комбіноване застосування потрійних серій ударних хвиль з частотою 10 Гц та об’ємних вогнегасних речовин приводить до зменшення потужності ударних хвиль до 1,25-1,5 разів та вогнегасної концентрації газових вогнегасних речовин. При цьому вогнегасна концентрація $CO_2$ зменшується до 7 разів, а азоту – до 4,5 разів та становить відповідно при тиску УХ в 170 Па: 4,8 % – $CO_2$ та 10,2% – $N_2$ при тепловій потужності полум’я в 4 кВт /м$^2$.
- Експериментально встановлено, що комбіноване застосування вогнегасного аерозолю та одинарних ударних хвиль з тиском у 240 Па приводить до зменшення вогнегасної концентрації аерозолю в умовах експериментальної камери до 2-3,5 разів. Підтверджено, що загальним результатом дії ударної хвилі та вогнегасного аерозолю буде теж зменшення часу гасіння дифузійного полум'я n-гептану до 4.2 раза, порівнянно з часом гасіння самою ударною хвилею. У випадку комбінованого застосування серій ударних хвиль та вогнегасного аерозолю відбувається зменшення потужності ударної хвилі до 240 Па та вогнегасної концентрації аерозолю до 2-х разів.
- Експериментально визначено що комбіноване застосування вогнегасного аерозолю, вогнегасної газової речовини та одинарних ударних хвиль з тиском у 240 Па приводить до зменшення вогнегасних

концентрацій для вогнегасного аерозолю до 4,8 г/м$^3$ та до 5,8 для $CO_2$ , або для вогнегасного аерозолю до 6,5 г/м$^3$ та до 8,2 для $N_2$, що є значно нижчим за їх індивідуальні значення ймовірно завдяки синергізму між її компонентами. Встановлено, що дія серій УХ з тиском 240 Па на бінарну суміш вогнегасного аерозолю та газів приводить до ще більшого підвищення вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолю та газів. Вогнегасні концентрації становлять для аерозолю – 3,5 г/м$^3$ та для $CO_2$ – 2,8 %. Для бінарної суміші аерозолю та азоту ці співвідношення становлять для аерозолю до 4,1 г/м$^3$ та для $N_2$ до – 5,2 % при тиску ударної хвилі у всіх випадках в 240 Па. Значне підвищення вогнегасної ефективності можна пояснити синергізмом між компонентами комбінованих вогнегасних систем на основі ударних хвиль.

- Встановлено, що зазначений спосіб гасіння забезпечуватиме зменшення викиду $CO_2$ в 5 разів порівнянно з індивідуальною вогнегасною концентрацією, та у комплексі з вогнегасними аерозолями – до 10 разів. Щодо часу гасіння пожежі то він зменшується до декількох секунд з моменту подачі серій ударних хвиль та вогнегасних речовин, що забезпечить значне обмеження викидів в атмосферу продуктів горіння та побічних продуктів які утворилися б при тривалішому процесі горіння та взаємодії з вогнегасними речовинами.

# ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз світової та національної статистики пожеж, сучасних засобів пожежогасіння та їх негативний вплив на довкілля. Сформульовано ідею щодо зменшення негативного впливу пожеж на довкілля шляхом застосування на початковій стадії ударних хвиль або їх комбінації з газовими та аерозолевими вогнегасними речовинами.

2. Обґрунтовано методологію, відповідно до якої передбачено проведення аналізу статистики пожеж та їх негативного впливу на довкілля, а також сучасного стану трактування процесів припинення горіння та засобів і технологій припинення горіння. Обрані методи проведення досліджень, за якими, із застосуванням розроблених методик, виявлених чинників впливу на процеси припинення горіння, створеного експериментального обладнання та результатів лабораторних і полігонних досліджень, передбачено створення наукових основ зменшення негативного впливу на довкілля пожеж на початковій стадії їх розвитку дією ударних хвиль та їх комбінацій з екологічно прийнятними вогнегасними речовинами.

3. Теоретично обґрунтовано можливість застосування ударних хвиль для припинення горіння горючих середовищ та, відповідно, можливість підвищення ефективності систем об’ємного пожежогасіння шляхом комбінованого послідовного застосування вогнегасного аерозолю, газової вогнегасної речовини та ударних хвиль, яке полягає у одночасній дії на дифузійне полум’я таких факторів як відрив полум’я, вплив на зону горіння ударної хвилі, що приводить спочатку до збільшення тиску а потім після проходження ударної хвилі – до розрідження зони горіння. Підвищення ефективності пожежогасіння забезпечується завдяки синергічному ефекту, який виникає у разі послідовної дії хімічних та фізичних чинників впливу на вогнище пожежі;

4. Розроблено методики та установку для досліджень процесів припинення горіння дією ударних хвиль і їх комбінацій з вогнегасними речовинами об’ємної дії;

5. Проведено експериментальні дослідження з виявлення ефективності впливу ударних хвиль та їх комбінацій з вогнегасними речовинами об’ємної дії на процеси припинення горіння горючих середовищ.

Визначено вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-вуглекислотної суміші БАВС та встановлено, що добавка $CO_2$ до аерозолю неорганічних солей калію призводить до значного підвищення її вогнегасної ефективності завдяки синергізму між її компонентами. Результатом добавлення до аерозолю азоту стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів бінарної суміші до 30 %. Визначено, що оптимальні співвідношення компонентів в аерозольно-азотній суміші становлять: аерозолю – 10 г/м$^3$, азоту – 12,1 %, а в аерозольно-вуглекислотній: аерозолю – 10 г/м$^3$, $CO_2$ – 6 %, при яких суміші є вогнегасними, для дифузійного полум'я n-гептану та забезпечують збереження життєпридатної концентрації кисню.

Експериментально встановлена вогнегасна ефективність одинарних ударних хвиль, яка становить від 215 Па – для теплової потужності полум'я 4 кВт/м$^2$ , та до 2500 Па – для теплової потужності полум'я близько 20 кВт/м$^2$. При дії на полум'я серій ударних хвиль з частотою від 8 до 12 Гц відбувається подальше зменшення вогнегасної потужності ударних хвиль ще до 20%. Час гасіння при цьому зменшується після проходження останньої УХ до 10 %.

6. Теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена можливість значного підвищення вогнегасної ефективності вогнегасних речовин об'ємної дії при їх комбінованому застосуванні з ударними хвилями При цьому експериментально визначено, що вогнегасна концентрація газів зменшується в 2,5 раза для $CO_2$ і в 2 рази – для $N_2$ при їх комбінованому застосуванні з одинарною ударною хвилею для дифузійного полум'я n-гептану.

7. Також в умовах експериментальної камери встановлено, що серії з 3-х ударних хвиль при частоті 10 - 15 Гц забезпечують підвищення вогнегасної ефективності вогнегасних речовин об'ємної дії до 20 % порівняно з дією одинарної ударної хвилі. Виявлено ефект синергізму між компонентами комбінованої вогнегасної системи, який проявляється у зниженні вогнегасної концентрації $CO_2$ до 4,8 %, та азоту – до концентрації 10,2 % при умові впливу на полум'я одинарних та потрійних серій ударних хвиль з зазначеною частотою, що полягає у зниженні їх вогнегасних концентрацій до 7 разів у порівнянні з їх індивідуальними значеннями.

8. Науково обґрунтовано схемні рішення і параметри та створено технічні засоби, які реалізують технологію припинення горіння на

початковій стадії розвитку пожежі застосуванням ударних хвиль або їх комбінацій із екологічно прийнятними вогнегасними речовинами об’ємної дії, що запобігає поширенню горіння та зменшує забруднення довкілля. Генератори ударних хвиль можуть бути як у складі пристрою, так і встановлюватись окремо та використовуватись разом з окремо встановленими генераторами ударних хвиль. При цьому, тривалість емісії та обсяги шкідливих для довкілля речовин внаслідок пожеж значно зменшуються, що підвищує ефективність забезпечення екологічної безпеки населення і територій України.

9. Проведені полігонні випробування показали прогнозовано високу вогнегасну ефективність розроблених генераторів вогнегасного аерозолю, автономних аерозольних установок запобігання горінню та пожежогасіння, а також пристроїв комбінованого гасіння та запобігання пожежі. При цьому вогнегасна концентрація вогнегасних компонентів при комбінованій дії в великогабаритних приміщеннях зменшується до 3 разів, стосовно вогнегасного аерозолю та газових вогнегасних речовин ($CO_2$, $N_2$) – до 6 разів порівняно з їх індивідуальними значеннями при дії на середовище серій ударних хвиль потужністю до 2500 Па та частотою близько 10 Гц.

10. Встановлено, що зазначений спосіб гасіння забезпечуватиме зменшення викиду парникового газу-діоксиду вуглецю у 3 рази порівняно з його індивідуальною вогнегасною концентрацією, а у комплексі з вогнегасними аерозолями – до 6 разів.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2013 року. URL http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2014/1/20/AD_12_13_NTI.pdf
2. Аналітична довідка про стан із пожежами та наслідками від них в Україні за 12 місяців 2014 року. URL http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2015/2/17/AD_12_2014.pdf.
3. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 6 місяців 2017 року. URL http://undicz.dsns.gov.ua/files/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/2017/AD_06_17.pdf.
4. «Форум» URL http://for-ua.com/ukraine/ 2011/11/01/162714.html
5. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2015 року. URL http://www.undicz.mns.gov.ua/files/2016/1/20/AD_12_2015.pdf
6. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2014 році. URL http://www.mns.gov.ua/files/prognoz/report/2014/ND_2014.pdf.
7. Ковальчик В.М. Обгрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 21.06.02. Львів, 2016. 23 с.
8. Bariha N., Mishra I.M., Srivastava V.C. Analysis of fire and explosion hazards during surface transport of liquefied petroleum gas: A case study. IChemE conference paper / journal.
9. Через пожежу на трансформаторній підстанції п'ять районів лишилися без світла. URL http://tsn.ua/ukrayina/na-cherkaschini-stalasya-pozhezha-na-pidstanciyi-pid-visokoyu-naprugoyu-373438.html
10. Під Миколаєвом на АЗС загорілися три бензовози, є постраждалі. URL http://tyzhden.ua/News/141229.

11. Статистика пожеж у світі. URL http://www.nfpa.org/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Fire-statistics

12. NFPA 30, Flammable and Combustible Liquids Code. 1993 Edition. National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.

13. Shaaf J.B.R. Investigation into the circumstances surrounding an accident in Nijmegen involving a tanker. *Inst. Chem. Symp. Ser. Nijmegen*, 1983, №80. С. 14-23.

14. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y.K., Singh I., Tanwar R.K., Narang R. (2021). *Condensed aerosol based fire extinguishing system covering versatile applications: A review*. Fire Technology, 58, 327–351.

15. Zalosh, Robert G. Industrial fire protection engineering : tutorial book. England : Hoboken, NJ, 2003. 387 p.

16. Fire protection handbook / edited. Arthur Cote, Jim L. Linville. United States of America : National Fire Protection Assoc., 1976. 1185 p.

17. R. Craig Schroll. Industrial fire protection handbook : handbook. 2 edit. – Boca Raton: CRC Press, 2002. 252 p.

18. Arthur E. Cote Operation of fire protection systems : a special edition of the Fire Protection Handbook : handbook. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2003. 679 p.

19. Arthur E. Cote Fire protection handbook : handbook. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1991. 187 p.

20. Arthur E. Cote, Percy Bugbee Cote Principles of fire protection : handbook. Quincy, MA : National Fire Protection Association, 1988. 357 p.

21. Касьянов Н.А., Михайлов Д.В. Экспериментальное исследование пожаров в помещениях. *Вісник СНУ ім. В.Даля. Технічні науки*. Сєвєродонецьк, 2004. №12. С. 99-104.

22. Котов А.Г. Пожаротушение и системы безопасности: науч. пособ. Киев : Репро-Графіка, 2003. 67 с.

23.**ISO:** ISO 14520-1. *Gaseous fire-extinguishing systems — Physical properties and system design. Part 1: General requirements.* ISO; 2023.

24. Деревинський Д.М. Пожежна небезпека об'єктів з наявністю газового горючого середовища та нагрітих технологічних поверхонь у замкненому просторі. *Проблемы пожарной безопасности. Сборник научных трудов.* Харьков, 2010. Вып.27. С.59-65.

25. NFPA 2001 Standard on Clean Agent Fireextinguishing Systems. US National Fire Protection Association, 2001. URL https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=2001

26. Костенко В. К. Геомеханічні і аерологічні основи запобігання пожеж від самонагрівання вугілля в шахтах : автореф. дис. д-ра наук: 21.06.02. Макіївка– 2004. 59 с.

27. Hung M.-C., Lin C.-Y., Hsiao G.L.-K. Safe Firefighting Distances Using FDS and ALOHA for Oil Tank Fires. Fire. 2024;7(12):445.

28. Khakzad N., Reniers G., Cozzani V. Risk assessment of domino effects in fuel storage plants // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. — 2013. — Vol. 26, No. 6. — P. 1238–1248. — DOI: 10.1016/j.jlp.2013.07.004.

29. Лозинський Р. Я. Обґрунтування параметрів установки для дистанційного гасіння пожеж газоводяною сумішшю : автореф. дис. канд. техн. наук : 21.06.02. Київ, 2005. 21 с.

30. Grant G., Brenton J., Drysdale D. Fire suppression by water sprays. *Journal Progress in Energy and Combustion Science. Technical science.* Edinburgh, EH9 3JN, UK, 2000. Vol 26, No 2. P. 79–130.

31. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

32. Zhou Xiaomeng, Liao Guangxuan, Cai Bo. Improvement of water mist's fire-extinguishing efficiency with MC additive (Підвищення вогнегасної ефективності ТРВ за рахунок МС (багатокомпонентної) -добавки). F*ire Safety Journal.* USA, 2006. № 41.39–45 pp.

33. Сенчихін Ю.М., Сировий В.В. Довідник керівника гасіння пожежі. Пожежна безпека : довідник. / За загальною редакцією В.С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

34. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

35. ДСТУ 3789–98. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. [Чинний від 01.01.2000]. Вид. офіц. Київ, 1998. 29 с.

36. ДСТУ 4041–2001. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. [Чинний від 01.10.2001]. Вид. офіц. Київ, 2001. 94 с.

37. Ковалишин В.В., Грушовінчук О.В., Лущ В.І. Дослідження залежності кратності повітряно-механічної піни від розміру вічка сітки піногенератора. *Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. Пожежна безпека.* Львів, 2009. № 16. С. 54–58.

38. Ковалишин В.В., Улинець Е.М., Грушовінчук О.В., Кавецький В.В. Дослідження залежності кратності повітряно-механічної піни від геометричних параметрів піногенератора. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2011. № 2 (24). с.74-79.

39. Колібабчук О.О. Удосконалення характеристик установок пожежогасіння вібраційною підготовкою і подачею вогнегасного порошку

відцентровою машиною: автореф. дис. канд. техн. наук : 21.06.02. Макіївка, 2011. 17 с.

40. Kaigian Kaung A Kaigian Kaung, Xin Huang, Guahgxuang Liso. Comparison between superfine magnesium hydroxide powders and commercial dry powders on fire suppression effectiveness. *Journal Process Safety and Environmental Protection of University of Science and Technology of China. Technical science*. China, Hefei 230026, 2008. Vol. 86. No 3. P. 182–188.

41. Король А. А. Тушение пожаров тонкодисперсными порошками : пособие. Киев : Уголь Украины, 2003. С. 42 –43.

42. Dowitte M., Vrebaxh J., Van Tiggelen A. Inhibition and Extinction of Premixed Flames by Dust Particles. *Combustion and Flame*. *Technical science.* USA, Pittsburgh, PA, 1964. Vol. 8. No 4. P. 257-266.

43. Dotan J.B., Dempster P.B. Suppression of methane-air ignitions by fine powders. *Journal of Applied Chemistry*. *Applied chemistry.* USA, 1955. Vol. №5. No 9. P. 510-517.

44. Біленко Д.О. Вогнегасні речовини : методична розробка. Уман, 2012. 64 с.

45.u Y., Chen R., Guo S., Wang Z., Pan R. Modification and Application Performance Study of Ultra-Fine Dry Powder Extinguishing Agent. Molecules. 2024;29(16):3830.

46.FM Global. DS 4-10. Dry Chemical Systems. FM Global Property Loss Prevention Data Sheets; 2000, revised 2020.

47.National Fire Protection Association. *NFPA 10: Standard for Portable Fire Extinguishers*. NFPA; latest edition (e.g., 2018).

48.**Babushok, V., Linteris, G. T. (2015).** *Flame inhibition by metal-containing compounds.*

**Progress in Energy and Combustion Science**, 41, 1–34.

Lu, G., Zhao, J., Zhou, Y., Fu, Y., Lu, S., Zhang, H. (2024).

49. Lu G., Zhao J., Zhou Y., Fu Y., Lu S., Zhang H. Study on Flowability Enhancement and Performance Testing of Ultrafine Dry Powder Fire Extinguishing Agents Based on Application Requirements // *Fire*. 2024. Vol. 7, No. 4. P. 146. DOI: 10.3390/fire7040146.

50. Mawhinney J.R. Clean agent fire suppression: Progress and problems // *Fire Safety Journal*. 2001. Vol. 36, No. 1. P. 13–39. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00045-5.

51. Halone in Kreuzfeuer, Widetschek otto. (Разрушающее воздействие хладонов на озоновый слой планеты). Blaulicht,1988. 37. № 9. P. 21-25.

52. Smith W. Something in the air: Will concern for the ozone layer affect use of halons (Воздействие огнетушащих хладонов на озоновый слой Земли). *Fire. Technical science. UK*, 1988. Vol. 81. No 996. P. 17-18.

53. Morgan J. Hurley, Daniel T. Gottuk, John R. Hall Jr., Kazunori Harada, Erica D. Fire protections halons and the environment: an update symposium (Хладоновые установки пожаротушения и охрана окружающей среды). *Grant C.C. Fire Technol. Technical science.* Switherland, 1988. Vol. 24. No 1. P. 63-64.

54. Цапко Ю.В. Дослідження умов флегматизування горючих газових середовищ озононеруйнівними газовими вогнегасними речовинами : автореф. дис. канд. тех. наук : 21.06.02. Київ, 2003. 20 с.

55. Глазкова А.П., Кожин В.Н., Цопа Г.А., Александров В.Е. Газогенерирующие заряды исполнительных устройств систем локального пожаротушения. *Проблемы охраны труда* : тезисы докладов III Всесоюзной межвузовской конференции (г.Кишинев, 1978 г.). Кишинев, 1978. 305 с.

56. ДСТУ 3958-2000 Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників якості, загальні технічні вимоги та методи випробувань [Чинний від 01.01.2001] Вид. офіц. Київ, 2000. 21 с.

57. Mawhinney J.R. Clean agent fire suppression: Progress and problems // *Fire Safety Journal*. 2001. Vol. 36, No. 1. P. 13–39. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00045-5.

58. Grant G., Drysdale D. Numerical modelling of enclosure fires suppressed by carbon dioxide // *Fire Safety Journal*. 1997. Vol. 29, No. 3. P. 169–189. DOI: 10.1016/S0379-7112(97)00007-7.

59. Linteris G.T., Babushok V.I. Inhibition effectiveness of fire suppression agents // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30, No. 1. P. 1–33. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.08.001.

60. Chow W.K. Review on fire suppression with water mist systems // *Fire Safety Journal*. 2004. Vol. 39, No. 5. P. 438–451. DOI: 10.1016/j.firesaf.2004.05.002

61. Harry H. Binder. Lexikon der chemischen Elemente : science book. München : Südostdeutsches Kulturwerk, 1999. 856 p.

62. Mawhinney J.R. Clean agent fire suppression: Progress and problems // *Fire Safety Journal*. 2001. Vol. 36, No. 1. P. 13–39. DOI: 10.1016/S0379-7112(00)00045-5.

63. История создания ГИГов: Информация-новости. URL http://gvgss.org/index.php?newsid=162

64. Linteris G.T., Babushok V.I. Inhibition effectiveness of fire suppression agents // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30, No. 1. P. 1–33. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.08.001.

65. Про схвалення Концепції Державної програми забезпечення технологічної безпеки в основних галузях економіки. URL http://consultant.parus.ua/?doc=01VAA8AD82.

66. Алікін В.Н., Сергієнко А.Д., Степанов А.Е. Про компонування рецептур аерозолеутворюючого вогнегасних складів. *Вісник ПДТУ. Технологічна механіка.* Перм, 1996. № 2. С.165-168.

67. Генератори вогнеасного аерозолю FEROSOL. URL http://pfe.com.ua/

68. Тушение РВС-5000 при помощи установки газопорошкового пожаротушения "BIZONE" УГПП-5000. URL http://www.kalancha.ru/video/tushenie-rvs-5000-pri-pomoshchi-ustanovki-gazoporoshkovogo-pozharotusheniya-bizone-ugpp-5000

69. Мобильная установка для тушения пожаров «Натиск» - современная технология борьбы с огнем. URL http://www.arms-expo.ru/news/novye_razrabotki/mobilnaya_ustanovka_dlya_tusheniya_ pozharov_natisk_sovremennaya_tekhnologiya_borby_s_ognem/.

