

МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ
ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

БАЛАНЮК ВОЛОДИМИР МІРЧОВИЧ



УДК 504.055 + 614.841.1

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ПОЖЕЖ НА ЇХ
ПОЧАТКОВІЙ СТАДІЇ ДІЄЮ УДАРНИХ ХВИЛЬ**

**Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека
21.06.02 – пожежна безпека**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Ковалишин Василь Васильович,
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, завідувач кафедри ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Костенко Віктор Климентович,
Донецький національний технічний університет МОН України, завідувач кафедри природоохоронної діяльності.

доктор технічних наук, доцент **Кіреєв Олександр Олександрович**, професор кафедри спеціальної хімії та хімічної технології Національного університету цивільного захисту України.

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Чумаченко Сергій Миколаєвич,
завідувач кафедри інформаційних систем факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій МОН України.

Захист відбудеться «16» травня 2019 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2 та на сайті www.dea.edu.ua

Автореферат розіслано «15» квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Іващенко Т.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За останні п'ять років в Україні щороку трапляється понад 70000 пожеж, на яких загинуло понад 10000 осіб. Як відомо, внаслідок пожеж та застосування для їх ліквідування вогнегасних речовин, деякі з яких є екологічно небезпечними, завдається значна шкода довкіллю, зокрема продуктами повного та неповного згоряння та продуктами реакцій вогнегасних речовин з газовим горючим середовищем та нагрітими поверхнями у зоні пожежі. При цьому забруднюється атмосферне повітря, у тому числі парниковими газами та озоноруйнівними речовинами, знищується або пошкоджується біота, забруднюються ґрунти, водойми, поверхневі та ґрунтові води. На теперішній час в Україні для гасіння пожеж та в системах протипожежного захисту об'єктів різного призначення застосовуються майже всі види сучасних вогнегасних речовин, які більшою або меншою мірою забезпечують реалізацію таких чинників припинення горіння як охолодження, інгібування, флегматизування, ізолювання або їх комбінацій.

Пошукам шляхів забезпечення ефективності систем пожежогасіння були присвячені наукові дослідження, які висвітлені в роботах, зокрема: А. М. Баратова, В. В. Агафонова, М. П. Копилова, А. В. Антонова, В. М. Алікіна, Д. А. Корольченка, В. Г. Коростильова, П. С. Пашковського, В. К. Костенка, В. В. Ковалишина, О. О. Кіреєва, В. М. Жартовського, Ю. О. Абрамова, В. Д. Захматова, О. А. Тарасенка, С. В. Росохи, О. Г. Тропінова, В. М. Апановича, М. В. Білошицького, Ю. В. Цапка, В. О. Дунюшкіна, О. О. Сізікова, С. Ю. Огурцова, В. О. Боровикова, та ін. У згаданих роботах основна увага приділялась хімічним засобам пожежогасіння (вода, піна, вогнегасні порошки, газові вогнегасні речовини, вогнегасні аерозолі), у той час, як фізичні чинники впливу на процеси припинення горіння досліджувались значно рідше, або взагалі не розглядались.

Відомо, що початкова стадія пожежі зазвичай характеризується найбільшою чутливістю до впливу будь-яких чинників припинення горіння. У разі ліквідації пожежі на такій стадії її розвитку, значно зменшується тривалість горіння, як і обсяги викидів в атмосферу токсичних продуктів повного та неповного згоряння. Одним із шляхів підвищення ефективності гасіння пожеж та зменшення їх негативного впливу на довкілля є застосування фізичних чинників припинення горіння, а також їх комбінацій з екологічно прийнятними вогнегасними речовинами, особливо на початковій стадії, що і стало ідеєю роботи.

Отже, створення наукових основ зменшення негативного впливу пожеж на довкілля, які враховують особливості та закономірності дії чинників на ефективність припинення процесів горіння на початковій стадії їх виникнення ударними хвилями, у тому числі за комбінованого їх застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозольними вогнегасними речовинами, є актуальною проблемою, вирішення якої є передумовою науково-технічного прогресу у сферах екологічної та пожежної безпеки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу виконано в рамках реалізації «Програми припинення виробництва та використання озоноруйнівних речовин на 2004 – 2030 роки», що затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 04.03.2004 № 256; «Програми

забезпечення пожежної безпеки на період до 2010 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 01.07.2002 № 870», та Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012 – 2015 роки, під час виконання науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності ДСНС України за темою: «Підвищення ефективності вогнегасного аерозолі на основі неорганічних солей калію імпульсною акустичною ударною хвилею» (№ ДР 0111 U 008548), науково-дослідної роботи УкрНДЦЗ спільно з ЛДУБЖД «Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання» (№ ДР 0111 U 006565), а також науково-дослідної роботи за темою «Створити наукові основи розроблення екологічно прийнятних вогнегасних речовин та технологій їх застосування» (державний реєстраційний номер 0116U007171), яка за угодою про співробітництво виконується Державною екологічною академією післядипломної освіти та управління Мінприроди України та Львівським державним університетом безпеки життєдіяльності, у яких здобувач був відповідальним виконавцем.

Ідея роботи полягає у зменшенні негативного впливу на довкілля пожеж шляхом застосування на початковій стадії їх розвитку ударних хвиль або їх комбінації з газовими та аерозольовими 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 на початковій стадії розвитку пожеж ударними хвилями, у тому числі за комбінованого їх застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозольовими 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, які реалізують технологію припинення горіння на початковій стадії розвитку пожежі із застосуванням ударних хвиль або їх комбінацій із екологічно прийнятними

вогнегасними речовинами об'ємної дії, що забезпечує запобігання поширенню горіння та зменшення забруднення довкілля;

- провести полігонні випробування з перевірки теоретичних припущень та ефективності розроблених технічних засобів гасіння пожеж, 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 забезпечує запобігання поширенню горіння та зменшення забруднення довкілля;
- розробити рекомендації та технічні документи щодо застосування екологічно прийнятної технології пожежогасіння із застосуванням ударних хвиль.

Об'єкт дослідження – процеси припинення горіння горючих середовищ внаслідок дії екологічно прийнятних фізичних і хімічних чинників.

Предмет дослідження – вплив чинників на ефективність припинення процесів горіння горючих середовищ дією ударних хвиль, у тому числі за їх комбінованого застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозольовими вогнегасними речовинами, а також на зменшення негативних наслідків пожеж на довкілля.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний метод досліджень, який включав аналіз і узагальнення даних світової та національної статистики пожеж, розроблення сучасних технологій і засобів пожежогасіння та виявлення шляхів зменшення їх негативного впливу на довкілля.

Вогнегасну концентрацію вогнегасних речовин об'ємної дії, їх бінарних і тернарних сумішей та їх комбінованих систем з ударними хвилями визначали за розробленими методиками на основі установки «КАМЕРА». Полігонні випробування щодо визначення вогнегасної ефективності пристроїв комбінованого гасіння, що розроблені відповідно до теоретично обґрунтованих та експериментально отриманих параметрів, було проведено згідно з розробленою методикою в приміщенні об'ємом 65 м³ на модельному вогнищі із застосуванням у якості палива суміші дизельного пального та бензину. При цьому було використано метрологічно атестоване обладнання і повірені засоби вимірювання. У роботі використовували методи планування повнофакторного експерименту. Результати теоретичних і експериментальних досліджень обробляли з використанням статистичних методів на основі додатку Microsoft Office Excel із залученням комп'ютерної техніки, при цьому було отримано залежності згідно з експериментальних даних.

Експериментальне дослідження процесу припинення горіння газового середовища проводили із застосуванням швидкісної камери Nikon 1j4 з можливістю зйомки 1200 кадрів на секунду, визначення надлишкового тиску визначали за допомогою датчика тиску та температури BOSCH «BMP – 180» з часом реакції 7,5 мс, сигнали з датчика перетворювали з допомогою електронного інтерфейсу та комп'ютерної програми для отримання сигналів датчика «BMP – 180». Електричні імпульси струму для підпалювання піротехнічних запалів подавали за допомогою пристрою на базі плати та процесора Arduino для формування електричних імпульсів з частотою від 1 до 100 Гц. Визначення інтенсивності теплового

випромінювання полум'я здійснювалися пристроєм ПТП - 01 з автономним живленням. Концентрацію газів визначали мобільним газоаналізатором «Protégé» та газовим хроматографом ХРОМ - 5.

Наукова новизна 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 на початковій стадії розвитку пожеж ударними хвилями, у тому числі за комбінованого їх застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозольними вогнегасними речовинами. При цьому

уперше:

– встановлено, що дія на дифузійне полум'я серій ударних хвиль у діапазоні частот від 8 до 12 Гц, критичний тиск гасіння яких порівняно з одинарною ударною хвилею менший до 30 %, призводить до припинення горіння, при цьому у всіх випадках відбувається фрагментація полум'я;

– виявлено синергетичний ефект інтенсифікації процесу припинення горіння газового горючого середовища внаслідок одночасної дії на нього вогнегасних речовин та ударних хвиль, який проявляється у зменшенні проміжку часу припинення горіння та зменшення їх вогнегасної концентрації порівняно з їх індивідуальними значеннями. При цьому відбувається зменшення вогнегасної концентрації аерозолу до 5 разів, вогнегасної концентрації газових вогнегасних речовин до 6 разів, а вогнегасної концентрації компонентів бінарних газоаерозольних систем 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;

– обґрунтовано комбінований спосіб припинення горіння шляхом одночасної комбінованої дії на полум'я фізичних (ударні хвилі з визначеними параметрами) та хімічних чинників (вогнегасні газові речовини, вогнегасні аерозолі та їх бінарні суміші), які забезпечують виключення або зменшення обсягів утворення шкідливих для довкілля речовин під час гасіння пожежі;

– науково обґрунтовано параметри та створено технічні засоби, які реалізують технологію припинення горіння на початковій стадії розвитку пожежі шляхом застосування ударних хвиль або їх комбінацій із екологічно прийнятними вогнегасними речовинами об'ємної дії, що забезпечує запобігання поширенню горіння та зменшення забруднення довкілля. При цьому, тривалість емісії та обсяги шкідливих для довкілля речовин внаслідок пожеж значно зменшуються, що призводить до підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки населення і територій України;

набуло подальшого розвитку:

– уявлення щодо ефективності застосування автоматичних систем пожежогасіння на початковій стадії розвитку пожеж задля зменшення їх негативного впливу на довкілля;

– способи припинення горіння технічними засобами пожежогасіння, які реалізують комбінований спосіб припинення горіння шляхом одночасної дії на полум'я екологічно прийнятних фізичних та хімічних чинників;

удосконалено:

- номенклатуру технічних засобів пожежогасіння, методи досліджень та випробувань, а також довідкові дані щодо їх застосування;
- системи протипожежного захисту об'єктів з можливістю виникнення пожеж шляхом застосування технічних засобів пожежогасіння, які реалізують комбінований спосіб припинення горіння з використанням ударних хвиль та вогнегасних засобів об'ємної дії;
- інформаційно-довідкову та навчально-методичну бази щодо застосування екологічно прийнятної технології пожежогасіння із застосуванням ударних хвиль.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні довідково-інформаційних і технічних документів на виготовлення дослідних партій технічних засобів комбінованого гасіння та попередження пожежі, отриманні на окремі зразки розроблених модельних рядів сертифікатів відповідності органів сертифікації України, впровадженні результатів досліджень в науково-навчальних процесах вищих навчальних закладів ДСНС. Проведені полігонні випробування з перевірки теоретичних припущень підтвердили ефективність розроблених технічних засобів гасіння пожеж, які реалізують технологію припинення горіння на початковій стадії розвитку пожежі шляхом застосування ударних хвиль або їх комбінацій із екологічно прийнятними вогнегасними речовинами об'ємної дії.

Особистий внесок здобувача полягає у формуванні ідеї роботи, самостійному аналізі літературних джерел з питань розроблення та застосування флегматизаторів, розроблення пристроїв комбінованого гасіння, формулюванні мети, задач, методології та вибору методик досліджень, проведенні експериментів у лабораторних та полігонних умовах, обробці та інтерпретації результатів дослідження, розробленні конструкції технічних засобів, що реалізують технологію пожежогасіння на основі застосування ударних хвиль у комбінації з вогнегасними речовинами об'ємної дії, формуванні висновків і наукових положень, в апробації результатів досліджень.

Особистий внесок здобувача в роботах, написаних у співавторстві:

- [1, 3] – сформулював ідею, предмет та методики досліджень вогнегасних аерозолів та комбінованих газоаерозольних систем, узагальнив результати досліджень та сформулював висновки;
- [4-7] – сформулював об'єкт, предмет та методики досліджень, особисто провів експериментальні дослідження з визначення вогнегасних концентрацій вогнегасних аерозолів та їх сумішей з газовими вогнегасними речовинами, узагальнив результати експериментальних досліджень, взяв участь у формулюванні висновків;
- [12-14] – сформулював ідею, проблему та методику досліджень, узагальнив результати досліджень, сформулював висновки.
- [17, 19, 21] – сформулював ідею, об'єкт, предмет, мету та методики проведення досліджень, здійснив загальне наукове і методичне керівництво, узагальнив результати досліджень, взяв участь у формулюванні висновків;
- [18] – узагальнив результати досліджень, взяв участь у формулюванні висновків.

[22] – сформулював ідею, визначив об'єкт, предмет і мету проведення досліджень з визначення флегматизувальної властивості аерозолів, узагальнив результати експериментальних досліджень, сформулював висновки;

[23 – 30] – сформулював ідею, здійснив наукове керівництво, обґрунтував мету, об'єкт, предмет досліджень з визначення впливу добавок CO₂ на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-газової суміші, узагальнив результати, сформулював висновки;

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на 9-х міжнародних та 5 науково-практичних конференціях: міжнародній науково-практичній конференції «Техногенна безпека» 2008 р., м.Львів; міжнародній науково-практичній конференції Пожежна безпека. 2009 р., м.Львів; II міжнародній науково-практичній конференції «Техногенна безпека: Теорія, практика, інновації» 2011 р., м.Львів; XIII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників «Технології захисту – 2011» м.Київ; X Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна безпека – 2011» м.Харків; Всеукраїнській конференції рятувальників, м. Київ; Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» жовтень 2015 р., м.Черкаси; Всеукраїнській конференції рятувальників, вересень 2014 р., м.Київ; XXXXI Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми у сфері науки», травень 2016 р., м.Чернівці; Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні наукові проблеми. розгляд, рішення, практика» травень 2016 р., м.Одеса; Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури», травень 2016 р., м.Київ; Міжнародній науково-практичній конференції «Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації» 2016 р., м.Львів; Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту України перспективи та шляхи до європейського простору», жовтень 2016 р.; Міжнародній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», м.Черкаси, 2017 р. 19 Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» жовтень 2017 р., м.Київ.

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 42 наукових роботах, з яких: 1 монографія, 3 статті у виданнях, що входять в науково-метричну базу Scopus, 8 статей у виданнях, які входять в іноземні фахові видання та науково-метричні бази: IndexCopernicus, CrossRef, PИИЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, Directory Indexing of International Research та інші., 21 стаття у виданнях, які входять до переліку фахових видань, 6 праць в інших виданнях, 2 патенти України та 2 патенти України на корисну модель, 14 тез доповідей на міжнародних і національних науково-практичних конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, шістьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Роботу викладено на 356 сторінках друкованого тексту, що містить 55 таблиць та 92 рисунки. Список використаних джерел містить 372 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено актуальність, ідею, мету дисертаційної роботи, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну отриманих результатів, дані щодо апробації, а також публікації її результатів.

У першому розділі наведено результати аналізу світової та національної статистики пожеж і впливу їх небезпечних чинників на довкілля та життєдіяльність людини, сформульовано методологію проведення дисертаційних досліджень.

За даними ДСНС України щороку кількість пожеж в Україні збільшується і сягає вже понад 70 тис. пожеж, зокрема, за останні три роки збільшилась на 18 тис. пожеж: у 2013 році – 61114, у 2014 році – 68879, а у 2015 році – 79581, проте кількість загиблих зменшилась до 2494, 2246 та 1947 відповідно. Значна частка масштабних пожеж і загиблих припадає на промислові об'єкти зі зберіганням та обертанням горючих рідин і газів у значних обсягах на промислових, торговельно-складських та інших об'єктах (табл. 1).

Що стосується надзвичайних ситуацій в Україні, які пов'язані із пожежами та вибухами, то у 2014 році зареєстровано 47 таких випадків, внаслідок яких загинуло 152 людини.

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 у резервуарному парку нафтобази групи компаній “БРДСМ” у Васильківському районі Київської області, унаслідок якої загинуло п'ятеро людей, у тому числі троє рятувальників, та 16 отримали травми різного ступеня тяжкості.

У результаті проведеного аналізу було встановлено, що прямі збитки від пожеж на подібних об'єктах у 2015 році 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.

Таблиця 1

Статистика пожеж на промислових підприємствах та будівлях і спорудах громадського призначення

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

Аналіз причин більшості аварій і пожеж на промислових об'єктах зі зберіганням та обертанням горючих рідин і 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 та вибухів. Встановлено причини утворення пожежонебезпечних та вибухонебезпечних ситуацій на промислових об'єктах, що спричиняють пожежі, вибухи та аварійну загазованість, які полягають у

використанні несправного обладнання (59,1%), порушення технологічного режиму (26,8%), запуску несправної технологічної лінії (7,5%), порушенні правил ремонтних робіт (4,7%), недотриманні правил зупинки технологічної установки (1,9%).

Наведено порівняльні дані вогнегасних речовин, їх переваги та недоліки.

Проаналізовано переваги та недоліки існуючих вогнегасних засобів.

Обґрунтовано, що більшість пожеж, які виникають на промислових об'єктах із значним пожежним навантаженням, гасіння більшості пожеж відбувається на стадії, коли пожежа розвинулась та завдала значних матеріальних збитків, які призводять до зупинки виробничого процесу у 95 % випадків. Здійснено порівняння вогнегасних концентрацій аерозольних засобів та встановлено, що вогнегасні аерозолі мають високу вогнегасну ефективність, а генератори вогнегасного аерозолу відносно прості у виготовленні та мають високу надійність протягом тривалого терміну зберігання, що дозволяє зробити висновок про можливість їх подальшого вдосконалення та створення на їх основі високоефективних швидкодіючих комбінованих систем попередження та гасіння газових горючих середовищ.

Виявлено, що у наукових роботах вітчизняних і зарубіжних вчених, присвячених удосконаленню систем протипожежного захисту, як складової забезпечення техногенної та екологічної безпеки, основну увагу приділялось хімічним засобам пожежогасіння (вода, піна, вогнегасні порошки, газові вогнегасні речовини, вогнегасні аерозолі), які реалізують прояв таких чинників припинення горіння як охолодження, ізолювання, інгібування, розбавлення, у той час, як фізичні чинники впливу на процеси припинення горіння досліджувались значно меншою мірою, або взагалі не розглядались.

За результатами аналізу світової та національної статистики пожеж, сучасних засобів пожежогасіння висунуто ідею, що зменшення негативного впливу на довкілля пожеж може бути досягнуто шляхом застосування на початковій стадії їх розвитку ударних хвиль або їх комбінації з газовими та аерозольними вогнегасними речовинами. Сформульовано об'єкт, предмет, мету і задачі досліджень.

У другому розділі представлено розроблену 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. Обрано методи проведення досліджень, відповідно до яких, 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 1 наведено схематичне зображення методології проведення дисертаційних досліджень

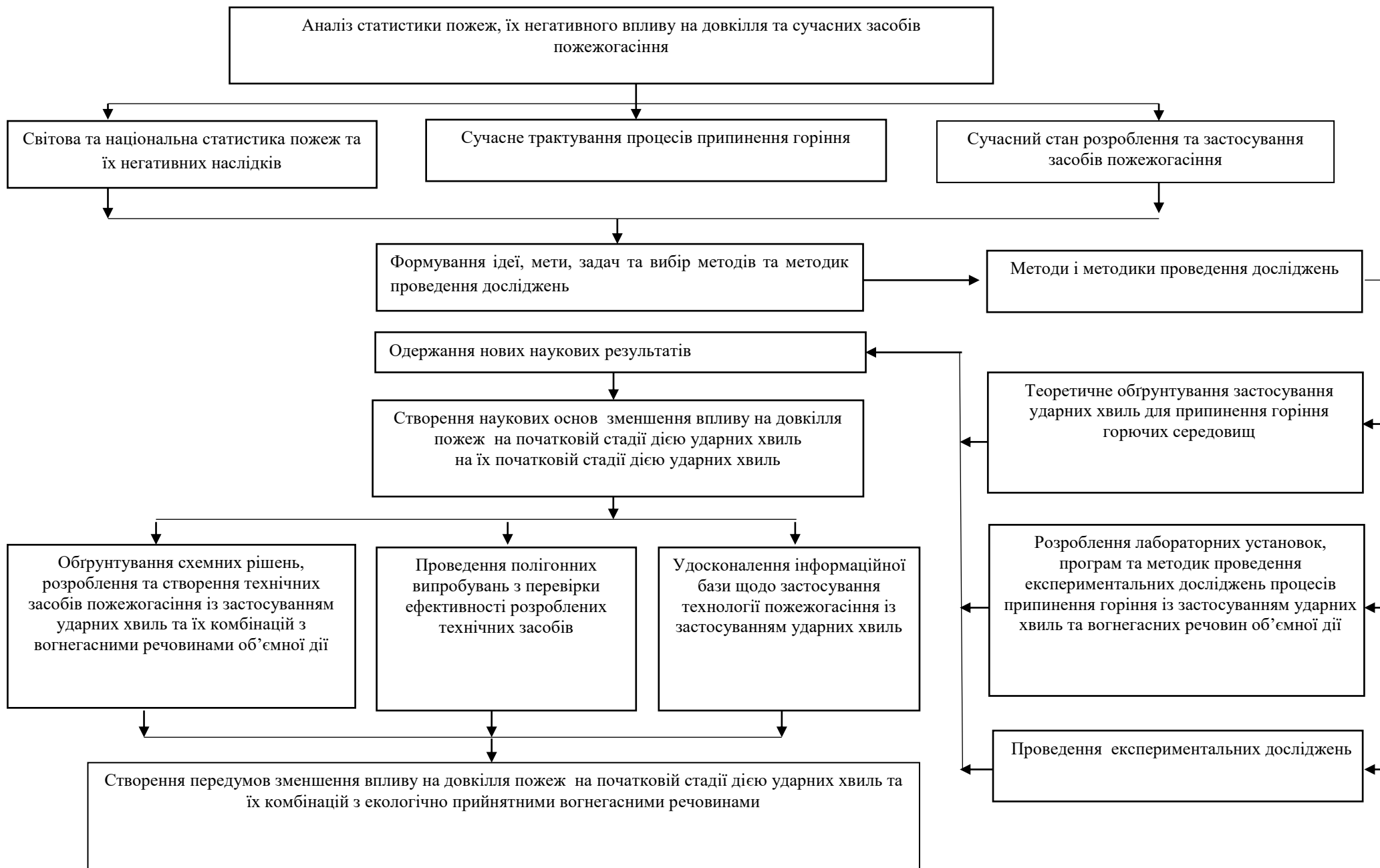


Рисунок 1 - Схематичне зображення методології проведення дисертаційних досліджень

Розроблено лабораторну установку та методики визначення вогнегасної ефективності комбінованого гасіння ударними хвилями та вогнегасною речовиною об'ємною дії для дифузійного полум'я н-гептану C_7H_{16} (ДПГ). Експериментальна установка (рис. 2) виготовлена наступним чином: камера з передньою панеллю розмірами: довжина 1980 мм, ширина 485 мм, висота 530 мм, в якій є два люки, 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.

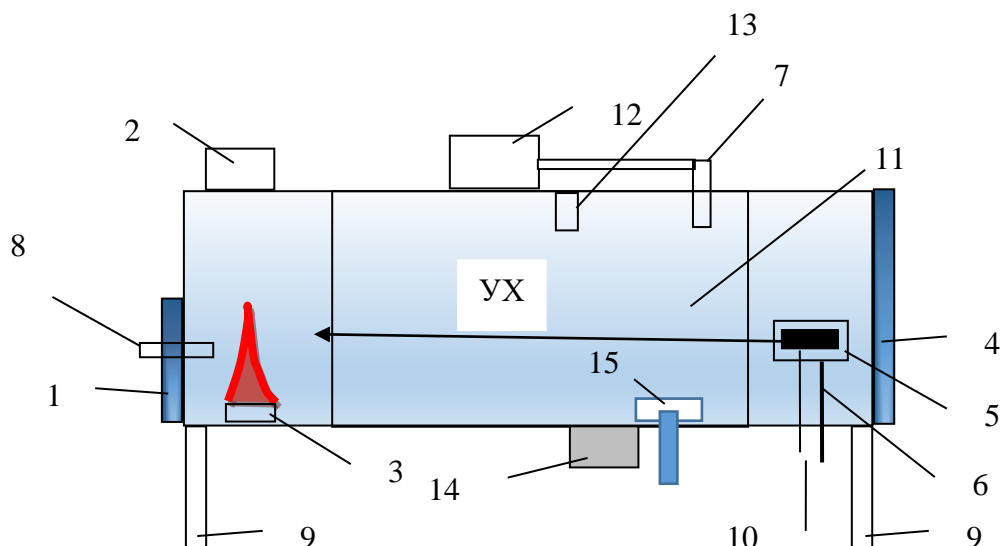


Рисунок 2 - Схематичне зображення експериментальної установки «КАМЕРА» для визначення вогнегасної ефективності ударної хвилі, а також її комбінованого застосування з вогнегасними речовинами об'ємної дії (камера розмірами: 1980 мм x 485 мм x 530 мм):

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 – патрубок для газу; 8 – датчик тиску BMP-180; 9 – стійки; 10 – електрозапальник АУС; 11 – оглядове вікно; 12 – газовий лічильник; 13 – вентилятор; 14 – джерело живлення; 15 – запальник АОС.

Для контролера Arduino UNO була використана програма для виводу цифрових показників датчика в інтерфейсі CoolTerm_0.stk*. Датчик був встановлений в камері на відстані 1,75 метра від генератора ударних хвиль. Сам генератор ударних хвиль – це труба діаметром 70 мм і отвором у задній кришці 7 мм для запалення піротехнічного заряду всередині генератора. Запалення заряду здійснювали шляхом подання струму напругою близько 20 В. Методика проведення експерименту полягала в тому, що в камері встановлювався тигель діаметром 40 мм і глибиною 35 мм з попередньо запаленим н-гептаном на відстані 1750 мм від генератора ударних хвиль та через 20 секунд вимірювали теплову інтенсивність випромінювання, після чого задіювали генератор ударних хвиль, пропускаючи по камері ударну хвилю відповідної потужності і фіксували результат - «гасіння», «не гасіння», «зміни в полум'ї». Після кожної спроби об'єм камери продували для наступного досліду. Під час проведення експерименту обрані стани були зареєстровані на камеру Nikon 1 J4 з частотою зйомки близько 1200 кадрів секунду.

З отриманих відеороликів було зроблено розкадрування відповідних моментів. За попередньо описаною методикою були отримані результати експериментів з визначення вогнегасної ефективності ударної хвилі потужністю від 175 Па. Вогнегасну концентрацію вогнегасних речовин, їх бінарних і тернарних сумішей та параметри комбінованих систем з ударними хвилями визначали за розробленими методиками на основі установки «КАМЕРА». Полігонні випробування щодо визначення вогнегасної ефективності пристроїв комбінованого гасіння, які були розроблені відповідно до теоретично обґрунтованих та експериментально отриманих параметрів, було проведено за розробленою методикою в приміщенні об'ємом 65 м³ на модельному вогнищі 13 В, де в якості палива було використано суміш дизельного пального та бензину.

При цьому було використано метрологічно атестоване обладнання і повірені засоби вимірювання. У роботі використовували методи планування повнофакторного експерименту. Результати теоретичних і експериментальних досліджень обробляли з використанням статистичних методів на основі додатку Microsoft Office Excel із залученням комп'ютерної техніки, за допомогою якого було отримано графіки залежності згідно з експериментальними даними.

Експериментальне дослідження процесу вибухового горіння та гасіння проводили із застосуванням швидкісної камери Nikon 1j4 з можливістю зйомки 1200 кадрів на секунду. Визначення надлишкового тиску проводили з допомогою датчика тиску та температури BOSN «BMP – 180» з часом реакції 7,5 мс, сигнали з датчика надходили на контролер Arduino UNO, дані з якого в свою чергу отримували через програму для виводу цифрових показників CoolTerm_0.stk*. Імпульси електричного струму для підпалювання піротехнічних запалів подавали з допомогою пристрою на базі плати та процесора Arduino для формування електричних імпульсів з частотою від 1 до 100 Гц. Визначення інтенсивності теплового випромінювання полум'я визначали пристроєм ПТП - 01 з автономним живленням. Концентрацію газів визначали мобільним газоаналізатором «Protégé» та газовим хроматографом ХРОМ - 5.

У третьому розділі наведено обґрунтування застосування ударних хвиль та їх комбінацій з газовими та аерозольними вогнегасними речовинами для припинення горіння. Теоретично обґрунтовано підвищення ефективності об'ємного гасіння ударною хвилею та описано процес проходження УХ через аерозольне середовище. Сформульовано гіпотезу, що при проходженні ударної хвилі через газоаерозольне середовище відбувається реалізація ряду чинників, які призводять до значного підвищення ефективності гасіння.

Зроблено теоретичне припущення, що дія ударної хвилі на полум'я повинна спричинити такі ефекти:

- зміщення полум'я від місця витікання газів (рис. 3 а);
- відрив полум'я від місця витікання газу або пари (рис. 3 б);
- турбулізація та захоплення обсягів холодного повітря з фрагментацією полум'я спочатку на великі, а потім на більш дрібні фрагменти і подальшим припиненням процесу гасіння (рис. 3 с).

При цьому очікувано, що внаслідок дії серій ударних хвиль ефективність припинення горіння підвищується.

На ефективність процесу гасіння найбільше впливатиме зміна концентрації реагентів у зоні реакції: локальне збільшення концентрації вогнегасного аерозолю в зоні горіння та проникнення в зону реакції інгібіторів і флегматизаторів.

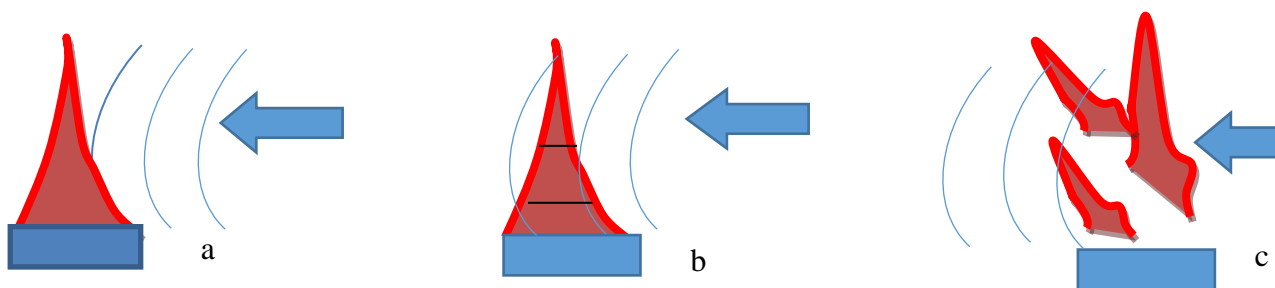


Рисунок 3 - Ймовірні умови початку фрагментації полум'я при дії на нього ударної хвилі в середовищі газової вогнегасної речовини

Зроблено теоретичне припущення, що при дії ударних хвиль на полум'я, концентрація реагуючих речовин в момент проходження ударної хвилі буде суттєво змінюватись. Перш за все, в момент контакту УХ з полум'ям у цій зоні майже миттєво зросте концентрація повітря, що призводить до переводу газо-(паро-)повітряної суміші системи «пальне – окислювач» у розряд «бідних». Якщо ж до зони горіння одночасно поступає газова вогнегасна речовина або вогнегасний аерозоль ефективність припинення процесу горіння суттєво збільшиться (рис. 4).

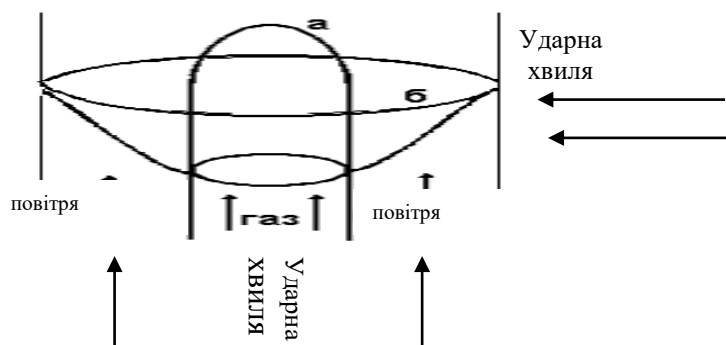


Рисунок 4 - Схематичне зображення дії ударної хвилі на дифузійне полум'я

Ефективність відриву полум'я під впливом ударної хвилі залежить від напрямку її дії.

На рисунку 5 схематично відображено зміщення положення полум'я у просторі під впливом ударної хвилі залежно від напрямку її дії. Можна стверджувати, що при напрямку «збоку» (рис. 5 б) вплив на полум'я УХ та вогнегасної речовини об'ємної дії буде найбільш ефективним.

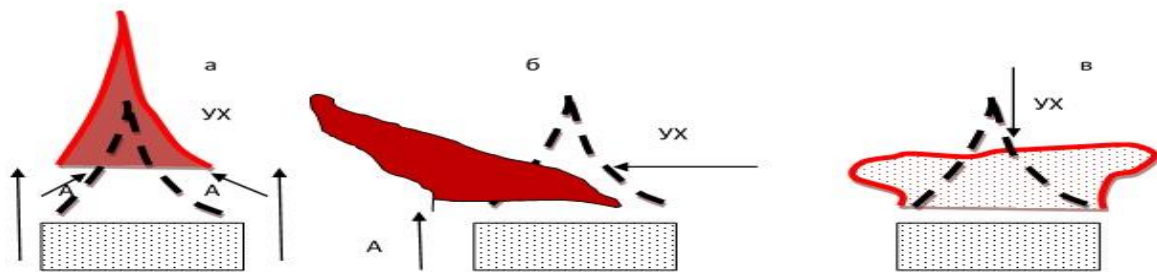


Рисунок 5 - Схематичне зображення дії ударної хвилі на полум'я

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 вогнегасної об'ємної речовини, збільшення тиску газоаерозольної суміші в зоні полум'я, локальне підвищення концентрації частинок внаслідок ефекту Бернуллі та основним фактором буде так званий «розрив» полум'я в зоні релаксації ударної хвилі. Загалом процес гасіння комбінованою системою та чинники впливу УХ, які задіяні при цьому, показано на рисунку 6.