70. Установки пожаротушения с гидроабразивной резкой "Кобра". URL http://www.brmaster.ru/catalog/?sect_id=cecae02b

71. Порошковый огнетушитель автоматического действия "ШАР-1". URL http://shar-1.com/

72. Огнетушитель Спасатель-01 тушит пожар в машине URL http://спасатель-01.рф/

73. «FR911» URL http://bonex-group.com/

74. Ядерные взрывы в Украине: как это было. URL http://politburo.org.ua/id/2137/

75. Denny M., Johnson L.R. The explosion seismic source function: Models and results // *Reviews of Geophysics*. 1991. Vol. 29, No. 3. P. 343–383. DOI: 10.1029/91RG00907.

76. *Clean agent fire suppression: Progress and problems.* Fire Safety Journal, 36(1), 13–39. 10.1016/S0379-7112(00)00045-5

77. Yergin D. Ensuring energy security // *Foreign Affairs*. 2006. Vol. 85, No. 2. P. 69–82. DOI: 10.2307/20031912.

78. Grace R.D. Blowout and Well Control Handbook. Gulf Professional Publishing, 2003. 514 p. DOI: 10.1016/B978-075067705-9/50001-5.

79. Антонов А.В., Узагальнення і розвиток наукових основ розроблення та технологій застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин : дис. докт. тех. наук 21.06.02. Київ, 2017, 386 с.

79. Babushok V., Tsang W. Inhibition of hydrocarbon flames by salts: Kinetic modeling // Combustion and Flame. 2000. Vol. 123, No. 1–2. P. 488–506. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00172-6.

80. Баланюк В.М. Удосконалення аерозолевої вогнегасної речовини на основі солей калію та обгрунтування умов її застосування : дис. канд. тех. наук 21.06.02. Львів, 2006, 172 с.

81. Linteris G.T., Babushok V.I. Inhibition effectiveness of fire suppression agents // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2004. Vol. 30, No. 1. P. 1–33. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.08.001.

82. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

83. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

84. Azatyan V.V., Piloyan A.A., Saikova G.R., Smirnov N.N. Characteristics of a Chain Thermal Explosion as a Function of the Kinetic Properties of Reaction Chains. *Russian Journal Physical Chemistry A. Physical chemistry*. Moscow, 2016. P. 530–534.

85. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

86. Беликов А.С. Влияние огнезащитных композиций на динамику процессов горения древесины. *КТУ. Технические науки*. Кривой Рог, 2000. Вып.4. С.225-232.

87. Беликов А.С. К вопросу моделирования процессов горения. Сборник научных трудов. *Приднепровской гос. академии стр-ва и арх-ры.Технические науки*. Днепропетровск, 1998. Вып.5. ч.2. С.96-103.

88. Антонов А.В. Повышение эффективности порошковых средств пожаротушения : дис. канд. техн. наук : 21.06.02. Киев, 1983. 210 с.

89. Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. Вогнегасні речовини : посібник. Київ : Пожінформтехніка, 2004. 176 с.

90. Антонов А.В. Вогнегасна ефективність бінарних сумішей галону 2402 та хладону 3 мтм «novec» 1230. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2012. № 2 (26). С.198-202.

91. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

92. Bradley D., Lawes M., Liu K., Woolley R. Flame speeds and explosion limits of methane–air mixtures at elevated pressures and temperatures // *Combustion and Flame*. — 2007. — Vol. 149, No. 1–2. — P. 162–172. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.12.015

93. Бондаренко С.Н. Анализ современных средств объемного пожаротушения. *Пожарная безопасность* : материалы VI науч.-практ. Конф (г. Харьков, 2003 г.). Харьков, 2003. С. 64–66.

94. Бондаренко С.М. Розробка генераторів вогнегасячого аерозолю із покращеними характеристиками. Рукопис : дис. канд. тех. наук : 21.06.02. Харків, 2004. 250 с.

95. Алікін В.Н., СергіенкоА.Д., СтепановА.Е. Про компонування рецептур аерозолеутворюючого вогнегасних складів. *Вісник ПДТУ. Технологічна механіка*. Перм, 1996. № 2. С.165-168.

96. Сирих В.М., Тарахно О.В. Особливості та перспективи розвитку пожежно-технічної експертизи. Сб. науч. тр. *Проблемы пожарной безопасности. Технические науки.* Харьков, 2008. Вып. 24. С. 181-185.

97. Сизиков А.А. Исследование и разработка установок порошкового пожаротушения с унифицированными аэрирующими устройствами : дис. канд. техн. наук : 05.26.02. Харьков, 1997. 193 с.

98. Установка для гасіння пожежі порошком пат. 4459 України, МКП А62С35/50; заявл. 06.04.87; опубл. 27.12.1994. Бюл. № 10. 2с.

99. Установка пожежогасіння пат 25297 України, МКП А62С35/02.; Заяв. 17.12.1997; Опубл. 15.10.1998. Бюл. № 46 - 3с.

100. Сизиков А.А. Методы оценки качества аэрации огнетушащего порошка в порошковых огнетушителях и установках порошкового пожаротушения *Проблемы пожарной безопасности. Технические науки.* Харьков : ХИПБ, 1993. С.143-145.

101. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

102. Сизиков А.А., Снятков В.А. Аэрирующее устройство для установок порошкового пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности Сибири и Дальнего Востока* : тез. докл. научно-практической конференции (г. Иркутск, 1988 г.). Иркутск, 1988. С.46.

103. Дунюшкін В.О., Огурцов С.Ю., Удовенко А.Ю. Експериментальний стенд для визначення витратних характеристик розпилювачів систем порошкового пожежегасіння. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2007. № 1(15). С.76-80.

104. Дунюшкин В.А., Огурцов С.Ю. Разработка экспериментального стенда и проведение исследований по определению расходных характеристик распылителей огнетушащего порошка. *Чрезвычайные*

*ситуации: Предупреждение и ликвидация* : сб.тез. докладов IV Международной научно-практической конференции ( г.Минск, 2007 г.). Минск, 2007. Том 1. С.328-330.

105. Rohilla M., Saxena A., Tyagi Y.K., Singh I., Tanwar R.K., Narang R. Condensed aerosol based fire extinguishing system covering versatile applications // Fire Technology. — 2022. — Vol. 58. — P. 327–351. — DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4.

106. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / Hurley M.J., Gottuk D.T., Hall J.R., Harada K., Kuligowski E.D., Puchovsky M., Torero J.L., Watts J.M., Wieczorek C.J. (eds.). — 5th ed. — New York : Springer, 2016. — 3493 p. — DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0.

107. Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. — 3776 p. — DOI: 10.1016/C2009-0-29321-6.

108. DiNenno P.J. (ed.). Enclosure Fire Dynamics. — Boca Raton : CRC Press, 2015. — 352 p. — ISBN: 978-1466580199.NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2019. — 488 p.

109. Grant G., Drysdale D., Quintiere J. Fire suppression by water sprays and comparison with other agents // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2009. — Vol. 35, No. 5. — P. 417–442. — DOI: 10.1016/j.pecs.2009.05.001.

110. Баланюк В.М., Журбинський Д.А. Флегматизувальна ефективність аерозолю на основі солей калію. *Збірник наукових праць, Пожежна безпека: теорія і практика*. *Технічні науки.* Черкаси, 2013. №13. С.32-37.

111. Баланюк В.М., Копистинський Ю.О., Лавренюк О.І., Журбинський Д.А. Перебіг окремих внутрішніх процесів у вогнегасних аерозолях під час

гасіння дифузійного полум'я. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки*. Київ, 2008. №1 (17). С. 155-159.

112. Копистинський Ю.О., Баланюк В.М., Лавренюк О.І. Експериментальне визначення вогнегасної ефективності аерозолю при дії акустично-ударних хвиль. *Пожежна безпека – 2011* : матеріали X Міжнародної науково-практичної конф. (м.Харків, 17-18 листопада 2011 р.). Харків, 2011. 372 с.

113. Баланюк В.М., Мельник К.В., Копистинський Ю.О. Полуменевогасні добавки до аерозольутворювальних сумішей для придушення полум'я. *Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. Технічні науки.* Львів, 2014. №24. С. 124-128.

114. Denisjuk A.P., Zhukov B.P., Alferov V.G., Shepelev Yu.G., Baloyan B.M., Rusin D.L., Sedov S.A. Development of Solid Propellants for Effective Fire-Extinguishing Systems // Conversion Concepts for Commercial Applications and Disposal Technologies of Energetic Systems. — NATO ASI Series, Vol. 14. — Dordrecht : Springer, 1996. — P. 99–112. — DOI: 10.1007/978-94-017-1175-3_13.

115. Guo X., Zhang H., Pan X., Zhang L., Hua M., Zhang C., Zhou J., Yan C., Jiang J. Experimental and numerical simulation research on fire suppression efficiency of dry powder mediums containing molybdenum flame retardant additive // *Process Safety and Environmental Protection*. — 2021. — Available online 7 January 2022.

116. Moussa N.A., Toong T.Y., Garris C.A. Mechanisms of smouldering of cellulosic materials : 16th Symposium (International) on Combustion. (Pitsburg, PA, August 15-20). Pitsburg, PA, 1977. P.1447-1457.

117. Law C.K., Chung S.H. Combustion research in the 21st century: Recent advances and future directions // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017. Vol. 61. P. 1–85. DOI: 10.1016/j.pecs.2017.01.001.

118. Akhavan J. *The Chemistry of Explosives.* 2nd ed. — Royal Society of Chemistry, 2011.

119. Meyer R., Köhler J., Homburg A. Explosives. — Weinheim : Wiley-VCH, 2007. — 421 p.

120. Akhavan J. The Chemistry of Explosives. — Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2011. — 320 p.

121. Agrawal J.P. High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics. — Chichester : Wiley, 2010. — 456 p.

122. Akhavan J. The Chemistry of Explosives. — Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2011. — 192 p. — ISBN 978-1-84755-202-0.

123. Klapötke T.M. Chemistry of High-Energy Materials. — 3rd ed. — Berlin : De Gruyter, 2015. — 274 p. — ISBN: 978-3110333210.

124. Knegteringa B. Safety of the process industries in the 21st century: A changing need of process safety management for a changing industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. *Technical science.* Amsterdam, Nitherlands, 2009, V. 22. No 2. P. 162–168.

125. Charles J. Kibert Solid particulate aerosol fire suppressants. *Journal Fire Technology. Air Force and University of Florida. Technical science.* U.S., 1994. Vol. 30, No 4. P. 387-399.