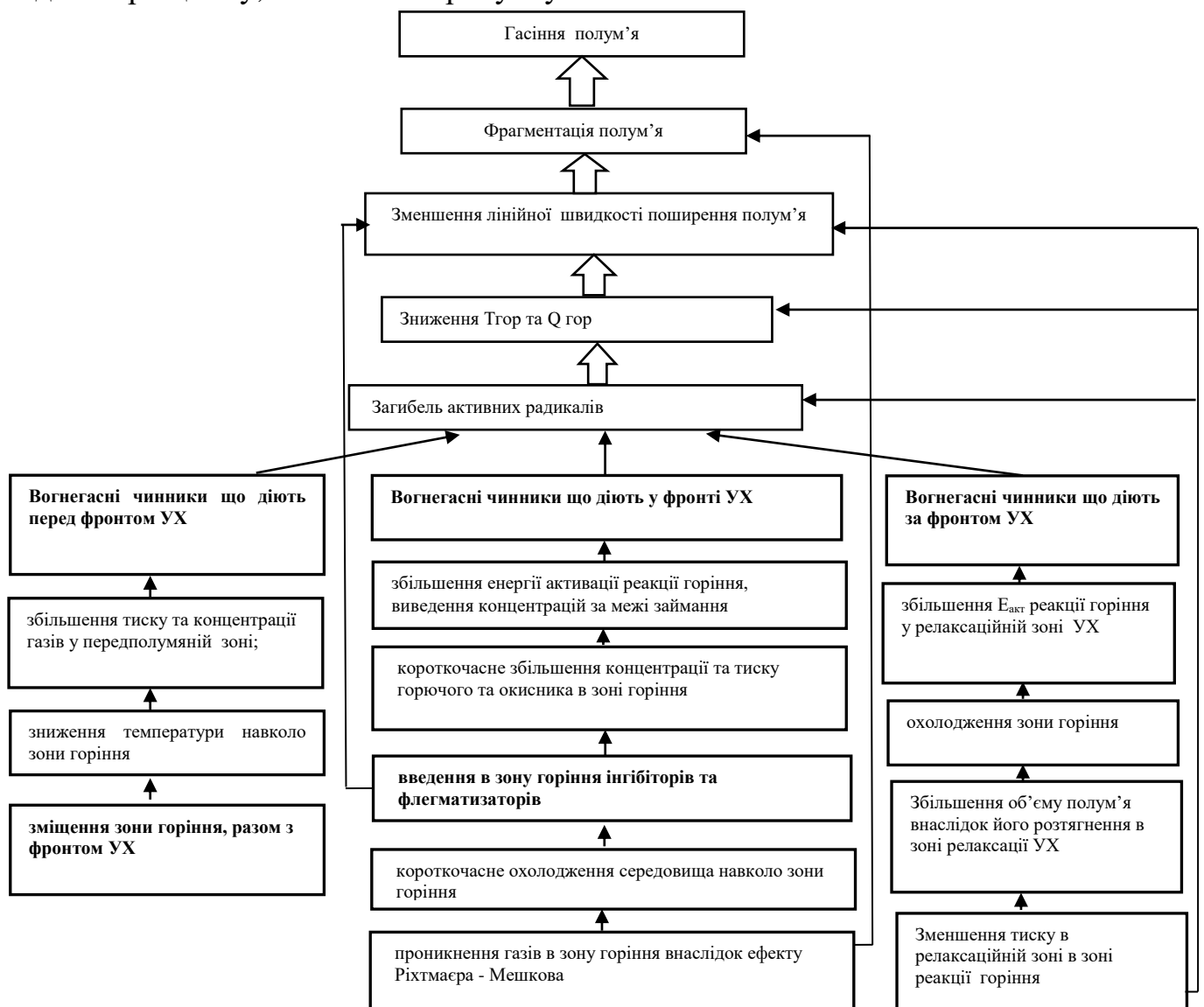


Рисунок 6 - Вогнегасні чинники комбінованих систем на основі ударних хвиль та вогнегасних речовин об'ємної дії

Відповідно, при переході ударної хвилі з газового середовища атмосфери через полум'я, ймовірно, буде відбуватись взаємодія по фронту ударної хвилі (рис. 7) з утворенням нестійкості Ріхтмаєра – Мешкова, яка виникає на межі двох газів з різними густинами при проходженні через них ударної хвилі, при цьому газ 1 буде проникати у фронт полум'я, викликаючи утворення в ньому зони зсуву газу 1 в газ 2, що можливо призводитиме до фрагментації полум'я в цих місцях по напрямку руху ударної хвилі. Отже, 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 газовою вогнегасною речовиною в підготовчій зоні дифузійного полум'я. Відтак, проходження ударної хвилі через полум'я можна поділити на наступні етапи: 1 етап – коли фронт ударної хвилі розташований перед полум'ям; 2 етап – ударна хвиля є в полум'ї; 3 етап – ударна хвиля перейшла через полум'я та спричинила його розрив.

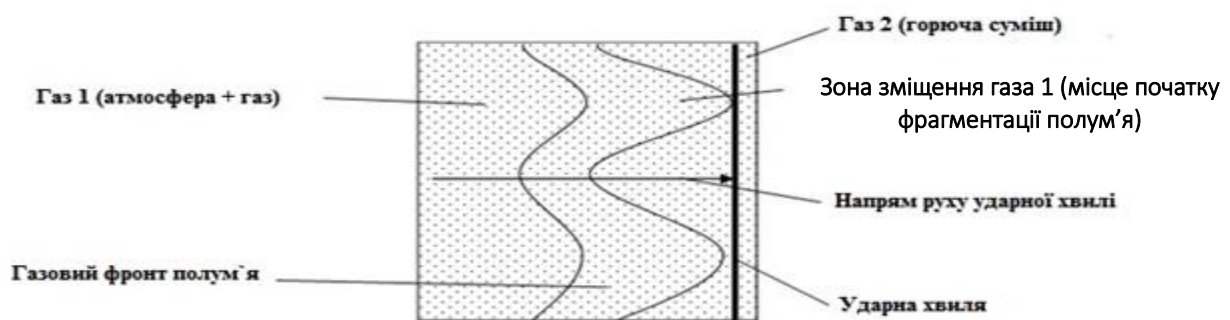


Рисунок 7 - Ймовірні умови початку фрагментації полум'я при дії на нього ударної хвилі в середовищі газової вогнегасної речовини

Було змодельовано діапазон ефективної дії ударних хвиль та встановлено залежність потужності УХ від тиску при вибуху заряду ВР масою 4 г. (табл.2).

Примітка. У якості характеристики потужності ударної хвилі прийнято тиск у її фронті.

Таблиця 2

Залежність тиску у фронті УХ від відстані до генератора ударних хвиль при вибуху заряду ВР масою 4 г

L, м	1,00	2,00	3	4	5
ΔP , кПа	8,52	7,12	4,263	3,0096	2,294

В розділі 3 теоретично обґрунтовано, що підвищення ефективності об'ємного гасіння відбувається через одночасний вплив багатьох факторів, а саме: підвищення тиску у фронті ударної хвилі, збільшення концентрації вогнегасної речовини, стискання та розтягування зони горіння та інгібувальний вплив вогнегасної речовини. Одночасна дія всіх цих факторів на полум'я повинна призвести до відриву полум'я та його гасання.

У четвертому розділі наведено результати проведення експериментальних досліджень з виявлення впливу чинників на ефективність вогнегасної дії бінарних

сумішей вогнегасного аерозолю та газів розріджувачів. Досліджено рецептури аерозольотворювальних сумішей (АУС) для гасіння та флегматизування комбінованим способом. Встановлено вогнегасну концентрацію (C_B) запропонованої АУС (табл. 3).

Таблиця 3

Вогнегасна концентрація АУС на основі ідітолу

№ п/п	Вміст компонентів АУС (%мас.)		C_B (г/м ³)
	KNO ₃	ідітол	
1	80	20	25,6
2	78	20	27,4
3	75	20	28,6

Експериментальні дані з встановлення ефективності гасіння н-гептану бінарними сумішами CO₂ та аерозолю показано на рис. 8.

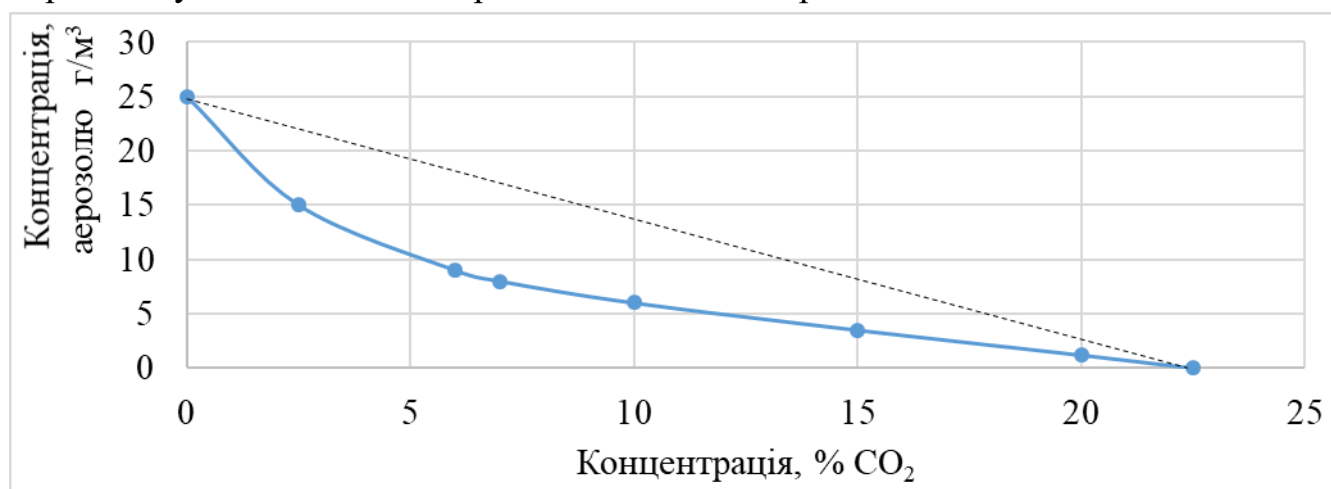


Рисунок 8 – Залежність вогнегасної концентрації АУС (на основі ідітолу) від добавки CO₂ при гасінні дифузійного полум'я н-гептану. 1 – пряма залежності (теоретична) у разі адитивності; 2 – експериментальні значення

Було визначено вплив бінарних сумішей аерозолю з CO₂ (БАВС) та N₂ (БААС) на температуру дифузійного та кінетичного полум'я н-гептано-повітряної суміші. Результати показані на графіках рис. 9. та 10.

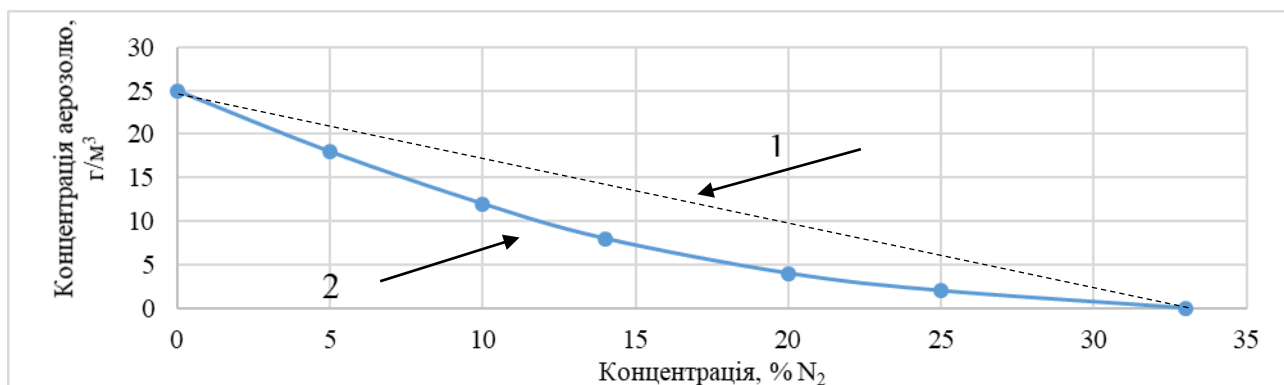


Рисунок 9 – Графік змінення вогнегасної концентрації БААС для дифузійного полум'я гептану, залежно від співвідношення аерозолу г/м³ та азоту % N₂. 1 – пряма залежності (теоретична) у разі адитивності; 2 – експериментальні значення

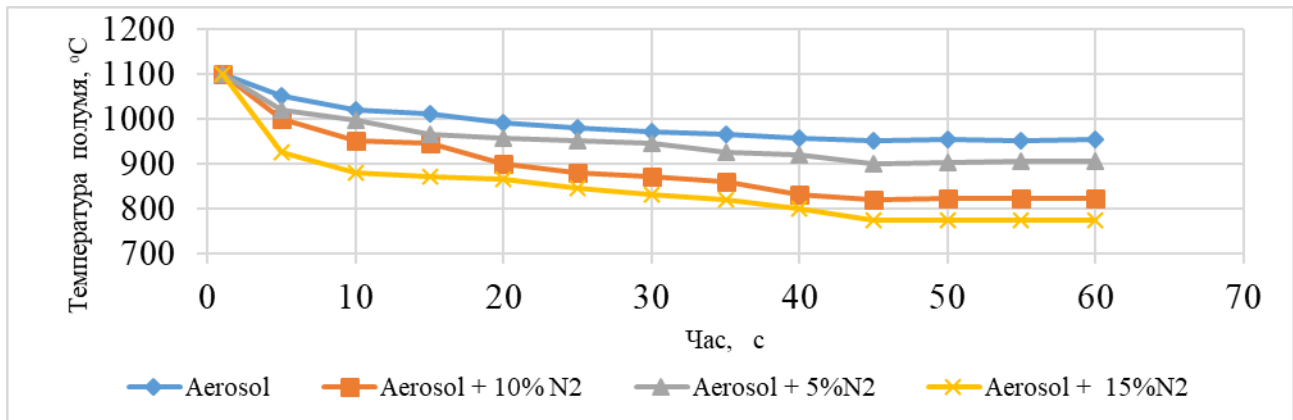


Рисунок 10 – Залежність зміни температури (t) кінетичного полум'я н-гептану в часі (τ с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолу в БААС в 45 г/м³

За результатами досліджень виявлено різницю, на яку знижується температура, як дифузійного (рис.11.), так і кінетичного полум'я при дії на них бінарних вогнегасних сумішей із значною різницею в концентраціях аерозолу та газів. Особливістю при гасінні є те, що вогнегасна речовина не потрапляє у достатній кількості всередину зони горіння, але призводить до зниження температури полум'я за рахунок його обтікання. Також цікавим є те, що сумішню БААС загасити кінетичне полум'я н-гептану неможливо навіть при великих її концентраціях, в той же час дифузійне полум'я гаситься при цьому значно легше, а різниця в концентраціях БААС сягає до 4 разів. Встановлено, що гасіння дифузійного полум'я н-гептану відбувається не через його відрив, а через його зменшення в розмірах та пульсації при частотах 24–35 Гц. Виявлено, що внесення кінетичного полум'я н-гептану в бінарній аерозольно-азотній суміші при концентраціях, які значно переважають вогнегасні для дифузійного полум'я н-гептану, до гасіння не приводило.

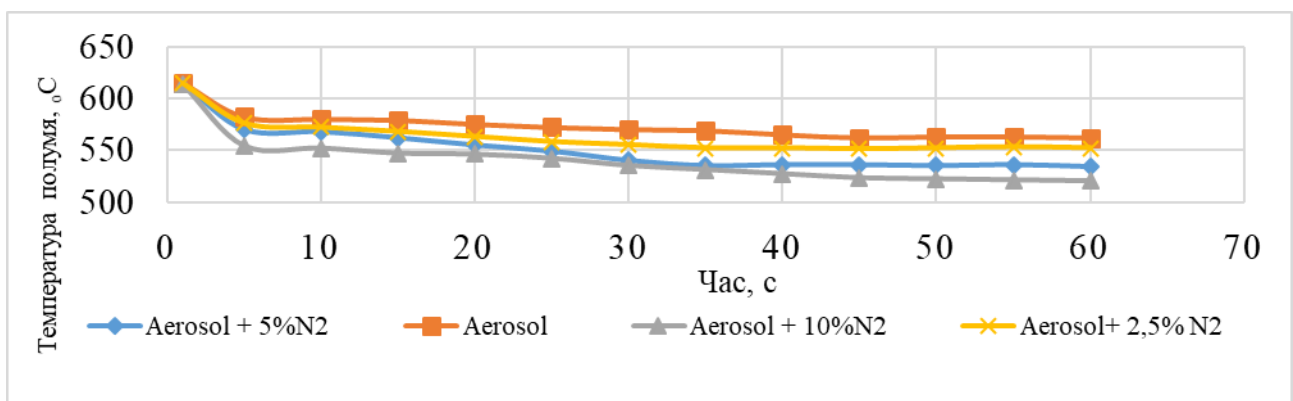


Рисунок 11– Залежність зміни температури (t) дифузійного полум'я н-гептану в часі (τ, с) залежно від концентрації азоту при сталій концентрації аерозолу в БААС в 10 г/м³

Визначено інтенсивність та значення зменшення температури дифузійного та кінетичного полум'я при перебуванні його в бінарній аерозольноазотній суміші. Різниця температур між початковим значенням температури та під дією бінарної аерозольноазотної суміші становить максимум 230 °C. Зниження температури

відбувається внаслідок того, що добавка бінарної аерозольноазотної суміші, ймовірно, призводить до зменшення тепловиділення реакції горіння і, як наслідок, зменшення температури полум'я.