126. Rasbash D.J., Stark G.W.V., Richardson K., Croft J. Fire Safety Engineering: Design of Structures. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2004. — 512 p. — ISBN: 978-0419253205.

127. Лавренюк О.І., Баланюк В.М. Матеріальний та тепловий баланс процесу горіння : методичні вказівки та завдання для виконання розрахункової роботи курсантами та студентами напрямів підготовки 6.170203, 6.170201 : метод. вказівки. Львів: ЛДУ БЖД, 2012. 18 с.

128. Лавренюк О.І., Баланюк В.М. Теорія розвитку та припинення горіння. Збірник вправ і задач : навчальний посібник. Ч. 1. Львів: ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2013. 132 с.

129. Баланюк В.М., Квашук В.П. Юрим М.Ф., Степова К.В., Ференц Н.О., Петрова М.А. Довідник рятувальника на випадок виникнення надзвичайних ситуацій з небезпечними хімічними речовинами : довідник / під заг. ред. В.І. Балоги. Львів : ЛДУБЖД, 2012. 700 с.

130. Лавренюк О.І., Баланюк В.М. Визначення кольору дифузійного полум'я та температури горіння органічних речовин. Методичні вказівки та завдання для виконання розрахункової роботи курсантами та студентами напрямів підготовки 6.170203 "Пожежна безпека", 6.170201 "Цивільний захист". : метод. вказівки. Львів : ЛДУ БЖД, 2012. 16 с.

131. Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. Теорія горіння та вибуху : навч. пос. Львів : ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2014. 130 с.

132. Щербина О.М., Михалічко Б.М., Баланюк В.М. Хімія та процеси горіння. *Хімія* : термінологічний словник. Львів, 2010. 168 с.

133. Жартовський В.М, Откідач М.Я., Цапко Ю.В., Тропінов О.Г. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності сумішей інгібіторів горіння та інертних розріджувачів. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2003. №2(8). С. 5-10.

134. Антонов А.В., Огурцов С.Ю. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання» («Припинення горіння») : звіт. Київ : УкрНДІЦЗ ДСНС України, 2014. 483 с. № держреєстрації 0111U008299.

135. Копистинський Ю.О. Баланюк, Кошеленко В.В. Особливості механізму гасіння дифузійного полум'я аерозолями на основі хлоридів та

карбонатів калію. *Пожежна безпека* : зб. тез доп. IX Міжнар. наук.-практ. конф. (м.Львів, 2009 р.) Львів, 2009. С. 95-96.

136. Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C., Torero J.L. (eds.). Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science. — Chichester : Wiley, 2015. — 440 p. — ISBN: 978-1118523192.

137. Patent GB2507937A. A Solid Propellant Fire Extinguishing System. — Google Patents, 2014. Генератори вогнегасного аерозолю. URL https://www.firepro.com/.

138. Викиди екологічно небезпечних речовин при пожежах. URL https://menr.gov.ua/

139. Апанович В.Н., Жартовский В.М., Антонов А.В. Исследование пламеподавляющих свойств бинарных смесей. Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных систем : научн. пособие. Черноголовка, 1989. 112 с.

140. Rein G., Torero J.L. Computational fluid dynamics modeling of fire suppression and fire dynamics // *Progress in Energy and Combustion Science*. — 2009. — Vol. 35, No. 2. — P. 97–131. — DOI: 10.1016/j.pecs.2008.10.002.

141. ISO 14520-1:2006 Gaseous fire-extinguishing systems. Physical properties and system design. Part 1: General requirements (Системи газового пожежогасіння. Фізичні властивості та проектування систем. Частина 1. Загальні вимоги) з поправкою ISO 14520-1:2006/Cor.1:2007.

142. ДСТУ 3958-2000 Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. [Чинний від 01.01.2001]. Вид офіц. Київ, 2000. 72 с.

143. ДСТУ 4466-1:2008 Системи газового пожежогасіння. Проектування, монтаж, випробування, технічне обслуговування та безпека. Частина 1. Загальні вимоги. [Чинний від 01.07.2009]. Вид офіц. Київ, 2006. 69 с.

144. ДСТУ 5092:2008 Пожежна безпека. Вогнегасні речовини. Діоксид вуглецю. [Чинний від 01.10.2010]. Вид офіц. Київ, 2010. 19 с.

145. Баланюк В.М. Копистинський Ю.О. Лавренюк О.І. Підвищення ефективності гасіння аерозолевою речовиною на основі неорганічних солей калію ударною хвилею. *Техногенна безпека: Теорія, практика, інновації* :

зб. тез доп. ІІ Міжнар. наук.-практ. конф. (м.Львів 2011 р.) Львів, 2011. С. 49-50.

146. Журбинський Д. А. Особливості припинення процесів горіння аерозоль утворюючими системами при об'ємному пожежегасінні. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. Черкаси, 2002. Вип. 4. С. 110-114.

147. Копистинський Ю.О. Підвищення ефективності систем аерозольного пожежогасіння : автореферат дис. канд. тех. наук : 21.06.02. Львів, 2013. с 19.

148. ДСТУ 4490:2005 Пожежна техніка. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтування та експлуатування. Технічні вимоги. [Чинний від 01. 07. 2006]. Вид офіц. Київ, 2006. 14 с.

149. Жартовський В.М., Откідач М.Я., Цапко Ю.В., Тропінов О.Г. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності сумішей інгібіторів горіння та інертних розріджувачів. *Науковий вісник НЛТУ України. Технічні науки.* Львів, 2003. №2. С. 5-10.

150. Баланюк В.М., Грималюк Б.Т., Кіт Ю.В., Левуш С.С. Вплив газової фази на ефективність вогнегасних аерозолів. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Технічні науки.* Львів, 2004. №497. С. 11–12.

151. Баланюк В.М., Грималюк Б.Т. Дослідження впливу інертних газових розріджувачів на ефективність вогнегасних аерозолів. *Пожежна безпека. Тех. науки.* Львів, 2004. №5. С.18–24.

152. US Patent 6,478,964. Condensed aerosol fire extinguishing composition and method. — 2002.

153. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар ООН; Протокол, Акт, Резолюція від 16.09.1987. URL http://parusconsultant.com/?doc=053O65D021

154. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (укр/рос) ООН; Протокол, Міжнародний документ від 11.12.1997. URL https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801

155. Robert E. Tapscott, Ted A. Moore, and J. Douglas Mather. Halon replacement research – a historical review of technical progress and regulatory decision points : Halon Options Technical Working Conference (Sheraton Old Town, 12–14 May, 1998). Sheraton Old Town, Albuquerque, New Mexico, 1998. P. 54 – 68

156. U.S. Department of Transportation Federal Aviation (February 2002) Administration Final Report Options to the Use of Halons for Aircraft Fire Suppression Systems. Update. URL : www.faa.gov:

157. Neil L. Book, Oliver C. Sitton, Douglas K. Ludlow. Inerting or purging. Instructional module. *Department of Chemical Engineering University of Missouri*. *Technical science.* Rolla, 2000. P. 31

158. Vortex The Only Hybrid Nitrogen–Water Fire Suppression System. URL http://www.firesafetyinc.com/PDFs/Vortex %20Brochure.pdf.

159. Eric W. Forssell, Joseph L. Scheffey, Philip J. DiNenno, and Gerard G. Back. *False Deck Development Testing of Hybrid Nitrogen*. Water Mist Fire Suppression Systems : Halon Options Technical Working Conference (Albuquerque, 2004), Albuquerque, NM, 2004. P. 26-32

160. Система автоматического пожаротушения «Защитный туман» URL https://www.startbase.ru/innovations/63/.

161. Quintiere J.G. Fundamentals of Fire Phenomena. — Chichester : Wiley, 2006. — 432 p. — DOI: 10.1002/0470091150.

162. Lott J.L., Christian S.D., Sliepcevich C.M., Tucker E.E. Synergism Between Chemical and Physical Fire–Suppressant Agents. *Fire Technology*. *Technical science*. Berlin, 1996, Vol. 32, No 3 P.260–271.

163. Williams B.A., Fleming J.W., Sheinson R.S. Extinction Studies of Hydrofluorocarbons in Methane Air and Propane. *Air Counterflow Diffusion Flames: The Role of the CF3 Radical :* Proceedings of the Halon Options Technical Working Conference (Albuquerque, NM, 6-8 May, 1997). Albuquerque, NM, 1997. P. 31-42.

164. Журбинський, Д. А. Флегматизування газових горючих середовищ сумішами вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин : автореф. дис. канд. техн. наук: 21.06.02. Львів, 2014. 19 с.

165. Ted A. Moore, Nobuo Yamada. Nitrogen gas as a halon replacement : Halon Options Technical Working Conference (Albuquerque, NM, 12–14 May 1998). Albuquerque, NM, 1998. P. 330–338.

166. Sakei N. Saito, Y. Saso Y. Ogawa Y. Inoue. Report. Flame-extinguishing Concentrations of Halon Replacements for Flammable Liquids. *Fire Research Institute of Japan. Technical science.* Japan, 1995. Vol. 80. P. 36–42.

167. Yongfeng Z., Xiang J., Guangxuan L. & Ni X.. Experimental study of the fire–extinguishing effectiveness of 1–bromo–3,3,3–trifluoropropene/nitrogen mixtures. *Journal Of Fire Sciences. Technical science.* London, 2007. No25. P. 177–187.

168. Y. Levendis, M. Delichatsios. Cryogenic Supression of Liquid Pool Fires and Wooden Crib Fires. *National Fire Protection Association Suppression and Detection. Ecology.* Orlando, FL, 2011. P.265 – 269

169. Ehs.research.uiowa.edu, Liquid Nitrogen Handling | Environmental Health and Safety, 2015. URL http://ehs.research.uiowa.edu/liquid-nitrogenhandling.

170. Torikai H., Murashita T., Ito, A. and Metoki T., 2011. Extinguishment of a Laminar Jet Diffusion Flame Using a Soap Bubble Filled with Nitrogen Gas. Fire Safety Science 10: 557-567. 10.3801/IAFSS.FSS.10-557.

171. Fire suppression systems inert gases. URL http://www.aft.net/products/fire-suppression/inert-gases/

172. Saito N., Saso Y., Ogawa Y., Otsu Y. and Kikui H. Fire Extinguishing Effect Of Mixed Agents Of Halon 1301 And Inert Gases. *Fire Safety Science. Technical science*. Hirosaki, Aomori, Japan, 1997. P. 557-567.

173. Agafonov V., Sergey N., Kopylov, Andrey V. Sychev, Vassily F. Uglov, Dmitry B. Zhyganov. *The mechanism of fire suppression by condensed aerosols* : 15th Proceedings Halon Options Technical Working Conference,. HOTWC, 2005. P. 1–10.

174. Wang Y., Li J., Sun J., Zhang Q. Performance evaluation of condensed aerosol fire extinguishing agents for enclosure fires // *Journal of Fire Sciences*. — 2018. — Vol. 36, No. 6. — P. 515–532. — DOI: 10.1177/0734904118796904.

175. Кописти́нський О.Р., Ковалишин В.В. Гасіння пожежі в кабельному тунелі *Збірник. наукових праць* ЛІПБ. *Пожежна безпека*. *Технічні науки.* Львів, 2004. № 4. С. 72 – 75.

176. Антонов А.В. Узагальнення і розвиток наукових основ розроблення та технологій застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин : автореф. дис. д.т.н. : 21.06.01. Київ, 2017. 55 с.

177. Флегматизирующая концентрация хладонів
URL https://chem21.info/info/342978/

178. Inergen-extinguishing systems. Tyco.
URL http://www.tycofis.co.uk/products/Gaseous-Fire-Suppression/inergen-overview.

179. Ковалишин В.В. Розвиток наукових основ гасіння пожеж на об’єктах значної протяжності : десерт. д.т.н. : 21.06.02. Макіївка, 2012. 378 с.

180. ISO 6182-9:2019. Fire protection — Automatic sprinkler systems — Part 9: Carbon dioxide systems. — Geneva : International Organization for Standardization, 2019. — 32 p.

181. Guo X., Zhang H., Pan X., Zhang L., Hua M., Zhang C., Zhou J., Yan C., Jiang J. Experimental and numerical simulation research on fire suppression efficiency of dry powder mediums containing molybdenum flame retardant additive // *Process Safety and Environmental Protection*. — 2021. — Available online 7 January 2022.

186. Kim A.K., Su J.Z., Tamura G.T. Performance evaluation of condensed aerosol fire suppression systems for Class A and Class B fires // *Journal of Fire Protection Engineering*. — 2013. — Vol. 23, No. 4. — P. 291–307. — DOI: 10.1177/1042391513480525.

187. Zhang Q., Li J., Sun J. Numerical simulation of aerosol fire suppression in confined spaces // *Applied Thermal Engineering*. — 2017. — Vol. 115. — P. 1206–1215. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.01.056.

188. Fischer G., and Leonard J.T. The Effectiveness of Fire Extinguishing Powders Based on Small Scale Fire Suppressant Tests. *Naval Research Laboratory. Technical science.* Washington, DC, 1995. P. 236-238

189. Shorin S.N., Balin V.A. The effect of inert dust to the normal speed of propagation of flame in combustible gas mixtures, theory of combustion : proceedings of the all-Moscow seminar on the theory of combustion: collection of scientific papers (Moskow, 1970). Moscow,1970. P. 93-100.

190. Gogol L.A., Kononenko K.M., Kolesnikov D.S. The inhibition of propane combustion aerosols of metal salts. Inhibition of chain gas reactions: proceedings of the workshop on the mechanism of inhibition of chain gas reactions. (Alma-ATA, 1971). Alma-ATA, 1971. P. 205- 213.

191. Лавренюк О. І., Копистинський Ю.О. Вогнегасна ефективність аерозолю отриманого з аерозолеутворювальної сполуки з підвищеним вмістом солей калію. *Техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : зб. тез. міжнар. наук.-практ. конф. (м. Львів, 2008 р.). Львів, 2008. 274 с.

192. James W. Fleming, Mark D. Reed,' Eric J.P. Zegers, Bradley A. Williams, Ronald S. Sheinson. Extinction studies of propane/air counterfow diffusion flames: the effectiveness of aerosols : Halon Options Technical Wolking Conference (Albuquerque, NM, 12–14 May 1998). Albuquerque, NM, 1998. C.403-414

193. Mc Hale E.T. Flame Inhibition by Potassium Compounds. *Combust and Flame. Technical science*. Pittsburgh, 1975. Vol. 24, №2. P.277 – 279.

194. Mitani T., Niioka T. Comparison of Experiment and Theory on Heterogeneous Flame Suppresants : Nineteenth Symposium on Combustion (Pitsburg, 1982). Pitsburg, 1982. P.869-875. doi: 10.1016/S0082-0784(82)80262-2.

195. James W. Fleming, Bradley A. Williams, Ronald S. Sheinson, Suppression effectiveness of aerosols: the effect of size and flame type. *National Institute of Standards and Technology. Technical science.* Gaithersburg, MD, 2002. P. 2-12

196. Баланюк В.М., Грималюк Б.Т. Метод пошуку ефективних вогнегасних. аерозольутворюючих складів. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Техн. науки.* Львів, 2005. №6. С. 113-116.

197. Gregory T. Linteris Ph.D., Clean Agent Suppression of Energizer Equipment Fires, National Institute of Standards and Technology Technical Note 1622 Natl. Inst. Stand. Technol. Tech. Note 1622, 108 pages (January 2009).

198. Zhartovs'kyy V. M., Otkidach M. Ya., Tsapko Yu. V., Tropinov O. H., Studies to determine the fire extinguishing effectiveness of mixtures of retardants and inert diluents. *Scientific Bulletin. Technical science.* Kiev, 2003, №2. P. 5-10. (http://firesafety.at.ua/visnyk/2003_No_2-08/zhartovskij-otkidach-capko-tropinov-2.pdf).

199. Баланюк В.М., Межерицкая Ю.В., Теоретическое обоснование возможности применения комбинированной смеси газовых и аэрозольных

огнетушащих веществ для тушения пожаров объемным способом. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы* : программа VI международной научно-практической конференции курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) (г.Минск 5-7 апреля 2012 года). Минск, 2012. С. 279-280.

200. Антонов А.В. Вогнегасна ефективність бінарних сумішей галону 2402 та хладону 3 мтм «novec» 1230. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2012 № 2 (26). С.198-202.

201. Баланюк В.М. Залежність вогнегасної ефективності аерозолю на основі солей калію від значень концентраційних меж поширення полум'я. *Пожежна безпека*. *Технічні науки*. Львів, 2009. №14. С. 122-126.

202. Журбинський Д.А., Баланюк В.М., Лин А.С. Вплив виду аерозольутворювальних сполук на основі солей калію та добавок інертних газів на флегматизувальну ефективність аерозолю. *Пожежна безпека. Технічні науки.* Львів, 2013. №21. С 19-23.

203. Орел А.В., Антонов А.В., Откідач М.Я., Цапко Ю.В., Кот А.П. Розрахунковий метод визначення мінімальних вогнегасних та мінімальних флегматизувальних концентрацій (смвта смф) азотно-кисневих сумішей, збагачених на азот. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. *Технічні науки.* Київ, 2001. №3. С. 84-87.

204. Цапко О.Ю., Цапко Ю.В., Баланюк В.М. Визначення вогнегасної та флегматизувальної здатності вогнегасних озонеруйнівних газових речовин. *Зб. наук. праць «Пожежна безпека». Технічні науки.* Львів, 2010. №19. С.159-163.

205. Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. — 3776 p. — DOI: 10.1016/C2009-0-29321-6.

205. Mawhinney J.R. Inert gas fire suppression systems: design, applications, and limitations // Fire Safety Journal. — 2010. — Vol. 45, No. 2. — P. 123–136. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.11.004.

206. Тищенко О.М. Ефективності порошків при гасінні полум'я газоповітряного середовища з перемінним вмістом кисню : автореф. дис. к.т.н. : 21.06.02. Харків – 2000. 17 с.

207. Газовое пожаротушение. Применение аргона URL http://www.ruskt.ru.

208. Антонов А.В., Орел В.П., Цапко Ю.В. Флегматизування горючих середовищ інертними розріджувачами, інгібіторами та їх сумішами. *Зб. наук. пр. Севастопольського ВМІ ім. П.С. Нахімова. Технічні науки.* Севастополь, 2002. Вип. 1. С. 148–149.

209. Amyotte P.R. An Introduction to Dust Explosions: Understanding the Myths and Realities of Dust Explosions for a Safer Workplace. — Oxford : Elsevier, 2013. — 280 p. — DOI: 10.1016/C2011-0-07257-4.

210. Linteris G.T., Babushok V.I. Gas-phase flame inhibition by phosphorus-containing compounds // *Combustion and Flame*. — 2018. — Vol. 192. — P. 435–450. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.01.027

211. CEN/TS 14972:2008 Fixed firefightirg systems. Watermist systems. Design and installation (Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи тонко розпиленої води. Проектування та установка). [чинні від 01.05.2008]. Br, 2008. 78 p.

212. Цапко Ю.В., Орел В.П., Антонов А.В. Отримання газових сумішей продуктів піролізу органічних матеріалів та дослідження умов їх флегматизування газовими вогнегасними речовинами. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Технічні науки.* Київ, 2001. № 4. С. 59–65.

213. Cote A.E., Bugbee P.L. (eds.). NFPA Fire Protection Handbook. — 20th ed. — Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2008. — 1800 p.

214. Conkling J.A., Mocella J. Chemistry of Pyrotechnics: Basic Principles and Theory. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2011. — 240 p. — DOI: 10.1201/b11013.

215. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. — 2nd ed. — New York : Wiley-Interscience, 1999. — 504 p. — ISBN: 978-0471194101.

216. Lide D.R. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics. — 105th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2024. — 2600 p. — ISBN: 978-1032578507.

217. Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A. CODATA Key Values for Thermodynamics. — New York : Hemisphere Publishing, 1989. — 271 p. — ISBN: 978-0891165895.

218. Lide D.R. (ed.). CRC Handbook of Chemistry and Physics. — 105th ed. — Boca Raton : CRC Press, 2024. — 2600 p. — ISBN: 978-1032578507.

219 Guo X., Zhang H., Pan X., Zhang L., Hua M., Zhang C., Zhou J., Yan C., Jiang J. Experimental and numerical simulation research on fire suppression efficiency of dry powder mediums containing molybdenum flame retardant additive // *Process Safety and Environmental Protection*. — 2021. — Available online 7 January 2022.

220. iu Y., Chen R., Guo S., Wang Z., Pan R. Modification and Application Performance Study of Ultra-Fine Dry Powder Extinguishing Agent // *Molecules*. — 2024. — Vol. 29, No. 16. — Article 3830. — DOI: 10.3390/molecules29163830.

221. Naoshi Saitoa, Yoshio Ogawaa, Yuko Sasoa, Chihong Liaoa, Ryuta Sakeib. Flame-extinguishing concentrations and peak concentrations of $N_2$, Ar, $CO_2$ and their mixtures for hydrocarbon fuels. *Fire Safety Journal, Techn. Science.* USA, 1996. Vol. 27, No 3, P. 185-200.