Визначено вогнегасну ефективність бінарної аерозольноазотної суміші та встановлено, що добавка азоту до аерозолю неорганічних солей калію призводить до значного підвищення вогнегасної ефективності бінарної аерозольногазової суміші завдяки синергізму між її компонентами. Результатом додавання до аерозолю азоту стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів бінарної суміші до 30 %. Визначено, що оптимальні співвідношення компонентів в аерозольноазотній суміші становлять: аерозоль – 10 г/м³, азот – 12,1 %, при яких суміш є вогнегасною, для дифузійного полум'я н-гептану та забезпечує збереження життєпридатної концентрації кисню.

Проведено математичне планування експерименту для проведення досліджень для визначення тривалості часу гасіння пожежі ударними хвилями та їх комбінаціями з CO₂ та N₂.

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

- q – густина теплового потоку від осередку пожежі, кВт/м²;
- A – концентрація аерозолю в середовищі пожежі, г/м³;
- Γ – концентрація газів CO₂ або N₂ в середовищі пожежі, %;
- P – тиск ударної хвилі, Па.

При цьому було проведено кодування факторів, необхідне для перекладу натуральних значень факторів в безрозмірні величини, щоб мати нагоду побудувати план-матрицю експерименту. Після чого було перетворено незалежні змінні \tilde{x}_i в безрозмірні змінні за залежністю:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i_{\max}})}{\ln \tilde{x}_{i_{\max}} - \ln \tilde{x}_{i_{\min}}} + 1. \quad (2) \quad x_1 = \frac{2(\ln q - 4,5)}{4,5 - 1,79} + 1 = 0,74 \ln q - 2,32;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln A - 2,48)}{2,48 - 1,06} + 1 = 1,41 \ln A - 4,9; \text{ при проведенні дослідів на основі CO}_2 \text{ (рис.12)}$$

$$x_3 = \frac{2(\ln \tilde{A} - 2,77)}{2,77 - 1,25} + 1 = 1,32 \ln \tilde{A} - 3,64; \text{ при проведенні дослідів на основі N}_2 \text{ (рис. 13)}$$

$$x_3 = \frac{2(\ln \tilde{A} - 3,04)}{3,04 - 1,25} + 1 = 1,12 \ln \tilde{A} - 3,4; \quad x_4 = \frac{2(\ln \tilde{D} - 8,7)}{8,7 - 5,48} + 1 = 0,62 \ln \tilde{D} - 4,4.$$

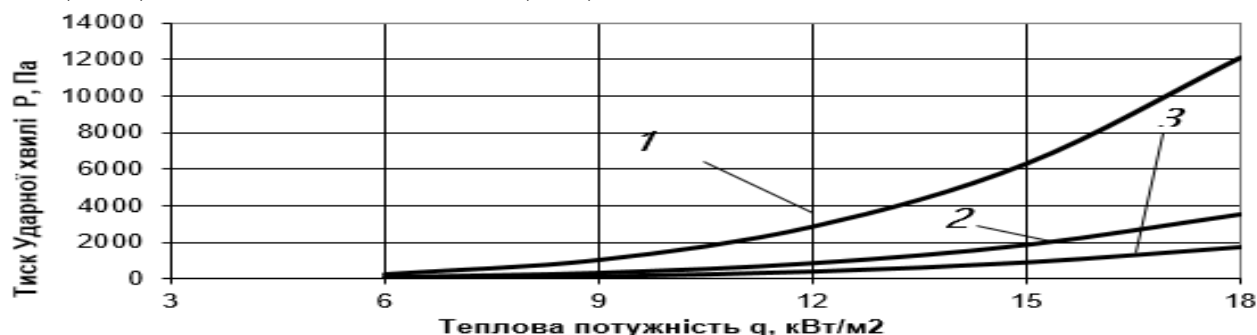


Рисунок 12 – Вплив потужності теплового потоку на величину тиску ударної хвилі: 1 – при Γ(CO₂) = 3,5%, A = 2,9 г/м³; 2 – при Γ(CO₂) = 9,75%, A = 7,45 г/м³; 3 – при Γ(CO₂) = 16%, A = 12 г/м³

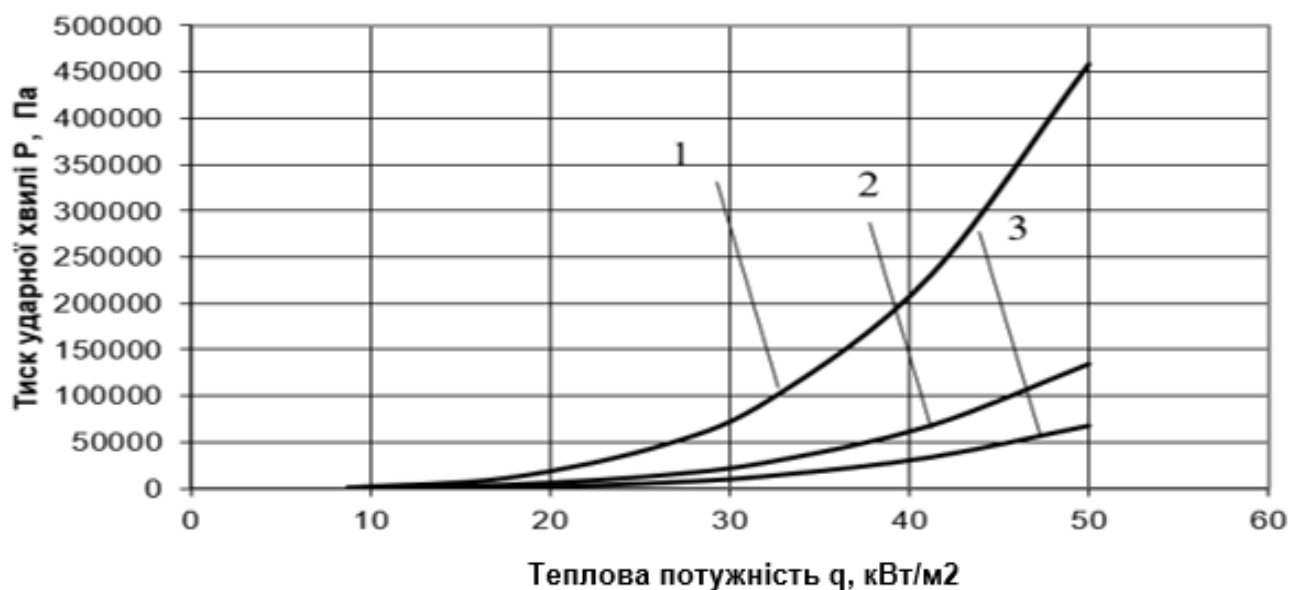


Рисунок 13 – Вплив потужності теплового потоку на величину тиску ударної хвилі: 1 – при $\Gamma(\text{N}_2) = 3,5\%$, $A = 2,9 \text{ г/м}^3$; 2 – при $\Gamma(\text{N}_2) = 12,25\%$, $A = 7,45 \text{ г/м}^3$; 3 – при $\Gamma(\text{N}_2) = 21\%$, $A = 12 \text{ г/м}^3$

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що має більший вплив на зменшення критичного тиску ударної хвилі (Рис.14) при використанні газу CO_2 . Крім цього, встановлено, що при збільшенні концентрації аерозолу в 4 рази значення P_{yx} зменшується до 7 разів.

Наведено результати експериментальних досліджень комбінованого гасіння вогнегасними системами на основі серій ударних хвиль та вогнегасних речовин об'ємної дії. Отримано значення тиску УХ, при яких відбувається гасіння дифузійного полум'я.

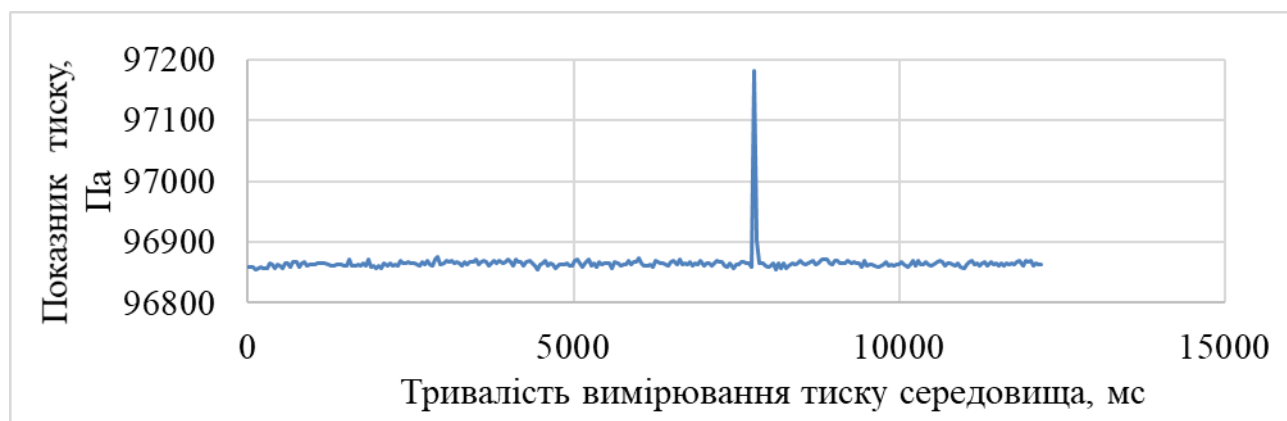


Рисунок 14 – Показник тиску ударної хвилі потужністю 316 Па, час ($\tau \approx 200$ мс)

Як зазначалося вище, моменти, які підтверджували вогнегасну ефективність, а також перехідні стани нестабільності полум'я були зафіксовані камерою Nikon1 j4 з частотою 1200 кадрів в секунду. Відповідно, були зафіксовано моменти

нестабільності полум'я при тиску УХ 190 Па (рис. 15), моменти гасіння одинарною ударною хвилею з потужністю 215 Па (рис. 16) і потужністю УХ 316 Па (рис.17), Теплова потужність полум'я для зазначеного тигля становила 4 кВт/м².

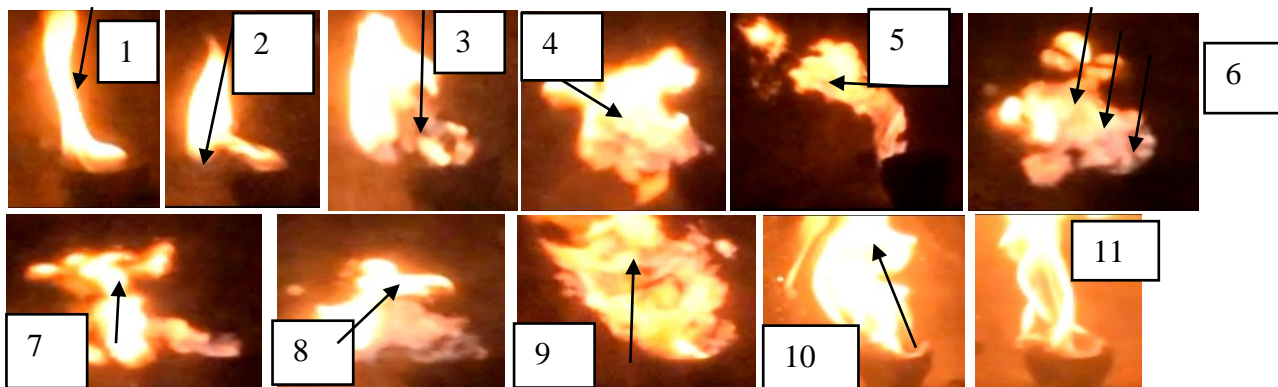


Рисунок 15 – Розкадрування моменту впливу ударної хвилі на полум'я $P = 190$ Па, час ($\tau \approx 800$ мс): Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі. $q = 4$ кВт/м²

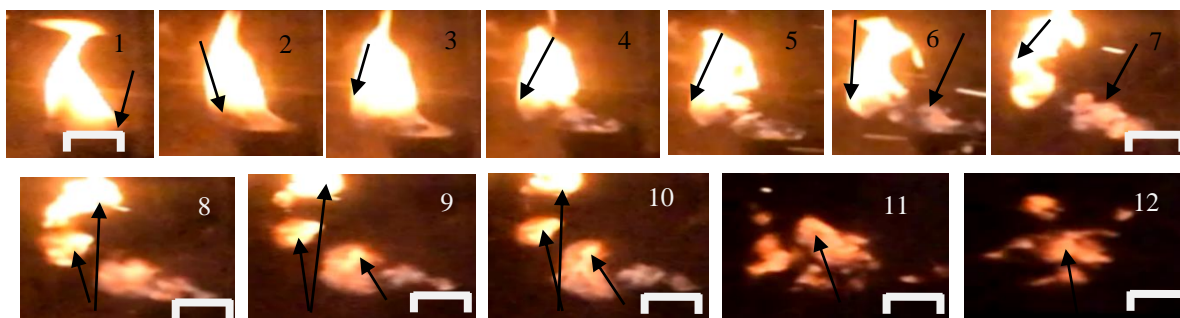


Рисунок 16 – Розкадрування процесу гасіння полум'я н-гептану ударною хвилею з тиском $P = 215$ Па. Тривалість гасіння ($\tau \approx 350$ мс): Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі. $Q = 4$ кВт/м²

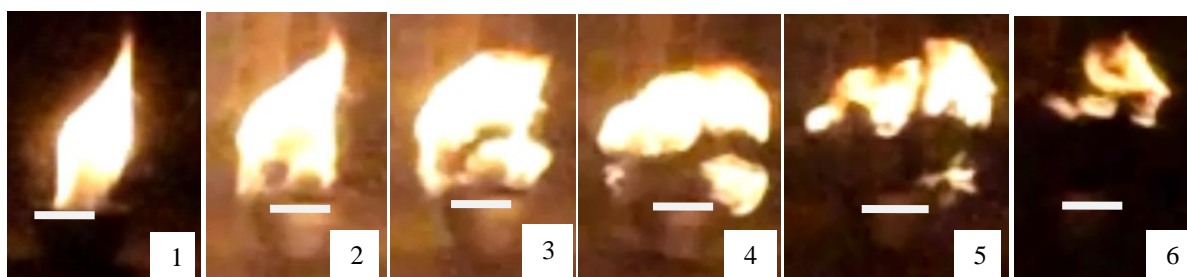


Рисунок 17 – Розкадрування моменту гасіння полум'я н-гептану C_7H_{16} ударною хвилею $P = 316$ Па. Час гасіння ($\tau \approx 300$ мс): Стрілкою вказано напрямок руху ударної хвилі. $Q = 4$ кВт/м²

З метою визначення вогнегасної ефективності серій ударних хвиль, залежно від їх потужності та частоти впливу, було проведено серію експериментів з різними їх значеннями за попередньо наведеною методикою при гасінні дифузійного полум'я н-гептану C_7H_{16} .

Результати експерименту показали, що при збільшенні частоти впливу серії з 3 ударних хвиль на дифузійне полум'я н-гептану до 8 - 12 Гц, гасіння відбувається при тиску окремої УХ в 172 Па. Рис. 18.

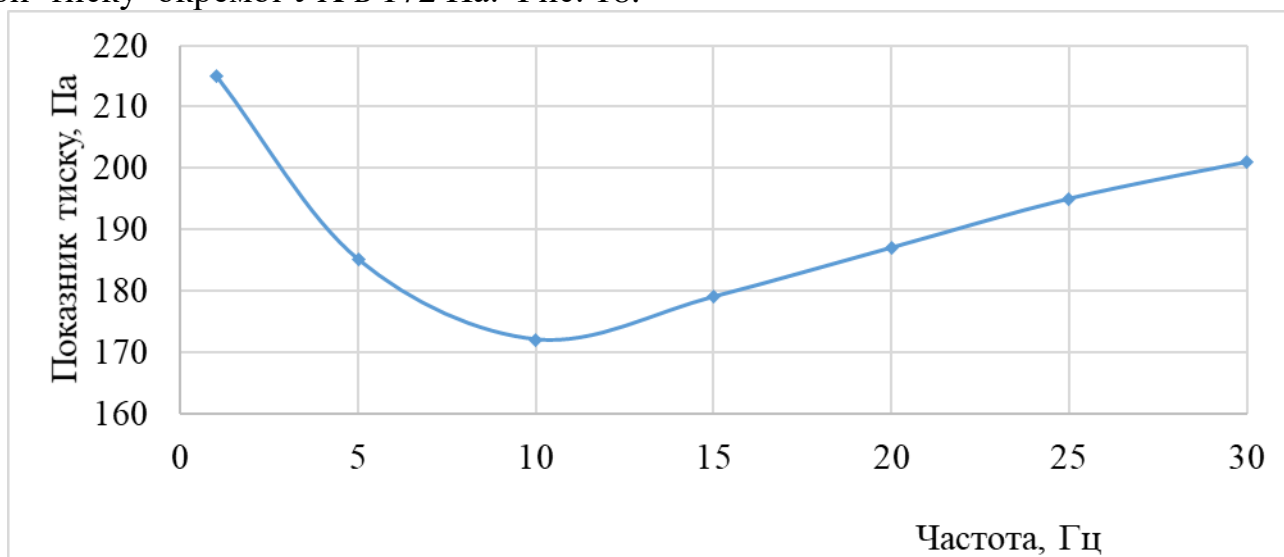


Рисунок 18 – Залежність вогнегасної ефективності УХ від їх частоти та потужності

Для виявлення особливостей гасіння серій УХ при визначених частотах на ДПГ було зафіксовано та проведено розкадровку процесу гасіння ДПГ при значеннях частоти УХ в 10 Гц, (рис. 19).

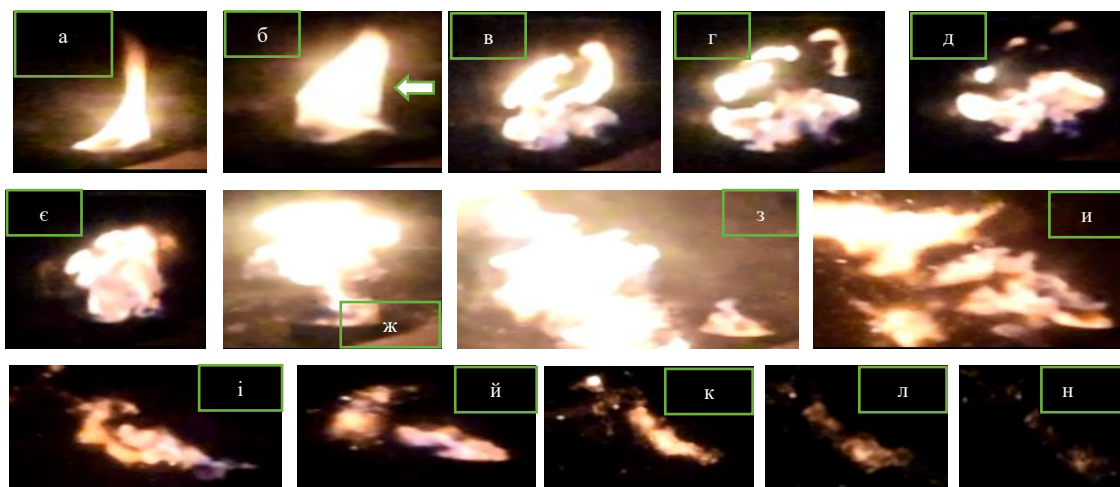


Рисунок 19 – Розкадровання моменту гасіння ДПГ серіями по 3 УХ з частотою 10 Гц

Як видно з розкадровки вплив серії УХ на ДПГ спричиняє значну турбулізацію полум'я, що видно на рис. 19 поз. в-к. При дії на полум'я першої УХ (Рис.19 б - е) відбувається значне збільшення розмірів полум'я, його фрагментація під дією УХ та відрив від зрізу тигля. Наступна УХ рис.19 поз. ж - и приводить до зменшення відірваного полум'я від тигля в протилежну сторону від напрямку УХ. При цьому видно, що полум'я відхиляється під кутом приблизно в 45° від тигля. Фрагментація при цьому посилюється, полум'я починає згасати, оскільки в зону горіння не поступає горюча пара н-гептану. Остання – третя УХ рис.19 к завершує процес гасіння ДПГ повністю фрагментуючи та гасячи невеликий фрагмент полум'я, який залишився після дії другої УХ. Загальний час гасіння серією з трьох

УХ становить близько 320 мс. Далі було проведено встановлення залежності вогнегасної концентрації CO_2 та N_2 від тиску УХ за попередньо наведеною методикою. Результати експериментів показані на рис. 20 та 21.

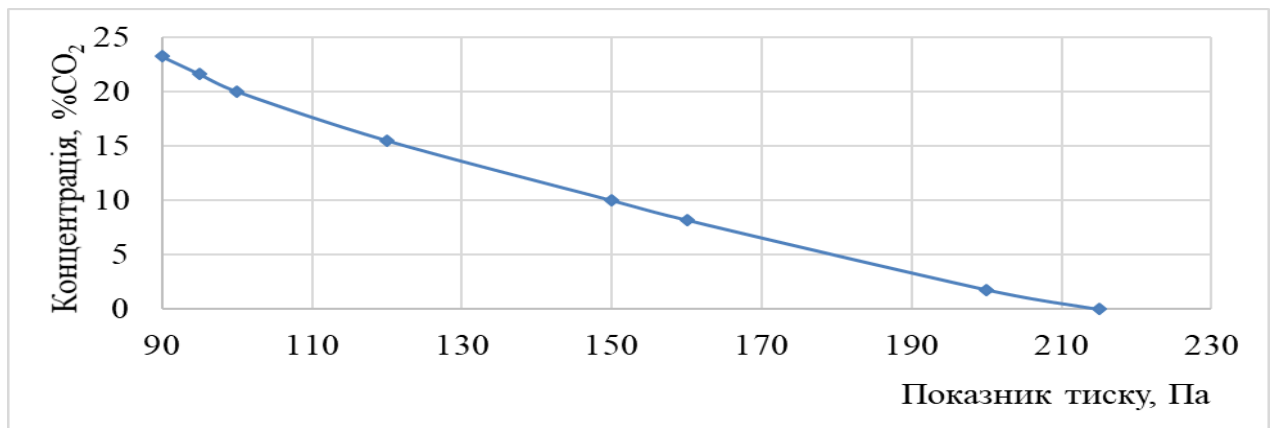


Рисунок 20 – Залежність вогнегасної концентрації CO_2 для н-гептану (C_7H_{16}) від потужності ударної хвилі (Па)

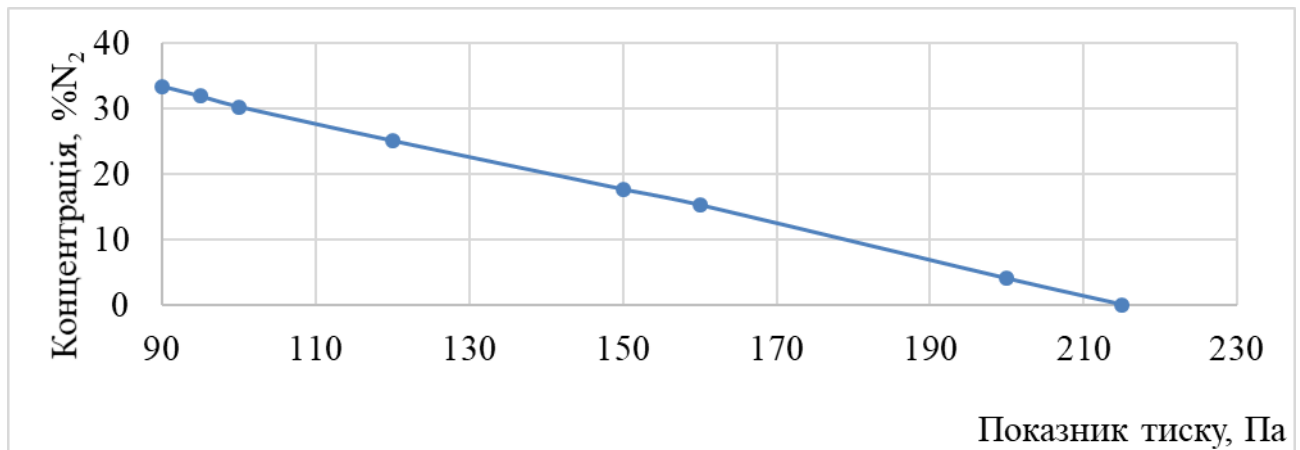


Рисунок 21 – Залежність вогнегасної концентрації N_2 для н-гептану (C_7H_{16}) від потужності ударної хвилі

Як видно, комбінована дія УХ та газової вогнегасної речовини забезпечує зниження вогнегасних концентрацій залежно від тиску УХ. При значенні тиску в 190 Па концентрація CO_2 становить відповідно близько 4%, а для азоту – 6%. Розкадрування етапів гасіння дифузійного полум'я CO_2 та N_2 при дії на полум'я н-гептану УХ з тиском у фронті 180 Па показано на рисунках 22 та 23.

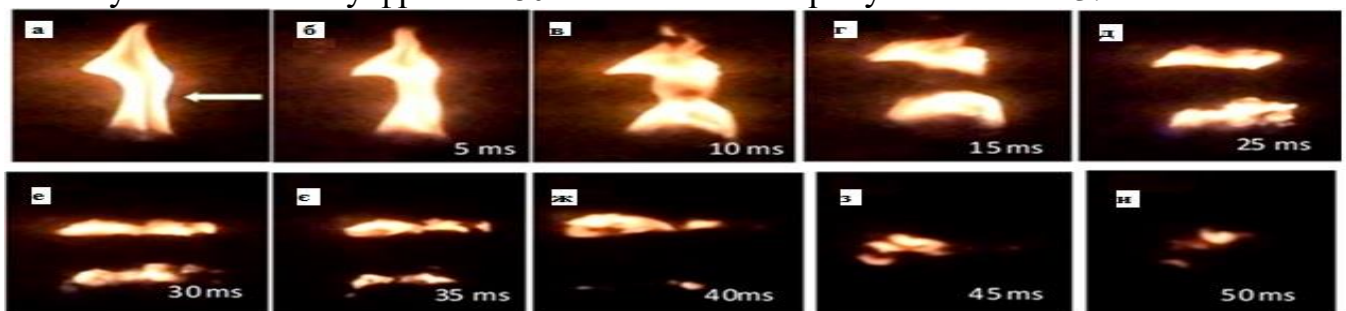


Рисунок 22 – Розкадрування у часі моменту гасіння дифузійного полум'я н-гептану ударною хвилею з потужністю $P = 180$ Па і концентрацією $\text{CO}_2 = 8.2\%$, Час гасіння ≈ 50 мс: Стрілкою вказано напрямок ударної хвилі

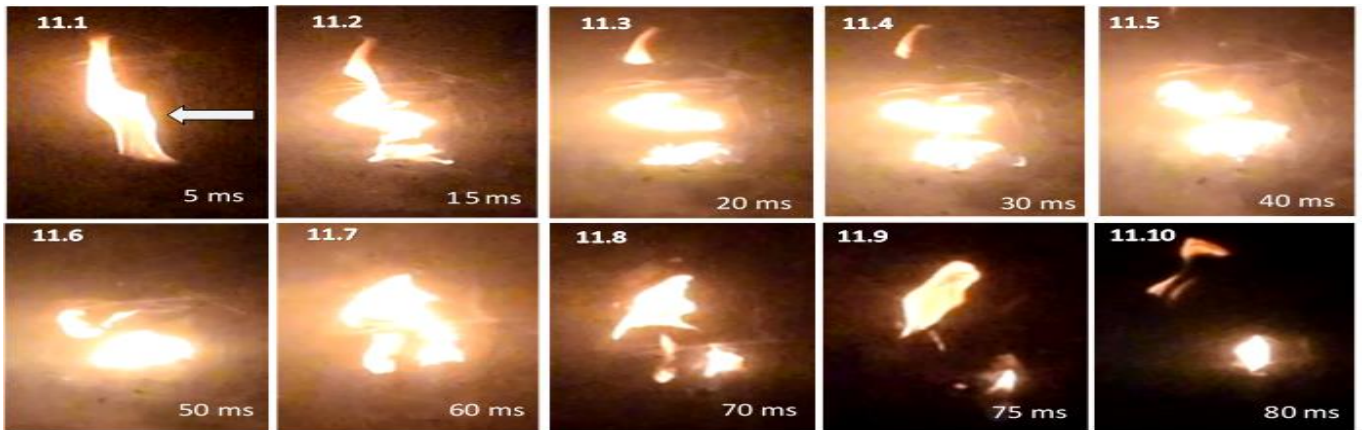


Рисунок 23 – Розкадрування в часі моменту гасіння дифузійного полум'я н-гептану ударною хвилею з потужністю $P = 180$ Па і концентрації $N_2 = 23.4\%$. Час гасіння ≈ 84 мс: Стрілкою зазначений напрямок ударної хвилі

Також було експериментально визначено вогнегасну ефективність комбінованих вогнегасних систем (газова об'ємна вогнегасна речовина (CO_2 , N_2) та серій потрійних ударних хвиль з частотою 1 - 30 Гц при гасінні дифузійного полум'я н-гептану. Результати експерименту показані на рисунках 23, 24.

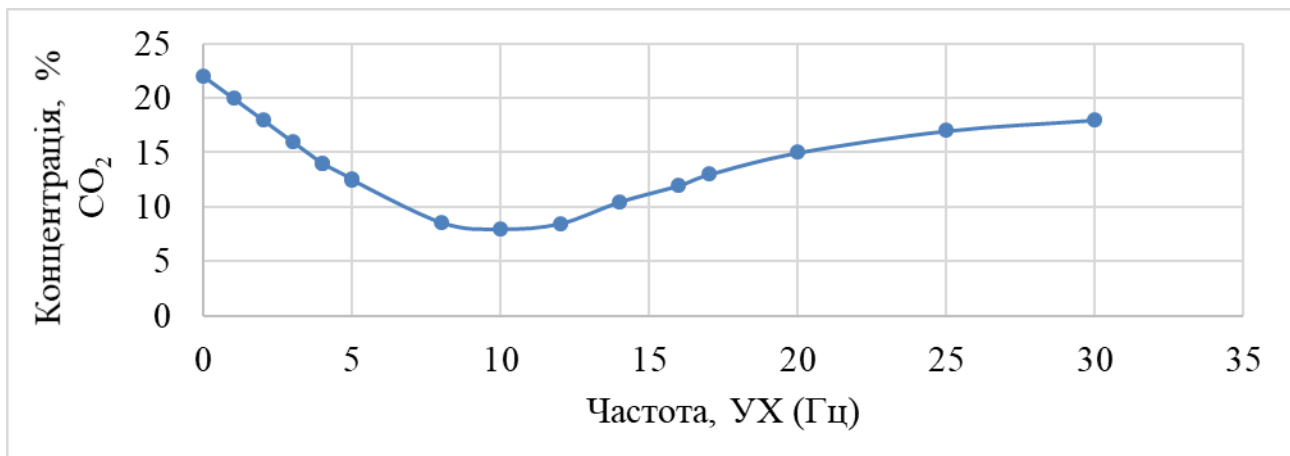


Рисунок 24 – Вогнегасна концентрація CO_2 при впливі на ДПГ ударних хвиль з різною частотою

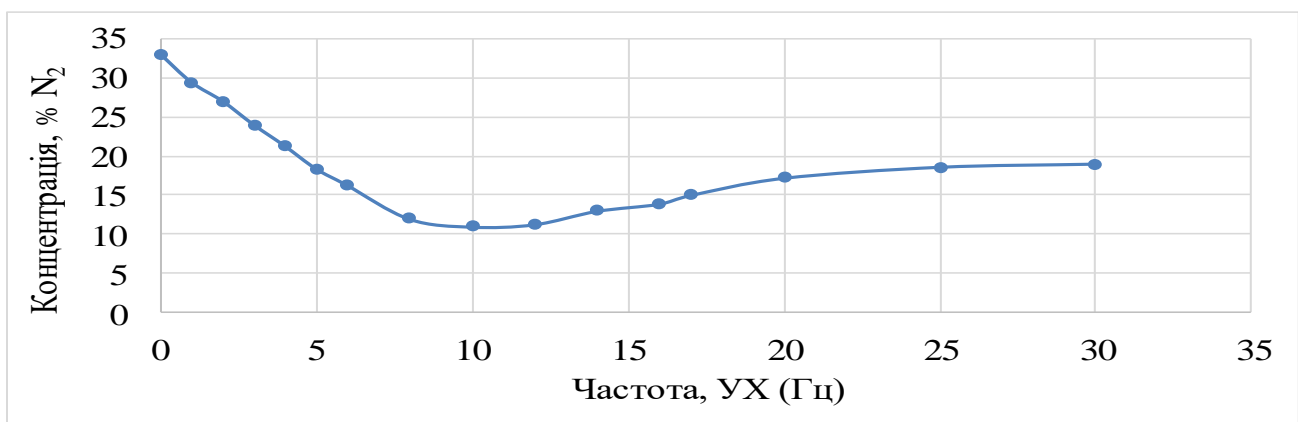


Рисунок 25 – Вогнегасна концентрація N_2 при впливі на ДПГ ударних хвиль з різною частотою

Результати експериментів показали, що серії УХ з частотою 8-12 Гц значно підвищують вогнегасну ефективність газів CO_2 (рис.24) та N_2 (рис.25).