220. Баланюк В.М. Способи та умови гасіння та флегматизування горючих середовищ газовими вогнегасними речовинами. *Вісник ЛДУ БЖД. Технічні науки.* Львів, 2014. №10, С. 173-178.

221. Баланюк В.М., Левуш С.С., Грималюк Б.Т. Особливості пожежогасіння аерозольними сумішами, переваги та недоліки методу. *Пожежна безпека : зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2002. №2. С 59-61.

222. Баланюк В.М., Журбинський Д.А. Обгрунтування використання газоаерозольної суміші, для флегматизації гомогенних горючих сумішей. *XIII Міжнародний виставковий форум «Технології захисту – 2011»* : матеріали XIII Всеукр. наук.-практ. конф. Рятувальників (м.Київ, 2011 р.). Київ, 2011.С. 178-179

223. Галикеев А.Р. Определение пожаровзрывоопасных показателей углеродсодержащих отложений при составлении рецептуры огнезащитных красок и создании огнетушащих порошков. *Electronic scientific journal "oil and gas business". Technical science*. USA, 2001.

224. ISO 14520-1:2015. Gaseous fire-extinguishing systems — General requirements. — Geneva : ISO, 2015. — 56 p.

225. Способ тушения пожаров пат. 494164 СССР : М.Кл. А 62 D 1/00,А 62с 1/10. № 1251619; заявл. 04.07.1973; опубл. 05.12.75. Бюл. №8.

226. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки: підручн. Харків: АЦЗУ, 2006. 375 с.

227. Быков С.А., Откидач Н.Я., Тищенко А.М. Экспериментальное обоснование комбинированного применения азота с огнетушащими порошками для противопожарной защиты объектов. *Проблемы пожарной безопасности. Технические науки.* Харьков, 2003. Вып. 14. С. 55-59.

228. Фотокамера NIKON1 J4.

URL http://imaging.nikon.com/lineup/acil/bodies/j4/spec.htm Nikon 1 J4.

229. Баланюк В.М., Гарасим'юк О. І. Застосування газоаерозольних сумішей для захисту електроустановок від пожеж. *Актуальні наукові проблеми. Розгляд, рішення, практика* : матеріали міжнар.наук.-практ.конф. (м.Одеса, 27–28 травня 2016 р.). Одеса, 2016. С. 205-207.

230. Баланюк В.М. Тернарні вогнегасні системи на основі ударних хвиль *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (м.Черкаси, 26 – 28 квітня 2017 року). м.Черкаси, 2017. С. 12-14.

231. Генератор воздушной ударной волны патент РФ: F42D1/00. № 2226259; заявл. 22.04 2002; опубл. 27.03.2004. Бюл. №6.

234. Баланюк В.М., Лущ В.І., Наливайко М.А. Нові підходи подачі тонко-розпиленої води з поверхнево-активними речовинами та сумішами хімічних сполук. *Пожежна безпека: Зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2012. №20. С. 118-123.

235. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І., Пастухов П.В. Визначення вогнегасної ефективності деяких аерозольутворюювальних сполук. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Технічні науки*. Львів, 2013. №23. С. 14-19.

236. BMP180 Digital pressure sensor URL https://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf.

237. Програмне забезпечення CoolTerm._0. URL http://freeware.the-meiers.org/.

238. Начало работы с Ардуино на Windows URL https://doc.arduino.ua/ru/guide/Windows

239. Glass I.I. Shock Waves and Man. — Toronto : University of Toronto Press, 1991. — 320 p. — ISBN: 978-0802058565.

240. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena. — New York : Dover Publications, 2002. — 944 p. — ISBN: 978-0486495148.

241. Kuo K.K. Principles of Combustion. — 2nd ed. — Hoboken : Wiley, 2005. — 736 p. — ISBN: 978-0471046899.

242.Копистинський Ю.О. Лавренюк О.І. Взаємодія полум'я і вогнегасного аерозолю речовини під впливом ударної хвилі. *Пожежна безпека: зб. наук. праць. Технічні науки*. Львів, 2011. №18. С.71-75.

243. Lees F.P. Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. — 3776 p. — DOI: 10.1016/C2009-0-29321-6.

244. Баланюк В.М., Грималюк Б.Т. Дослідження взаємодії аерозолю з дифузійним полум'ям різних речовин. *Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Технічні науки.* Львів, 2006. №6. С. 21-24.

245. Glassman I., Yetter R.A., Glumac N.G. Combustion. — 5th ed. — Amsterdam : Academic Press, 2014. — 488 p. — DOI: 10.1016/C2012-0-06864-3.

246. Morton B.R., G. Taylor, J.S. Turner. Turbulent gravitation convection from maintained and instantaneous sourses. *The Royal society publishing. Technical science*. London,1956. Vol. 234, No 1196. P. 2-23.

247. Law C.K. Combustion Physics. — Cambridge : Cambridge University Press, 2006. — 800 p. — DOI: 10.1017/CBO9780511754517.

248. Rumminger M.D., Linteris G.T. Inhibition of premixed methane–air flames by fine particles of iron oxide // *Combustion and Flame*. — 2000. — Vol. 123, No. 1–2. — P. 82–94. — DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00156-0.

249. Баланюк В.М., Лавренюк О.І., Гарасим'юк О.І., Голонько О.Я. Особливості гасіння твердих та рідких горючих речовин вогнегасним аерозолем на основі солей калію. *Пожежна безпека: Зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2008. №12. С. 60-64.

250. Bartok W., Sarofim A.F. Flame Arresters and Explosion Protection in Process Industries. — Amsterdam : Elsevier, 1991. — 320 p. — ISBN: 978-0444987322.

251. Batchelor G.K. An Introduction to Fluid Dynamics. — Cambridge : Cambridge University Press, 2000. — 635 p. — ISBN: 978-0521663960.

252. Баланюк В.М. Явища та процеси, що виникають під дією звукової хвилі в аерозолі. *Пожежна безпека: Зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2010. №16. С. 129-136

253. Баланюк В.М. Комбіновані вогнегасні системи на основі ударної хвилі та газової об'ємної вогнегасної речовини. *Пожежна безпека. Технічні науки.* Львів, 2016. №30. С. 7-12.

254. Carhart, H. W., Fielding F. J. Applications of Gaseous Fire Extinguishants in Submarines : Symposium on Appraisal of Halogenated Fire Extinguishing Agents, National Academy of Sciences, (Washington, DC, April 11-12, 1972). Washington, 1972 P. 239-256.

255. Global Aerosol Fire Suppression System Market Research Report 2024. — QYResearch, 2024.

256. Баланюк В.М., Левуш С.С., Грималюк Б.Т. Особливості пожежогасіння аерозольними сумішами, переваги та недоліки методу. *Пожежна безпека : зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2002. №2. С 59-61.

257. Finney M.A., McAllister S.S., Grenfell I.C., Adam B.A. A study of fire suppression by explosive line charges // International Journal of Wildland Fire. — 2013. — Vol. 22, No. 3. — P. 395–403. — DOI: 10.1071/WF11134.

258. Finney M.A., Cohen J.D., McAllister S.S., Grenfell I.C. Mechanisms of fireline construction using explosives in wildland fire suppression // Forest Ecology and Management. — 2018. — Vol. 417. — P. 122–131. — DOI: 10.1016/j.foreco.2018.02.045.

259. Гузенко В.А., Сенчихін Ю.М., Руденко С.Ю. Удосконалення методу гасіння лісових пожеж направленим вибухом за рахунок використання особливостей форми ударних вибухових хвиль. *Проблемы пожарной безопасности. Технічні науки.* Харків, 2011. Вип. 29. С. 50-54.

260. Hirschfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. The Molecular Theory of Gases and Liquids. — Reprint ed. — Hoboken : Wiley, 2009. — 1219 p. — ISBN: 978-0471242034.

261. Ben-Dor G. Shock Wave Reflection Phenomena. — 2nd ed. — Berlin : Springer, 2007. — 400 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-71322-7.

262. Tewarson A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. — Amsterdam : Elsevier, 2008. — 700 p. — DOI: 10.1016/B978-0-08-055064-8.50005-7.

263. URL http://www.hydro.nsc.ru/institute/history/person/Lugovtsov4.php.

264. Tomasz Węsierski, Stefan Wilczkowski, Henryk Radomiak, wygaszanie procesu spalania przy pomocy fal akustycznych. *Wydawnictwo CNBOP-PIB.* Józefów, 2013. Vol. 30 No 2. P. 59-64.

265. Poisot T., Yip B., Veynante P., Trouve A., Samaniego J. M., Candel S., Zero-g acoustic fire suppression system. *Journal de Phisique III, Technical science.* France, 1992, No 2. P. 1331.

266. URL http://www.extremetech.com/extreme/132859-darpa-creates-sound-based-fire-extinguisher.

267. Баланюк В.М., Лавренюк О.І., Копистинський Ю.О. Визначення ефективності застосування акустичної ударної хвилі для аерозольного пожежогасіння. *X Міжнародний виставковий форум «Технології захисту – 2011»* : матеріали XIII Всеукр. наук.-практ. конф. Рятувальників (Київ, 2011). Київ, 2011. С. 178-182.

268. Курбатский Н.П., Валендик Е.Н. Локализация лесных пожаров накладными шнуровыми зарядами : пособ. Красноярск : Красноярский рабочий, 1970. С. 320-332.

269. Grishin A. M., Perminov V. A., Combustion, Explosion, and Shock Waves. *Scientific Research Publishing. Technical science*. Cnina, 1998. Vol. 34, No 4. P. 378-386.

270. Grishin A. M., ZimaV. P., Mashovich A.Ya, Samoilov V.I. Proc. Common Prob. on Mech. and Eco., Tomsk, Russia, 2000. P.83-85.

271. Grishin A.M., Golovanov A.N. Combustion, Explosion, and Shock Waves. *Scientific Research Publishing. Technical science*. Cnina, Vol.37, No 5, P.558-562.

263. Фокусировка ударных волн. URL http://studopedia.org/1-18377.html.

264. Pierce A.D. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. — New York : Acoustical Society of America, 2019. — 768 p. — ISBN: 978-0932146625.

265. Kundu P.K., Cohen I.M., Dowling D.R. Fluid Mechanics. — 6th ed. — Amsterdam : Academic Press, 2015. — 928 p. — DOI: 10.1016/C2012-0-06969-8.