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.

У зв'язку з очікуваним підвищенням вогнегасної ефективності було збільшено розмір експериментального тигля. Спочатку була визначена вогнегасна ефективність УХ при гасінні дифузійного полум'я н-гептану (ДПГ) з тепловою потужністю випромінювання 18 кВт/м^2 (діаметр тигля 100 мм).

Результати експерименту з визначення вогнегасної дії одинарної УХ показані на графіку (рис.26), а з серією з трьох УХ з частотою 10 Гц на графіку (рис. 27). Експеримент щодо визначення вогнегасної ефективності проводили у такий спосіб: 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.

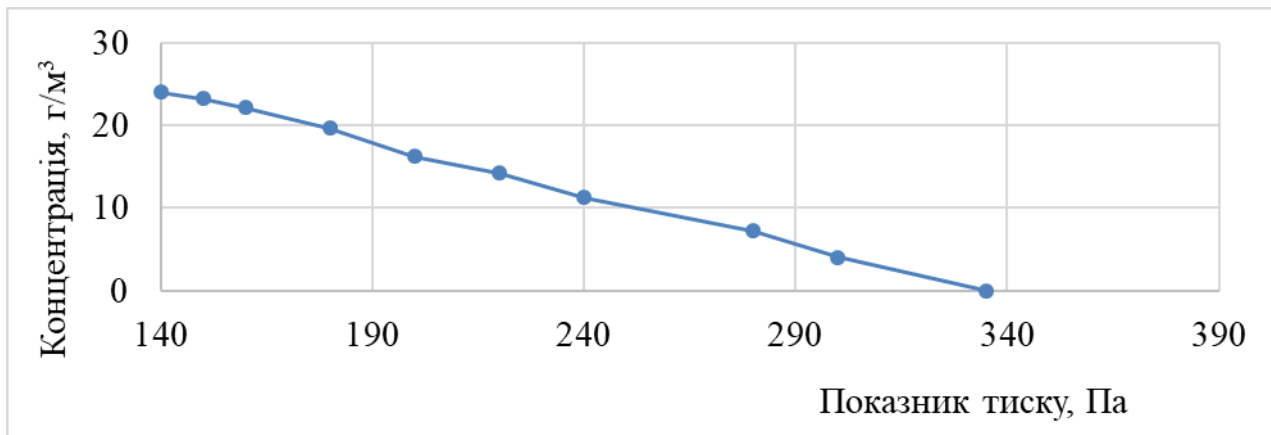


Рисунок 26 – Залежність вогнегасної концентрації (г/м³) аерозолі від тиску (Па) одинарної ударної хвилі.

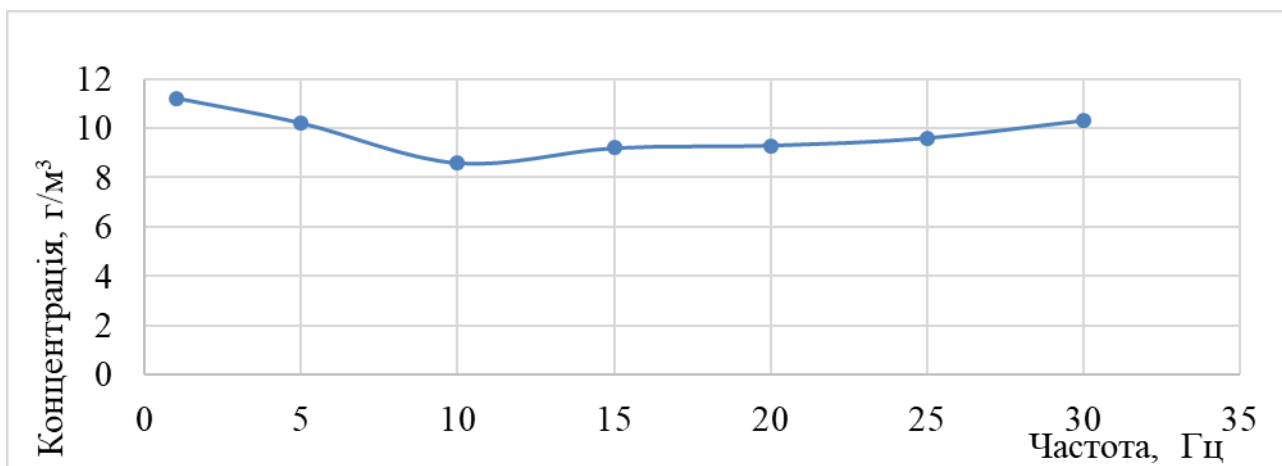


Рисунок 27 – Залежність вогнегасної концентрації (г/м³) аерозолі від частоти (Гц) впливу ударної хвилі (серії по 3 УХ).

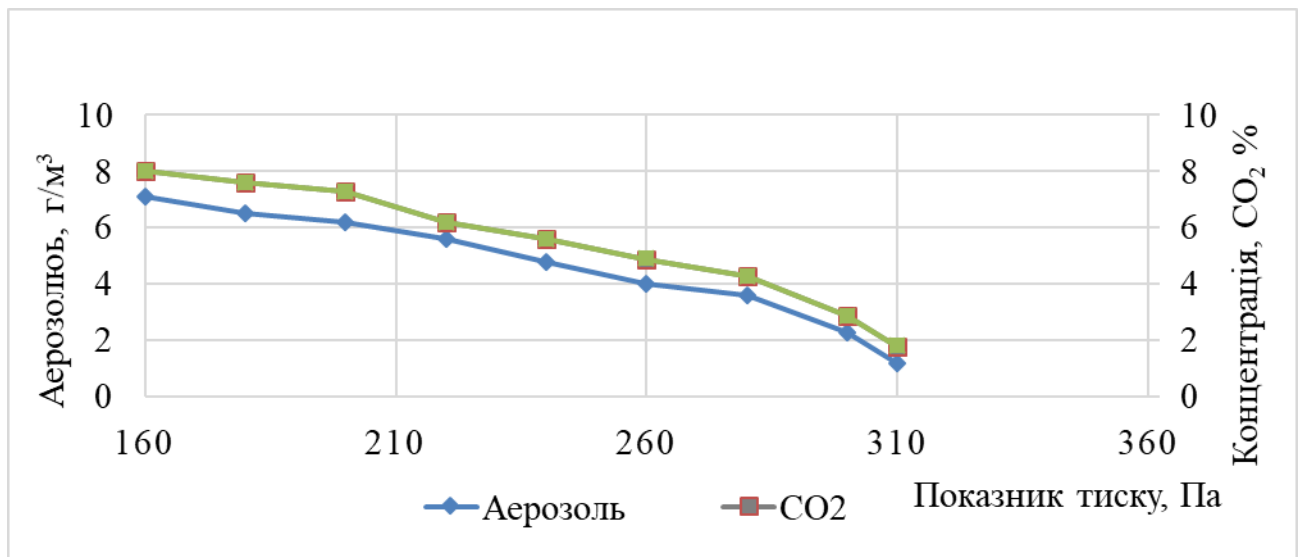


Рисунок 28 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші CO₂ і аерозолі від потужності одинарної ударної хвилі

Як видно, (рис.26), при впливі на ДПГ однієї ударної хвилі вогнегасна концентрація аерозолі значно знижується. При збільшенні тиску УХ вогнегасна концентрація аерозолі падає і при досягненні 240 Па зменшується до 11,2 г/м³. При застосуванні серії УХ максимальне зниження вогнегасної концентрації відбувається при частоті УХ в 10 Гц (рис. 27). Додавання газів до аерозолі забезпечує досягнення двох важливих цілей, а саме: збільшення вогнегасної ефективності створеної бінарної системи і зменшення в ній концентрації вогнегасного аерозолі, що призводить до збільшення ефективної вогнегасної відстані УХ, внаслідок зменшення дисипації УХ. Таким чином, добавка газів до аерозолі призведе до зменшення дисипації УХ в утвореному середовищі і збільшенні ефективної відстані вогнегасної дії УХ і загальної вогнегасної ефективності тернарної вогнегасної системи. Далі було проведено визначення вогнегасної ефективності потрійних систем вогнегасний аерозоль + газ флегматизатор (CO₂, N₂) + УХ при впливі одинарної ударної хвилі. Результати експериментів показані на рис. 28 і 29.

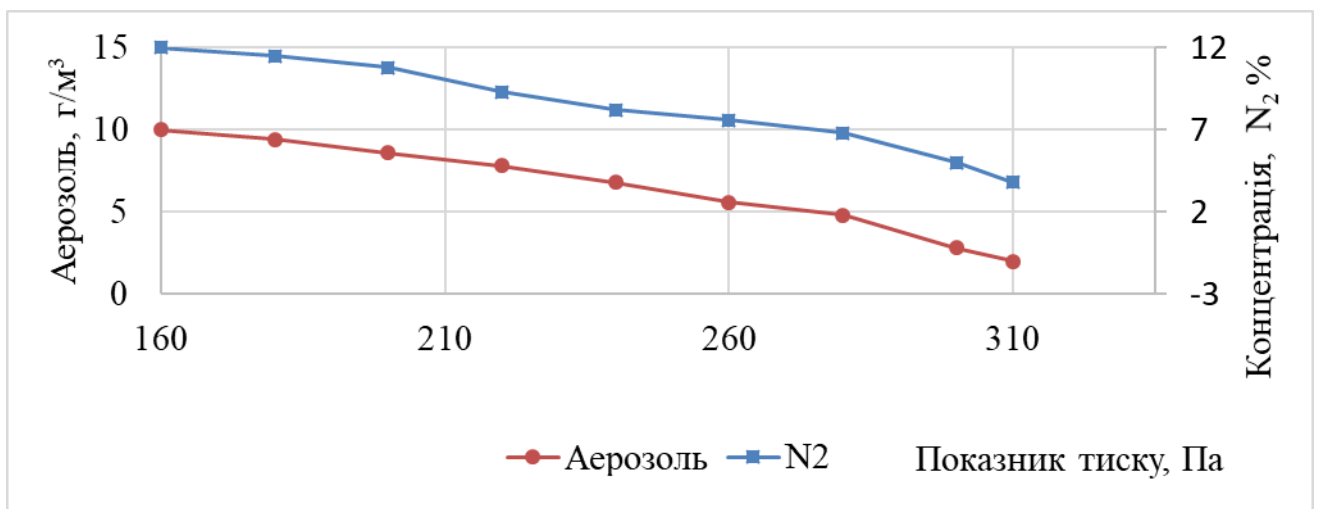


Рисунок 29 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші N₂ і аерозолі від потужності одинарної ударної хвилі

Як видно з графіків рис. 28 та 29, при збільшенні тиску УХ вогнегасна концентрація аерозолі і газу CO_2 знижується і оптимальними співвідношеннями компонентів у тернарній вогнегасній системі при тиску у фронті УХ близько 240 Па є співвідношення аерозолі - $4,8 \text{ г/м}^3$ та CO_2 - 5,6%. Оптимальне співвідношення приймаємо відповідно до 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 аерозолі і азоту та отримано наступні співвідношення : аерозолі – $7,8 \text{ г/м}^3$, N_2 – 9,6%. З метою визначення часу і особливостей гасіння тернарною системою було проведено розкадрування процесу гасіння (рис. 30) при таких параметрах: аерозолі – $4,8 \text{ г/м}^3$ і CO_2 – 5,6% та тиском в 240 Па одинарної ударної хвилі. Як видно з розкадровки (рис. 30), при гасінні зазначеною системою полум'я відривається і фрагментується вже на 40 мс (рис. 30, позн. 5), що значно швидше, ніж в разі гасіння самою УХ, коли час гасіння становить 350 мс.

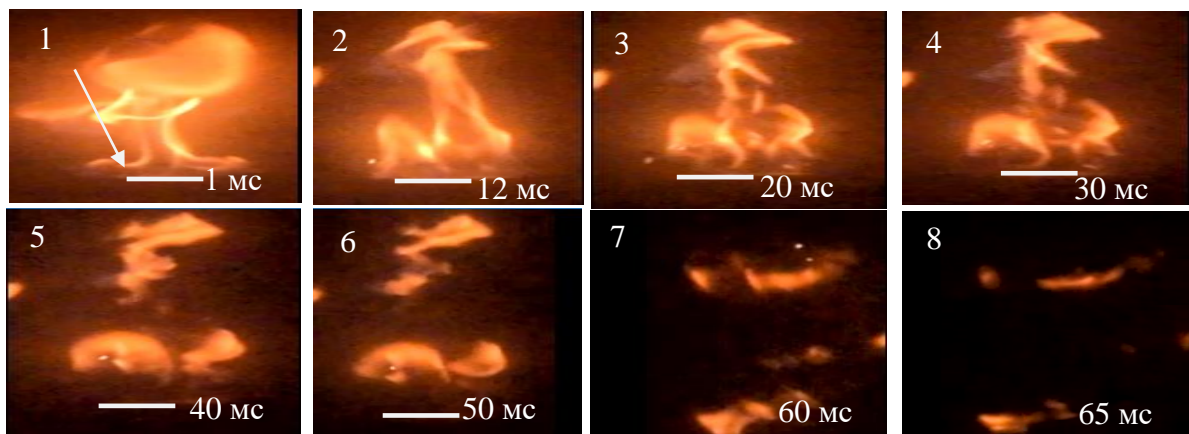


Рисунок 30 – Розкадрування процесу гасіння тернарною системою УХ ($P \approx 240 \text{ Па}$), аерозоль – (4.8 г/м^3), CO_2 – (5.6%): Час гасіння: 65 мс

При цьому, процес відриву відбувається при мінімальному тиску в 240 Па у фронті УХ, потім полум'я значно фрагментується та за вдяки комбінованій дії УХ і газів згасає на 65 мс (рис. 30, поз. 8). Рівень тигля на розкадруванні (рис. 30) вказано стрілкою. Процес гасіння бінарною сумішшю з N_2 відбувається таким же чином як і у 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. У результаті гасіння відбувається за час трохи більший, ніж при гасінні CO_2 , і становить $\approx 94 \text{ мс}$.

Далі визначено вогнегасну ефективність бінарної суміші аерозолі, отриманого з АУС на основі ідітола з добавками газів CO_2 і N_2 при впливі серій УХ з частотою 10 Гц на ДПГ в газоаерозольній системі. При цьому були отримані результати з вогнегасною концентрацією газів CO_2 і N_2 в зазначених умовах, які показані на графіках (рис. 31 та 32). На графіках (Рис. 31) показана залежність вогнегасних концентрацій бінарної суміші аерозолі і CO_2 від частоти впливу серії трьох ударних хвиль з P (УХ) $\approx 240 \text{ Па}$, а на графіку (рис. 32) показана залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолі і N_2 від частоти впливу серії з трьох УХ ударних хвиль з P (УХ) $\approx 240 \text{ Па}$. Як видно з графіків (рис. 31 та 32) 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 аерозолу. Для азоту вогнегасні концентрації відповідно падають, для аерозолу 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 спостерігалось значне зменшення вогнегасних концентрацій аерозолу і газів при впливі УХ з частотою 10 Гц і тиском в 240 Па.

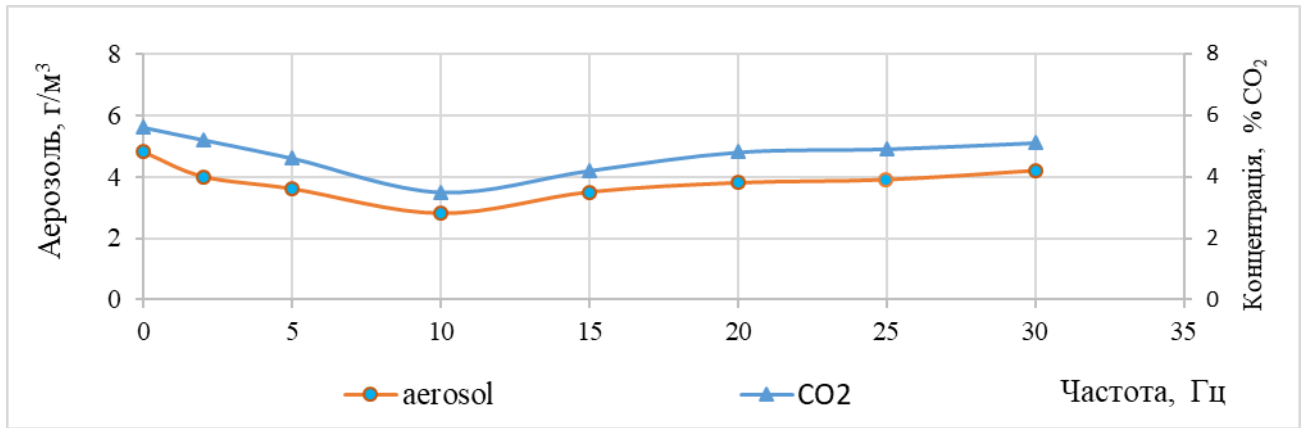


Рисунок 31 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолу і CO_2 від частоти впливу серії 3-х ударних хвиль з $P \approx 240$ Па

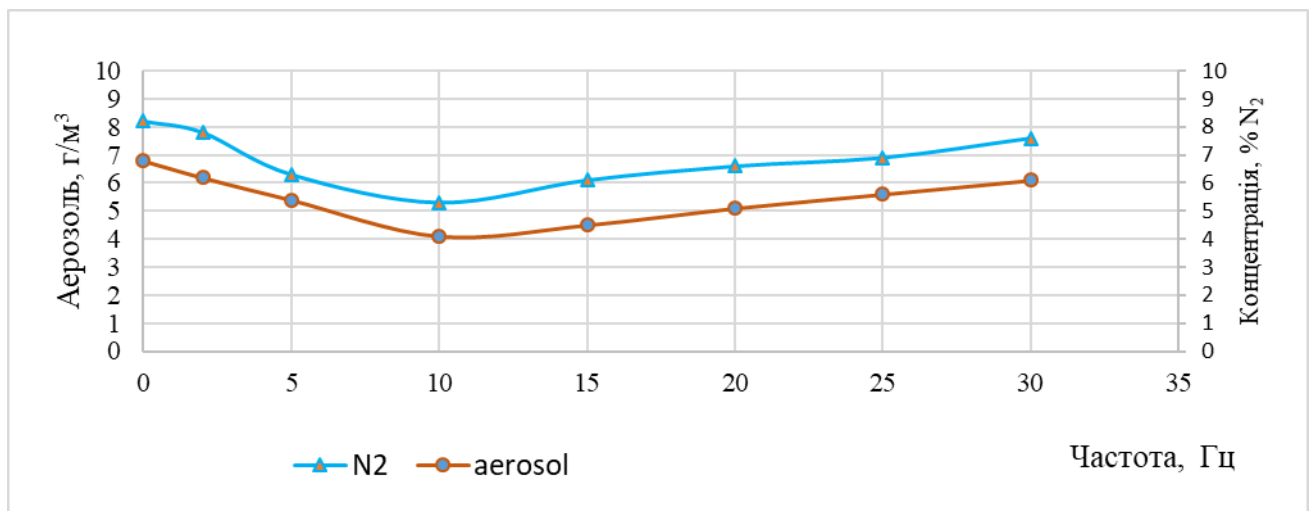


Рисунок 32 – Залежність вогнегасної ефективності бінарної суміші аерозолу і N_2 від частоти впливу серії 3-х ударних хвиль з $P \approx 240$ Па

Розкадрування процесу гасіння зазначеною тернарною системою показало, що полум'я при одночасній дії УХ, аерозолу, та CO_2 значно турбулізується і відривається при меншому тиску у фронті УХ ніж в разі гасіння самим газом або аерозолем.

Таким чином, в результаті розкадрування можна побачити значну різницю при гасінні одинарною УХ, коли полум'я відразу по проходженні 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 трьох 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.

На основі експериментальних результатів складено узагальнену таблицю 4 і з значеннями вогнегасних співвідношень для досліджуваних комбінованих систем на основі об'ємних вогнегасних речовин та ударних хвиль.

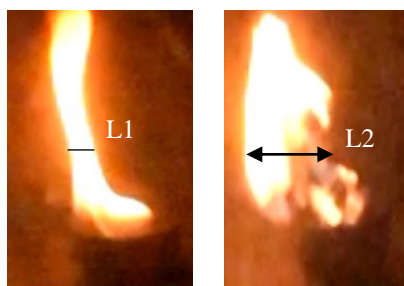
Таблиця 4

Порівняльна таблиця вогнегасних ефективностей систем з ударною хвилею

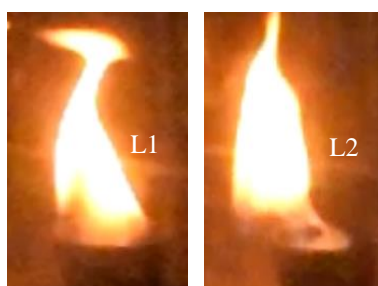
Вплив УХ (одинарна, серії)	Тиск УХ Па	Теплова потужність полум'я кВт/м ²	СО ₂ , %	Н ₂ , %	Аерозоль г/м ³
одинарна УХ	215	4	-	-	-
одинарна УХ	180	4	5,1	-	-
одинарна УХ	180	4	-	10,2	-
одинарна УХ	180	4	-	-	10,3
серії УХ (10 Гц)	172	4	-	-	-
серії УХ (10 Гц)	172	10	4,8	-	-
серії УХ (10 Гц)	170	10	-	10,8	-
серії УХ (10 Гц)	170	10	-	-	8,2
одинарна УХ	240	18	4,9	-	5,6
одинарна УХ	240	18	-	8,2	6,8
серії УХ (10 Гц)	240	18	3,5	-	2,8
серії УХ (10 Гц)	240	18	-	5,3	4,1

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. 33, в якому показано витяги з рисунків попередніх експериментів. Збільшення об'єму полум'я вимірювалось посередині його висоти та позначалось L1 до дії УХ та L2 після дії УХ. Як видно з рис. 33 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 відразу починається його фрагментація та подальше збільшення в об'ємі. Утворені фрагменти починають розходитись в протилежні сторони в просторі та догорати, після чого між зоною парів і газів та зоною горіння утворюється розрив, через який полум'я не здатне відновитись. На рисунку 33 показано, що розширення полум'я відбувається відразу після проходження УХ через полум'я. Це призводить, 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.



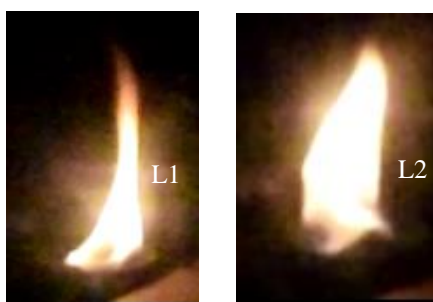
а. $P_{yx} = 190 \text{ Па}$
 $L1 = 10 \text{ мм}$ $L2 = 36 \text{ мм}$
 $T = 35 \text{ мс}$ $Q = 4 \text{ кВт}$



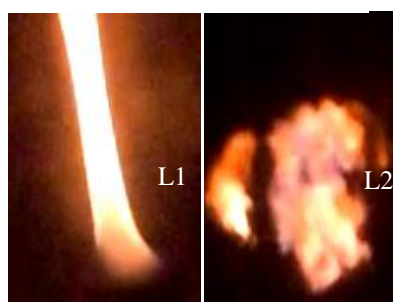
б. $P_{yx} = 215 \text{ Па}$
 $L1 = 26 \text{ мм}$ $L2 = 31 \text{ мм}$
 $T = 30 \text{ мс}$ $Q = 4 \text{ кВт}$



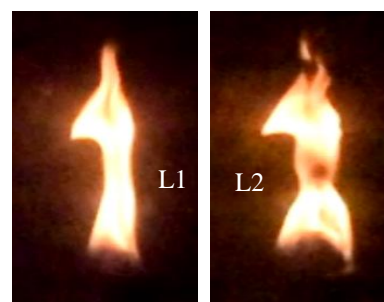
в. $P_{yx} = 316 \text{ Па}$
 $L1 = 30 \text{ мм}$ $L2 = 46 \text{ мм}$
 $T = 35 \text{ мс}$ $Q = 4 \text{ кВт}$



г. $P_{yx} = 180 \text{ Па}$
 $L1 = 10 \text{ мм}$ $L2 = 30 \text{ мм}$
 (35 мс) $T = 25 \text{ мс}$ $Q = 4 \text{ кВт}$



д. $P_{yx} = 195 \text{ Па}$ (20Гц).
 $L1 = 11 \text{ мм}$
 $L2 = 58 \text{ мм}$ $T = 35 \text{ мс}$
 $Q = 4 \text{ кВт}$



е. $P_{yx} = 180 \text{ Па}$ $\text{CO}_2 = 8.2\%$
 $L1 = 14 \text{ мм}$
 $L2 = 44 \text{ мм}$ $T = 15 \text{ мс}$
 $Q = 4 \text{ кВт}$



ж. $P_{yx} = 180 \text{ Па}$
 $N_2 = 26,4\%$ $L1 = 14 \text{ мм}$.
 $L2 = 42 \text{ мм}$. $T = 15 \text{ мс}$.
 $Q = 4 \text{ кВт}$.



з. $P_{yx} = 195 \text{ Па}$
Аерозоль = $4,8 \text{ г/м}^3$
 $N_2 = 5,6\%$, $L1 = 66 \text{ мм}$,
 $L2 = 106 \text{ мм}$, $T = 35 \text{ мс}$,
 $Q = 18 \text{ кВт}$



и. $P_{yx} = 240 \text{ Па}$ (10Гц)
Аерозоль = $4,1 \text{ г/м}^3$
 $N_2 = 5,3\%$ $L1 = 68 \text{ мм}$
 $L2 = 120 \text{ мм}$ $T = 35 \text{ мс}$
 $Q = 18 \text{ кВт}$

Рисунок 33 – Розширення полум'я в результаті дії ударної хвилі

В розділі 5 було наведено технічні характеристики та описано результати полігонних випробувань пристроїв комбінованого гасіння (ПКГ), розроблених на основі залежностей та явищ, які були виявлені та встановленні попередньо. Узагальнені вогнегасні співвідношення наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Практичні параметри вогнегасної ефективності комбінованих ударних систем на основі ударних хвиль

№ з/п	Вогнегасні компоненти		Аерозоль г/м ³	Газ %		P _{УХ} (Па)	Час підвищеної вогнегасної дії, с	Час загальної вогнегасної дії, хв	Відстань ефективної дії L, м
				CO ₂	N ₂				
1	Аерозоль	C _B	25	–	–	–	–	25	–
2	Бінарна суміш аерозолю з CO ₂	C _B	14	10	–	–	–	25	–
3	Бінарна суміш аерозолю з N ₂	C _B	24	–	10	–	–	25	–
4	Комбінована система аерозолю з УХ	C _B	20	–	–	2500	0,5	25	4
5	Комбінована тернарна система аерозолю, CO ₂ та УХ	C _B	10	7	–	2500	0,5	25	4
6	Комбінована тернарна система аерозолю, N ₂ та УХ	C _B	15	–	11	2500	0,5	25	4

На основі зазначених в табл. 5 співвідношень розроблено ПКГ, характеристики яких вказано в таблиці 6 та 7, а принципову будову на рисунку 34.

Таблиця 6

Технічні параметри ГВА та ПКГ швидкої дії із використанням серій ударних хвиль та обґрунтованими на об'єм 65м³ технічними параметрами

Модель ПКПГ	Концентрація аерозолю, г/м ³		Вага заряду АУС, г	Концентрація газів, %		Загальний об'єм газів, л		P _{УХ} Па	τ _{заг} , хв	τ _{підв.} , вогнегасної дії, с
	C _в	50		3250	CO ₂	N ₂	CO ₂			
ГВА-65Г ГВА-65В	C _в	50	3250	–	–	–	–	–	25	–
ПКГ -65АУГ ПКГ -65АУВ	C _а	30	1950	–	–	–	–	2500	25	3 серії по 3 УХ 0,3 с
ПКГ - 65БКУГ ПКГ - 65БКУВ	C _а	14,7	956	5	–	4550	–	2500	25	3 серії по 3 УХ 0,3 с
ПКГ - 65БУАГ ПКГ - 65БАУВ	C _а	19,2	956	–	5	–	4550	2500	25	3 серії по 3 УХ 0,3 с

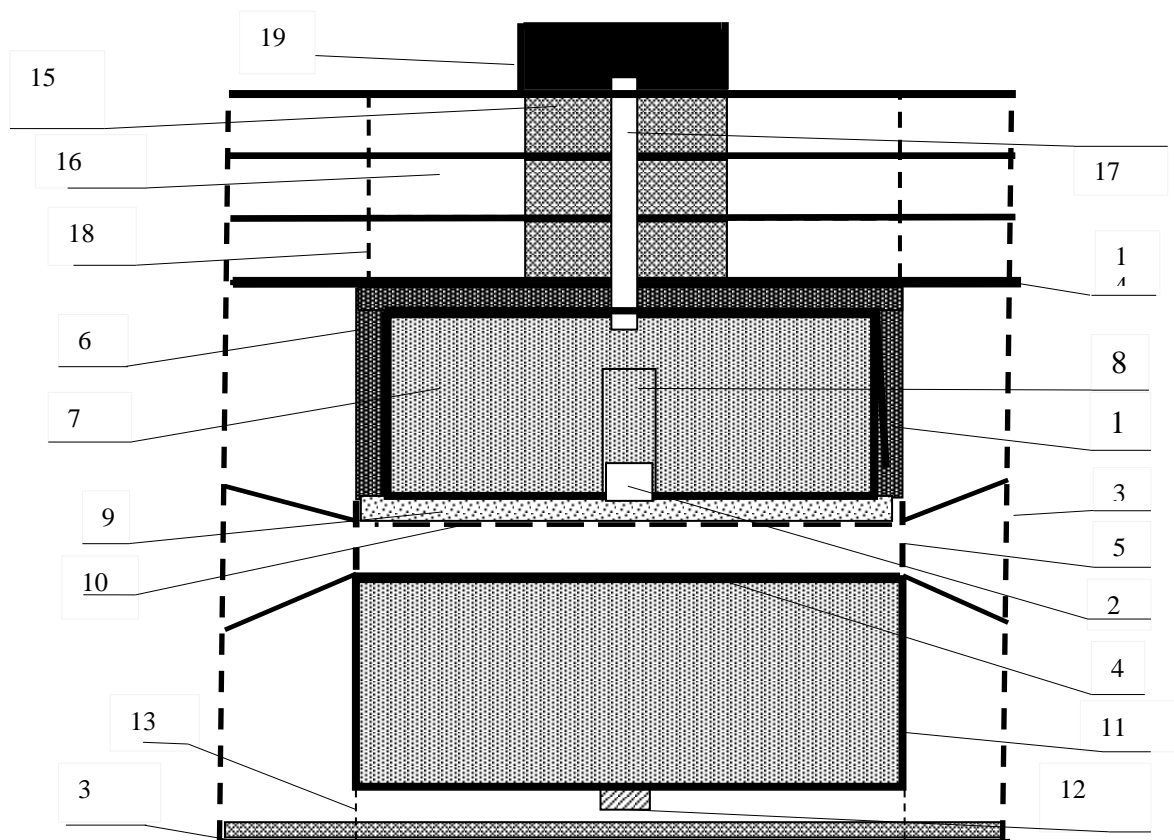


Рисунок 34 – ПКГ швидкої дії бінарною газоаерозольною сумішшю та ударними хвилями горизонтального розташування: (ПГПП-4УВВ)

1 – корпус генератора; 2 – запальник; 3 – зовнішня оболонка; 4 – кришка; 5 – сопло; 6 – теплоізолюючий шар; 7 – заряд аерозольутворювальної сполуки; 8 – внутрішній

канал; 9 – сітчастий блок або хімічний гранульований охолоджувач; 10 – утримуюча решітка; 11 – ємність з газовою вогнегасною речовиною; 12 – запірно-випускна головка; 13 – сопло; 14 – верхня кришка; 15 – піротехнічні заряди; 16 – направляючі секції; 17 – вогнепровідний шнур; 18 – ізолююча плівка; 19 – ізолювальна оболонка

Таблиця 7

Характеристики генераторів ударних хвиль

№ з/п	Тип генератора ударних хвиль	Кількість серій УХ	Кількість УХ в серії	Ефективна вогнегасна відстань L, м	Маса заряду, г
1	ГУХ – 134	1	3	4	4
2	ГУХ – 334	3	3	4	4
3	ГУХ – 534	5	3	4	4
4	ГУХ – 131А	1	3	1	0,8
5	ГУХ – 331А	3	3	1	0,8
6	ГУХ – 354	3	5	4	4
7	ГУХ – 554	5	5	4	4

Результати полігонних випробувань розроблених генераторів та їх комбінацій з ГУХ та ПКГ показано в таблиці 8.