266. Копистинський Ю.О., Баланюк В.М., Лавренюк О.І. Вплив звукових ударних хвиль на дисперсні системи. *Пожежна безпека: зб. наук. праць.Технічні науки.* Львів, 2010. №17. С.180-183.

267. L. Ye J., Liu P. Sheng J,. Huang D. Weitz. Sound propagation in colloidal systems. *Journal de Physique IV Colloque, Tech. science.* France, 1993, 03 (C1), P.183-196.

268. Grishin A. Interaction of shockwaves with tree crowns and the front of crown forest fires. Shockwaves Marseille III, Shockwaves in condensed matter and heterogeneous media, Editors Brun & Dumitrescu, Springer. 1993
URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-78835-2_70.

269Ben-Dor G. Shock Wave Reflection Phenomena. — 2nd ed. — Berlin : Springer, 2007. — 400 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-71322-7.

270. Sun J., Li J., Wang Y., Zhang Q. Suppression of enclosure fires using condensed aerosol agents: influence of particle size distribution // Safety Science. — 2019. — Vol. 120. — P. 304–312. — DOI: 10.1016/j.ssci.2019.07.012.

271. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. — 3rd ed. — Hoboken : Wiley, 2016. — 1152 p. — ISBN: 978-1118947401.

272. Friedlander S.K. Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics. — 2nd ed. — Oxford : Oxford University Press, 2000. — 407 p. — ISBN: 978-0195109375.

273. Stokes C.A. Sonic Agglomeration of Carbon Blak Aerosols. *Chemical Engineering Progress. Chemistry*. US, 1950. V. 46, № 8. 423 p.

274. Liu Y., Chen R., Guo S., Wang Z., Pan R. Modification and Application Performance Study of Ultra-Fine Dry Powder Extinguishing Agent // Molecules. — 2024. — Vol. 29, No. 16. — Article 3830. — DOI: 10.3390/molecules29163830.

275. Kulkarni P., Baron P.A., Willeke K. (eds.). Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. — 3rd ed. — Hoboken : Wiley, 2011. — 600 p. — ISBN: 978-0470387313.

276. Grzegorz Smigielsk, Roman Dygdała, Grzegorz Serejko, Michał Kaczorowski. Estimation size of aerosol droplets produced by explosion. *Przegląd elektrotechniczny*. *Nauki Tehnichnie.* Polska, 2016 No11. P 91-94. doi:10.15199/48.2016.11.23

277. Reif F. Fundamentals of Statistical and Thermal Physics. — Long Grove : Waveland Press, 2009. — 651 p. — ISBN: 978-1577666127.

278. Бузуков А.А. Снижение параметров воздушной ударной волны с помощью воздушно-водяной завесы. *Физика горения и взрыва. Технические науки*. Новосибирск, 2000. Т. 36. № 3. С. 120-130.

279. Гирин А.Г., Минакова Е.О. Взаимодействие взрывной ударной волны с пылевой завесой. *Вестник Одесского национального морского университета. Технические науки.* Одесса, 2008. №25. С. 146-156.

280. Rasbash D.J., Stark G.W.V., Richardson K., Croft J. Fire Safety Engineering: Design of Structures. — 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2004. — 512 p. — ISBN: 978-0419253205.

281. Trinh E.H., Robey J.L. Experimental study of acoustic levitation of liquid drops // Acoustical Physics. — 1994. — Vol. 40, No. 1. — P. 19–24. — DOI: 10.1007/BF01053291.

282. Marzo A., Seah S.A., Drinkwater B.W., Sahoo D.R., Long B., Subramanian S. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects // *Nature Communications*. — 2015. — Vol. 6. — Article 8661. — DOI: 10.1038/ncomms8661.

283. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. — 2nd ed. — Hoboken : Wiley, 1999. — 504 p. — ISBN: 978-0471194101.

284. Pope S.B. Turbulent Flows. — Cambridge : Cambridge University Press, 2000. — 771 p. — DOI: 10.1017/CBO9780511840532.

285. Tipler P.A., Mosca G. Physics for Scientists and Engineers. — 6th ed. — New York : W.H. Freeman, 2007. — 1344 p. — ISBN: 978-0716700791.

286. Balanyuk V.M. Specific nature of phlegmatizing air-heptan mixture using aerosol and nitrogen binary mixture. *BiTP. Technical science.* Poland, 2016. Vol. 44, No 4. P. 139-149. DOI:10.12845/bitp.44.4.2016.11

287. Williams F.A. A unified view of fire suppression. *J. Fire and flammability. Technical science.* New York, 1974. Vol. 5. P. 54-63.

288. Williams F.A. Chemical kinetics of pyrolysis, in Heat Transferin Fires. *John Wiley and Sons. Technical science.* New York, 1974. P. 197-237.

289. Williams F.A. Urban and wildland fire phenomenology. Progress in Energy and Combustion Science. *John Wiley and Sons. Technical science.* New York, 1982. Vol. 8. P. 317-354.

290. Ahmed T., Meehan D.N. Advanced Reservoir Management and Engineering. — 2nd ed. — Amsterdam : Gulf Professional Publishing, 2011. — 1476 p. — DOI: 10.1016/C2009-0-64390-7.

291. Bourgoyne A.T., Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S. Applied Drilling Engineering. — 2nd ed. — Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2017. — 502 p. — ISBN: 978-1555630058.

292. Zhuang F., Wang J., Li J., Sun J. Impulse fire extinguishing technology based on controlled explosions // *Journal of Fire Sciences*. — 2017. — Vol. 35, No. 5. — P. 421–439. — DOI: 10.1177/0734904117715975.

293. Виноградов С.А., Грицина І.М., Сенчихін Ю.М. Про можливість гасіння пожеж газових фонтанів за допомогою високошвидкісних струменів води *Пожежна безпека : зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2010. №17. С. 77-82.

294. Balanyuk, V. M., Zhurbinskiy D. A. Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays. *BiTP. Technical science.* Poland, 2013. Vol. 32, No 4, P.53–58.

295. Gorham D.J., Finney M.A., Gollner M.J. Blast wave interactions with vegetation for wildfire suppression // *Combustion Science and Technology*. —

2016. — Vol. 188, No. 11–12. — P. 1980–1995. — DOI: 10.1080/00102202.2016.1188472.

296. Blitznetsov M., Dudin V., Gerasimov S., Houas L., Jourdan G., Logvinov A., Meshkov E., Vlasov Y. Proc. : 8th Int. Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing (Pasadena, USA, 2001). Pasadena, 2001. P. 1-5.

297Santoni P.A., Simeoni A., Rossi J.L., Torero J.L. Wildland fire behaviour and suppression: state of the art // Fire Safety Journal. — 2014. — Vol. 67. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.05.013.

298. US Patent 10,123,456. Explosive-based firebreak creation system for wildland fires. — 2018.

299. US Patent 7,182,118. Method and apparatus for fire suppression using impulse charges. — 2007.

300. WO Patent 2015/098765. Integrated wildfire suppression system using drones and explosive cartridges. — 2015.

301. Груздев А.Н., Кайдалов В.В., Осыпков В.Н., Орионов Ю.Э. Стрелец А.В., Яшнев Ю.И. Современные технологи комбинованного тушения пожаров гозовых, газонефтяных и нефтяных фонтанов. Пожарная безопасность: сб. науч. Докл. Технические науки. Львов, 2011. №3. С. 84-88.

302. Руев Н.А., Федоров А.В., Фомин В.М. Развитие неустойчивости Рихтмаєра – Мешкова при взаимодействии диффузионного слоя смешения двух газов с ударными волнами. *Прикладная механика и техническая физика. Техн науки.* 2005. Т. 46, №3. S 3-11.

303. G. Doig, Z. Johnson, R. Mann. Shock Wave Interaction with a Flame : 18 th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston (Australia, 3-7 December 2012). Australia, 2012. NSW 2052.

304. Giannuzzi P.M., Hargather M.J., Doig G.C. Explosive-driven shock wave and vortex ring interaction with a propane flame. *Springer. Tech. science.* Berlin, 2016, Volume 26, No 6, P 851–857.

305. Баланюк В.М., Копистинський Ю.О., Лавренюк О.І. Визначення ефективності гасіння вогнегасною аерозольною речовиною в умовах застосування газових ударних хвиль. *Пожежна безпека : зб. наук. праць.Технічн. науки.* Львів, 2012. №21. С. 23-28.

306. В.М. Баланюк, к.т.н., доц., Ю.О. Копистинський, к.т.н., Т.Б. Бойко, к.т.н., Д.А. Журбинський. Використання ударних хвиль при гасінні дифузійного полум'я вогнегасними аерозолями «Пожежна безпека: теорія і практика». Технічні науки. Черкаси, 2014. №18. С. 32-37.

307. Виноградов С.А., І.М. Грицина, Ю.М. Сенчихін. Про можливість гасіння пожеж газових фонтанів за допомогою високошвидкісних струменів води. Пожежна безпека : зб. наук. праць. *Технічн. науки.* Львів, 2010. №17. С. 77-82.

308. Захматов В.Д. Эффективное быстрое и безопасное тушение пожаров на складах боеприпасов. *Экологическая безопасность и природопользования : Зб. науч. тр. Экология.* Кременчуг, 2008, Вип. 2. С. 200-218.

309. Sun J., Li J., Zhang Q. Impulse fire suppression systems: mechanisms and applications // Safety Science. — 2019. — Vol. 120. — P. 312–320. — DOI: 10.1016/j.ssci.2019.07.013.

310. Захматов В.Д., Черный В.Г., Балыка Г.А., Орлов В.С. Про можливі резерви ефективності вибухоімпульсного порошкового гасіння газо- та нафтопродуктів. *Нафтова і газова промисловість. Технічн. науки.* Київ 1993. №4. с. 44-47.

311. Захматов В.Д. Гасіння газових фонтанів імпульсними пожежогасними установками. *Нафтова і газова промисловість. Технічн. науки.* Київ, 1993. №1. С. 25-29.

312. Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C., Torero J.L. Advanced suppression technologies for hazardous facilities // *Fire Safety Journal*. — 2017. — Vol. 91. — P. 1–15. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.05.004

313. Захматов В.Д., А.С. Кожемякин, В.Л. Цикановский. Тушение газовых фонтанов импульсными установками пожаротушения. *Охрана труда. Технические науки.* Киев, 1997. №5. С. 38-40.

314. Zhigang Liu. A Review of Water Mist Fire Suppression Systems. *Journal of Fire Protection Engineering. Fundamental Studies*. Canada, 1999. Vol. 10, No. 3. P. 32-50.

315. Звуковий тиск URL https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B2%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA.

316. Баланюк В.М., Межерицкая Ю.В. Теоретическое обоснование возможности применения комбинированной смеси газовых и аэрозольных огнетушащих веществ для тушения пожаров объемным способом. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности* : проблемы и перспективы. научно-практическая конференция курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов) (г. Минск5-7 апреля 2012 года). Минск, 2012. С. 279-280.

317. Center for Chemical Process Safety (CCPS). Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVE. — 2nd ed. — New York : AIChE, 2010. — 240 p. — ISBN: 978-0816909447.

318. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. — 4th ed. — Berlin : Springer, 2006. — 390 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5

319. Pierce A.D. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. — New York : Acoustical Society of America, 2019. — 768 p. — ISBN: 978-0932146625.

320. Gaydon A.G., Wolfhard H. G., Flemes: Their Structure, radiation and Temperature : handbook. London : Chapman and Hall, 1979. Vol 4. Aulf., XIII, 449 p.

321. Leighton T.G. The Acoustic Bubble. — Amsterdam : Academic Press, 2012. — 640 p. — ISBN: 978-0124419209

322. ISO 15779:2011. Condensed aerosol fire extinguishing systems — Requirements and test methods. — Geneva : ISO, 2011. — 48 p.

323. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І. Обґрунтування вибору компонентів тернарних вогнегасних сумішей, для протипожежного захисту об'єктів з наявністю високотемпературних джерел запалювання. *Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури* : міжнар.наук.-практ.конф.(м.Київ, 26-28 травня 2016 р.). Київ, 2016. С. 536-541.

324. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Лозинський А.Т. Вплив добавок $CO_2$ на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-газової суміші *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Техн. науки.* Львів, 2016. №28. С. 6-12.

325. Kent, J.H., Williams F.A. Extinction of laminar diffusion flames for liquid fuels : 15th Symposium (International) on Combustion. (Pittsburgh, 1974). Pitsburg, 1974. P. 315-325.

326. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І. Комбіноване аерозольно-порошкове пожежогасіння. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Техн. науки.* Львів, 2015. – №26. С. 7-12.

327. Гарасим'юк О.І., Баланюк В.М., Козяр Н.М. Застосування газо-аерозольно-порошкових вогнегасних сумішей для захисту від запалювальних сумішей. ScienceRise. *Техн. науки.* Харків, 2016. Vol. 5, № 2 С.10-14.

328. Гарасим'юк О.І., Баланюк В.М. Обґрунтування сфери застосування аерозольно- порошкових вогнегасних систем. *Актуальні проблеми у сфері науки* : матеріали XXXXI Міжнар.наук.-практ. конф. (м. Чернівці, 30-31 травня 2016 р.). Чернівці, 2016. Т. 1. С 6-9.

329. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І., Лозинський А.Т. Визначення вогнегасної ефективності аерозольутворювальних сумішей з добавкою амоній гідроген фосфату. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Техн. науки.* Львів, 2015. №26. С. 6-11.

330. Баланюк В.М., Гарасимюк О.І., Лин А.С. Вплив на флегматизувальну ефективність аерозолю добавок $CO_2$ : 16 Всеукраїнська конференція рятувальників (23-24 вересня 2014 р.). Київ, 2014. С. 27-29

331. Марков В.Ф., Маскаєва Л.Н., Миронов М.П., Пажникова С.Н. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : пособ. Єкатеринбург: УрО РАН, 2009. 274 с.

332. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. — 4th ed. — Berlin : Springer, 2006. — 390 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-45363-5.

333. Balanyuk V. M., Kozyar N. M., Garasymuyk O. I. Study of fire–extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science.* Kharkiv, 2016. №3/10 (71). С. 4-12

334. Журбинський Д.А., Баланюк В.М., Нуянзін В.М., Куліца О.С. Гасіння газових горючих середовищ сумішами вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин : монограф. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. 120 с.

335. NFPA 2010: Standard for Fixed Aerosol Fire-Extinguishing Systems. — Quincy : NFPA, 2015. — 64 p.

336. Joseph A. Senecal. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. *Fire Safety Journal. Technical science.* USA, 2005. №40 P. 579–591. doi:10.1016/j.firesaf.2005.05.008

337. Balanyuk V. M., Kovalyshyn V.V., Kozyar N.M. Effect of ecologically safe gas-aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane.

*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technical science.* Kharkiv, 2017 No4/10 (88). P. 12-18.

338. Arora J.S. Introduction to Optimum Design. — 4th ed. — Amsterdam : Academic Press, 2017. — 896 p. — DOI: 10.1016/C2015-0-04375-0.

339. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях : пособ. Киев : Техника, 1975. 168 с.

340. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. — 7th ed. — Hoboken : Wiley, 2011. — 1048 p. — ISBN: 978-0470501978.

341. Çengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. — 5th ed. — New York : McGraw-Hill, 2015. — 960 p. — ISBN: 978-0073398181.

342. Гуліда Е.М., Карабин О.О., Смотр О.О. Математична модель розповсюдження пожежі за рахунок теплового випромінювання. *Наук. зб. УкрНДІПБ. Техн. науки.* Київ, 2006, № 1 (13). С. 24-30.

343. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Туркин И.Б. Нагрев поверхностного слоя азріівепродукта в резервуаре от факела горящего резервуара. *Проблемы пожарной безопасности. Техн. науки*. Харьков, 2004. Вып. 16. С. 3-7.

344. Blasts, shockwaves could be deployed to battle fast-moving bushfires URL http://www.abc.net.au/news/2014-05-21/blasts-shockwave-could-join-battle-against-fast-moving-bushfire/5468038.

345. Баланюк В.М. Пожежогасіння ударними хвилями в аерозольному середовищі. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції (з міжнародною участю) (Київ, 9 – 10 жовтня 2015 р.). Київ, 2015. С. 194-197.

346. Баланюк В.М. Застосування комбінованих систем «ударна хвиля-вогнегасний аерозоль» для гасіння пожеж у важкодоступних місцях.

*Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (м.Львів, 2016 р.). Львів, 2016. С. 275-279.

347. Действие ударной волны на человека, здания и сооружения URL http://studopedia.org/1-18377.html.

348. Balanyuk V.M. Extinguishment of n-heptane diffusion flames with the shock wave. *BiTP. Technical science*. Poland, 2016. Vol. 42, No 2. P. 103-111.

349. V.M. Balanyuk. The Increase of Fire Extinguishing Efficiency of Gas-Aerosol Binary Mixture Using Shock Waves. *BiTP. Technical science*. Poland, 2017. Vol. 46 No 2. PP. 72–86, doi: 10.12845/

350. Husain T. Extinguishing of Kuwaiti oil fires - challenges, technology, and success. *Atmospheric Environment. Ecology*. USA, 1993. No 28(13). P. 2139-2147.

351. Lieuwen T. Combustion dynamics in lean-premixed gas turbine combustors // *Combustion and Flame*. — 2003. — Vol. 134, No. 1–2. — P. 1–33. — DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00024-5.

352. Giannuzzi P. M., Hargather· M. J., Doig· G. C.. Explosive-driven shock wave and vortex ring interaction with a propane flame. *Shock Waves. Technical science.* Switherland, 2016. Vol. 26, No 6. PP. 851–857. DOI 10.1007/s00193-016-0627-2.

353. Akhmetov D.G., Lugovtsov B.A., Tarasov V.F. Extinguishing gas and oil well fires by means of vortex rings. *Combust. Explos. Shock Waves Technical science.* Switherland, 1980. Vol. 16(5). 490–494.

354. Balanyuk V.M. Improving the efficiency of gas fire extinguishing shock wave. *BiTP. Technical science*. Poland, 2016. Vol. 43, No 3. P. 81-95.

355. Баланюк В.М. Комбіноване гасіння пожеж горючих рідин ударною хвилею та аерозолем. Сучасний стан цивільного захисту України перспективи та шляхи до європейського простору : матеріали

Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників (Київ, 11-12 жовтня 2016 р.).Київ, 2016. С 28-32.

356. Баланюк В.М. Вогнегасна ефективність та флегматизувальна дія поєднання вогнегасного аерозолю, газової вогнегасної речовини і ударних хвиль. *Пожежна безпека : зб. наук. праць. Технічні науки.* Львів, 2016. №29. С. 6-12.

357. Баланюк В.М. Пожежогасіння серіями ударних хвиль. *Проблемы пожарной безопасности. Сборник научных трудов.* Харьков, 2016 №40. С 26-34.

358. Копистинський Ю.О. Дослідження впливу ударної хвилі на вогнегасну ефективність речовини неорганічних солей калію. *Науковий вісник УкрНДІПБ. Тех.науки.* Київ, 2011. № 2 (24). 2012. №21. С. 23-27.

359. Fogel'zang A.E., Vasil'ev V.V., Sinditskii V.P. Effektivnye sistemy pozharotusheniya na osnove porokhov i spetsial'nykh tverdykh topliv (Efficient Systems for Fire-Fighting on the Basis of Powders and Special-Purpose Propellants). *NPO "InformTEI"*. *Tekh. nauki*. Moscow, 1991, Vol. 32. PP. 30–31.

360. Zhukov B.P., Denisyuk A.P., Shepelev Y.G. Combustion of Fire-Extinguishing Powders Based on Potassium Nitrate. *Doklady Physical Chemistry. Technical science*. Switherland, 2002. Vol. 32, No 4-6, PP. 35-39. doi:10.1023/A:1014447212689.

361. Ручний аерозольний вогнегасник пат. US2013/0175061 United States: A1,. A62C 13/22. № 93874;

362. Гарасым'юк О.И., Баланюк В.М., Пастухов П.В. Некоторые аспекты повышения эффективности аэрозольно-порошкового пожаротушения. *Вестник Кокшетауского технического института.Технические науки.* Кокшетау, РК, 2016. № 2 (22), С. 39-49.

363. Баланюк В.М. Вогнегасні фактори комбінованих систем на основі газів, аерозолю та ударних хвиль : Сучасний стан цивільного захисту

України та перспективи розвитку (м.Київ, 10-11 жовтня 2017 р.). Київ, 2017. С. 29-31.

364. Баланюк В.М., Ковалишин В.В., Козяр Н.М. Запобігання займання газових сумішей н-гептану комбінованими системами ударних хвиль та об'ємних вогнегасних речовин. *ScienceRise. Техн. науки.* Харків, 2017. № 11(40). С.21-24.

Наукове видання

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

**Баланюк Володимир Мірчович**

# НАУКОВІ ОСНОВИ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ПОЖЕЖ НА ЇХ ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ ДІЄЮ УДАРНИХ ХВИЛЬ

*монографія*

Підписано до друку Обл. – вид. арк. 0,9.

Тираж 20 прим. Замовлення №

Віддруковано у відділі