Таблиця 8

Результати полігонних випробувань гасіння модельних вогнищ класу В площею 0,07 м² (№1) та 0,38 м² (№2) (дизельне пальне та бензин)

Типи застосованих генераторів ударних хвиль та пристроїв комбінованого пожежогасіння	Місце розташування генераторів і пристроїв комбінованого пожежогасіння	Результат гасіння	Примітка
ГВА -65Г	Генератор розташовано посередині довшої стінки на висоті 1.15 м від рівня підлоги.	Горіння трьох модельних вогнищ №1 припинено.	Тривалість гасіння не перевищувала 180 с з моменту дії на вогнище аерозолію.
ГУХ – 3.3.8.66	Генератор розташовано посередині довшої стінки на висоті 1.15 м від рівня підлоги та на боковій стінці.	Горіння двох модельних вогнищ №1, розташованих на висоті 0,8 та 1.5 м припинено. Модельне вогнище на висоті 2,3 м не	Тривалість гасіння не перевищувала 10 с від моменту дії на вогнище ударних хвиль. Повторного займання двох вогнищ на висоті 0.8 та 1,5 м не зафіксовано

		погашено.	протягом 120 с.
Комбіноване гасіння ГВА-65Г+ ГУХ 1– 5.3.4. 36 (2 шт)	Генератор вогнегасного аерозолю та 2 генератора ударних хвиль розташовано посередині довшої стінки на висоті 1.15 м від рівня підлоги та на боковій стінці.	Горіння модельних вогнищ №1 припинено.	Тривалість гасіння не перевищувала 9 с від моменту дії на вогнище ударних хвиль. Повторного займання вогнищ не зафіксовано протягом 120 с.
ПКГ - 65БКУГ	Пристрій комбінованого гасіння прикріплено до нижньої площини посередині вогнища	Горіння модельного вогнища №2 припинено.	Тривалість гасіння не перевищувала 40 с з моменту дії на вогнище УХ.
Комбіноване гасіння ГУХ 1– 5.3.4. 36 ГВА-65Г	Генератор ударних хвиль прикріплено до нижньої площини посередині вогнища. Генератор вогнегасного аерозолю розташовано посередині довшої стінки на висоті 1,15 м від рівня підлоги.	Горіння модельного вогнища №2 припинено.	Тривалість гасіння вогнища не перевищувала 9 с від моменту дії ударних хвиль. Повторного займання вогнища не зафіксовано протягом 120 с.
ПКГ - 65БКУГ	Пристрій комбінованого гасіння прикріплено до нижньої площини посередині вогнища	Горіння модельного вогнища №2 припинено.	Тривалість гасіння не перевищувала 40 с з моменту дії на вогнище УХ.
ГУХ 1– 3.3.1.3	Генератор ударних хвиль прикріплено в нижній площині з напрямком руху ударних хвиль на вогнище.	Горіння модельного вогнища №2 припинено.	Тривалість гасіння не перевищувала 10 с моменту дії на вогнище УХ.

<p>Комбіноване гасіння ГУХ 1– 3.3.1.3 FIRESTOP -15</p>	<p>Генератор ударних хвиль прикріплено в нижній площині з напрямком руху ударних хвиль на вогнище. FIRESTOP - 15 встановлювався в верхній частині камери над вогнищем.</p>	<p>Горіння модельного вогнища №2 припинено.</p>	<p>Тривалість гасіння не перевищувала 10 с з моменту дії на вогнище УХ.</p>
--	--	---	---

У розділі 6 представлені дані щодо впровадження результатів досліджень.

На зазначені пристрої та способи отримано 2 патенти України на винахід та 2 патенти на корисну модель. На генератори вогнегасного аерозолю, автономну систему гасіння було розроблено технічні умови, проведено сертифікаційні випробування та отримано сертифікати відповідності.

Розроблено рекомендації щодо застосування створених пристроїв, які забезпечують реалізацію технології швидкого гасіння пожежі на основі комбінованої дії ударних хвиль та вогнегасних речовин об'ємної дії (аерозольотворювальних сполук та газових вогнегасних речовин-розріджувачів), за умови їх правильного розташування в захищуваному середовищі.

Ефективне застосування розроблених пристроїв горизонтального розташування забезпечується встановленням як в нижній частині приміщення, так і верхній (рис. 35 та 36).

Варіанти розташування ПКГ показані на рис. 35.

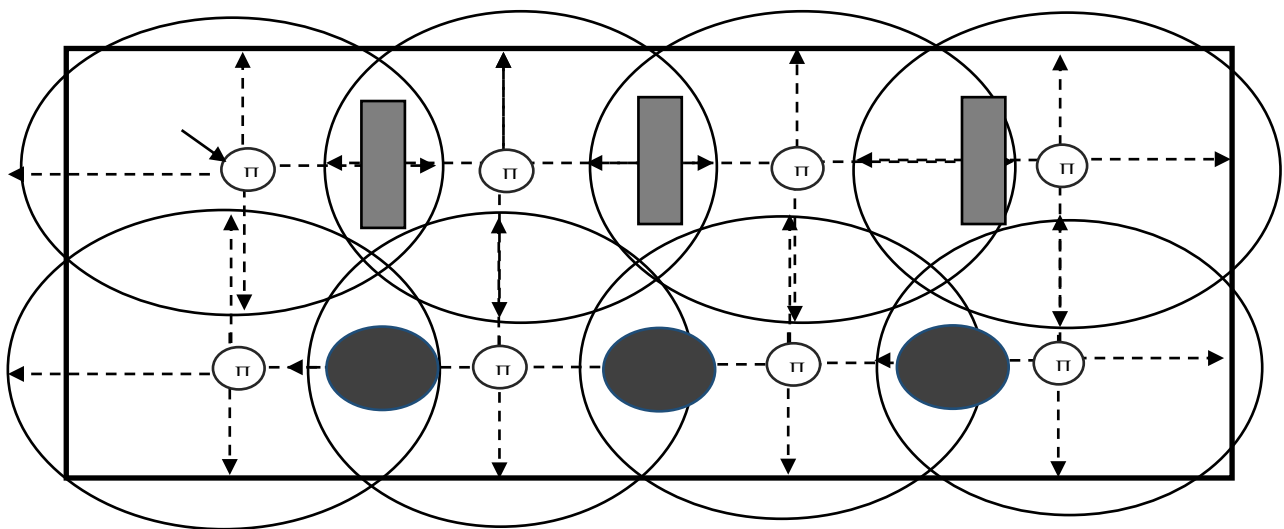


Рисунок 35 – Розташування ПКГ горизонтального розташування для захисту машинного залу

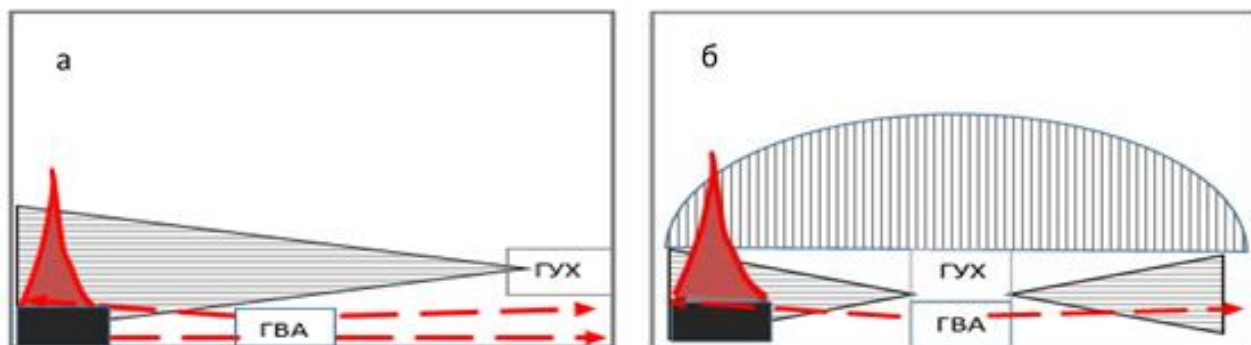


Рисунок 36 – Приклади встановлення пристроїв комбінованого гасіння горизонтального розташування:

а – окреме встановлення ГУХ та ГВА; б – сумісне встановлення ГУХ та ГВА

Виконано техніко-економічне обґрунтування виробництва розроблених генераторів вогнегасного аерозолю та пристроїв комбінованого гасіння та попередження пожежі. Встановлено, що вартість захисту одиниці об'єму (див. Табл. 9) є конкурентною порівняно з існуючими пристроями, системами та засобами пожежогасіння. Відповідно, вартість одиниці об'єму становить для ГВА від 60 грн/м³, для систем комбінованого гасіння (ПКГ - 65АУГ, ПКГ - 65АУВ) на основі вогнегасного аерозолю та ударних хвиль – від 70 грн/м³, при швидкій дії. Для ПКГ - 65БКУГ ПКГ- 65БКУВ – від 84 грн/м³. Для систем комбінованого гасіння та попередження пожеж ПКГ- 65БУАГ, ПКГ- 65БАУВ – від 192 грн/м³.

Таблиця 9

Орієнтовна питома вартість захисту об'єму захищуваного об'єкта

Модель ПКГ	Вартість елемента, грн	Розрахунковий об'єм захисту, м ³	Вартість захисту грн/м ³	Примітка
ГВА - 65Г ГВА - 65В	3900	60	60	Гасіння до 180 с
ПКГ - 65АУГ ПКГ - 65АУВ	4500	60	69,2	Час гасіння до 30 с
ПКГ - 65БКУГ ПКГ - 65БКУВ	5500	60	84	Час гасіння до 30 с
ПКГ - 65БУАГ ПКГ - 65БАУВ	12500	60	192	Час гасіння до 30 с

ВИСНОВКИ

За результатами виконання дисертаційних досліджень вирішено актуальну наукову проблему створення наукових основ зменшення впливу на довкілля пожеж на початковій стадії дією ударних хвиль та їх комбінацій з екологічно прийнятними вогнегасними речовинами об'ємної дії. При цьому одержано такі основні результати:

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 аерозольними 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 аерозолу, 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 призводить спочатку до збільшення тиску, а потім після проходження ударної хвилі до розрідження зони горіння. Підвищення ефективності пожежогасіння забезпечується за рахунок синергічного ефекту, який утворюється у разі послідовної дії хімічних і 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 дії 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 аерозолу неорганічних солей калію призводить до значного підвищення її вогнегасної ефективності завдяки синергізму між її компонентами. Результатом додавання до аерозолу азоту стало зменшення вогнегасної концентрації компонентів бінарної суміші до 30 %. Визначено, що оптимальні співвідношення компонентів в аерозольно – азотній суміші становлять: аерозолу – 10 г/м^3 , азоту – 12,1 %, а аерозольно – вуглекислотній: аерозолу – 10 г/м^3 , CO_2 – 6 %, при яких суміш є вогнегасною для дифузійного полум'я н-гептану та забезпечує збереження життєпридатної концентрації кисню;

6. Експериментально встановлено вогнегасну ефективність одинарних ударних хвиль, яка становить від 215 Па для теплової потужності полум'я 4 кВт/м^2 та до 2500 Па при тепловій 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 %. 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 рази для CO_2 і в 2 рази для N_2 при їх комбінованому застосуванні з одинарною ударною хвилею для дифузійного полум'я н-гептану.

7. Також експериментально встановлено, що серії з трьох ударних хвиль при частоті 10 - 15 Гц забезпечують підвищення вогнегасної ефективності вогнегасних речовин об'ємної дії до 20 % в умовах експериментальної камери за дію 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 із зазначеною частотою, що полягає у зниженні їх вогнегасних концентрацій до 7 разів порівняно 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 шляхом застосування ударних хвиль або їх комбінацій із екологічно прийнятними вогнегасними речовинами об'ємної дії, що забезпечує запобігання поширенню горіння та зменшення 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 призводить до підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки населення і територій України;

9. Проведені полігонні випробування показали прогнозовано високу вогнегасну ефективність розроблених генераторів вогнегасного аерозолі, автономних аерозольних установок попередження горіння та пожежогасіння, а також пристроїв комбінованого гасіння і попередження пожежі. При цьому вогнегасна концентрація вогнегасних компонентів при комбінованій дії в великогабаритних приміщеннях зменшується до 3 разів, що стосується вогнегасного аерозолі, та для 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. Розроблено проект технічних умов на виготовлення «Генераторів вогнегасного аерозолі підвищеної ефективності», які відповідають сучасним експлуатаційним вимогам, та запропоновано технічні рішення конструкцій генератора вогнегасного аерозолі та пристроїв комбінованого гасіння і попередження пожежі, які забезпечують одночасну подачу в об'єм, що захищається, вогнегасного аерозолі, газових вогнегасних речовин та ударних хвиль. На зазначені пристрої та способи отримано 2 патенти України на винахід та 2 патенти на корисну модель. На генератори вогнегасного аерозолі та автономну систему гасіння було розроблено технічні умови, проведено сертифікаційні випробування та отримано сертифікати відповідності;

11. 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;

12. Результати досліджень впроваджено у навчально-науковий процес ЛДУ БЖД та Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля, зокрема під час викладання дисциплін «Екологічна безпека», «Промислова екологія», «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теоретичні основи пожежо-вибухонебезпечності», про що є відповідні акти впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Журбинський Д.А., Баланюк В.М., Нуянзін В.М., Куліца О.С. Гасіння газових горючих середовищ сумішами вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин : монографія. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2015. 120 с.

У виданнях, які входять в науково-метричну базу «Scopus».

2. Баланюк В.М. Определение эффективности тушения огнетушащими аэрозолями горючих жидкостей на открытом пространстве. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Техн. науки. Харьков, 2015 №5/10 (77). С–4-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399.

3. 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.

4. 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.

У виданнях, які входять в іноземні фахові видання та науково-метричні бази IndexCopernicus, CrossRef, РІНЦ, WorldCat, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, ResearchBib, Directory Indexing of International Research та інші.

5. Balanyuk V.M., Zhurbinskiy D.A. Phlegmatisation of flammable gas mixtures by aerosol sprays. (Флегматизация газоаэрозольной смесью горючих систем). *ВіТР. Technical science*. Kyiv, 2013. Vol. 32, No Issue 4. PP. 53-58 DOI:10.12845/bitp.32.4.2013.6.

6. 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.

7. Гарасим'юк О.И., Баланюк В.М., Пастухов П.В. Некоторые аспекты повышения эффективности аэрозольно-порошкового пожаротушения. *Вестник Кокшетауского технического института. Технические науки*. Кокшетауск, 2016. № 2 (22). С. 39-49.

8. 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.
9. Balanyuk V.M. Improving the efficiency of gas fire extinguishing shock wave. *BiTP. Technical science*. Poland, 2016. Vol. 43, No 3. P. 81-95.
10. 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.
11. Balanyuk V.M.. 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/
12. 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.

У наукових фахових виданнях:

13. 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. *Пожжежна безпека: Зб. наук. праць. Технічні науки*. Львів, 2008. №12. С. 60-64.
14. 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.
15. Баланюк В.М. Залежність вогнегасної ефективності аерозолю на основі солей калію від значень концентраційних меж поширення полум'я. *Пожжежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2009. №14. С. 122-126.
16. Баланюк В.М. Явища та процеси, що виникають під дією звукової хвилі в аерозолі. *Пожжежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2010. №16. С. 129 -136.
17. Баланюк В.М., Лавренюк О.І., Копистинський Ю.О. Вплив звукових ударних хвиль на дисперсні системи. *Зб. наук. праць «Пожжежна безпека». Технічні науки*. Львів, 2010. №17. С.180-183.
18. Цапко О.Ю., Цапко Ю.В., Баланюк В.М. Визначення вогнегасної та флегматизувальної здатності вогнегасних озонеруйнівних газових речовин. *Зб. наук. праць «Пожжежна безпека». Технічні науки*. Львів, 2010. №19. С.159-163.
19. Копистинський Ю.О. Лавренюк О.І. Взаємодія полум'я і вогнегасного аерозолю речовини під впливом ударної хвилі. *Пожжежна безпека: зб. наук. праць. Технічні науки*. Львів, 2011. №18. С.71-75.
20. Баланюк В.М., Луц В.І., Наливайко М.А. Нові підходи подачі тонкорозпиленої води з поверхнево-активними речовинами та сумішами хімічних сполук. *Пожжежна безпека: Зб. наук. праць. Технічні науки*. Львів, 2012. №20. С. 118-123.
21. Баланюк В.М., Копистинський Ю. О., Лавренюк О.І. Визначення ефективності гасіння вогнегасною аерозольною речовиною в умовах застосування газових ударних хвиль. *Пожжежна безпека: зб. наук. праць. Технічні науки*. Львів, 2012. №21. С.23-28.

22. Баланюк В.М., к.т.н., доц., Копистинський Ю.О., к.т.н., Бойко Т.Б., к.т.н., Журбинський Д.А. Використання ударних хвиль при гасінні дифузійного полум'я вогнегасними аерозолями. *Пожежна безпека: теорія і практика. Технічні науки*. Львів, 2014. №18. 32-37.
23. Журбинський Д.А., Баланюк В.М., Лин А.С. Вплив виду аерозольотворювальних сполук на основі солей калію та добавок інертних газів на флегматизувальну ефективність аерозолі. *Пожежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2013. №21. С 19-23.
24. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І., Пастухов П.В. Визначення вогнегасної ефективності деяких аерозольотворювальних сполук. *Пожежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2013. №23. С. 14-19.
25. Баланюк В.М., Журбинський Д.А. Флегматизувальна ефективність аерозолі на основі солей калію. *Збірник наукових праць: Пожежна безпека: теорія і практика. Технічні науки*. Черкаси, 2013. №13. С.32-37.
26. Баланюк В.М., Мельник К. В., Копистинський Ю.О., Гарасим'юк О.І. Полуменевогасні добавки до аерозольотворювальних сумішей для придушення полум'я. *Пожежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2014. №24. С. 124-128.
27. 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.
28. Баланюк В.М., Гарасим'юк О.І. Комбіноване аерозольно-порошкове пожежогасіння. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Техн. науки*. Львів, 2015. – №26. С. 7-12.
29. В.М. Баланюк, А.Т. Лозинський, Гарасим'юк О.І. Визначення вогнегасної ефективності аерозольотворювальних сумішей з добавкою амоній гідроген фосфату. *Пожежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2015. №27. С. 6-11.
30. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Лозинський А.Т. Вплив добавок CO₂ на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-газової суміші. *Пожежна безпека : зб. наук. пр. Технічні науки*. Львів, 2016. №28. С. 6-12.
31. Баланюк В.М. Пожежогасіння серіями ударних хвиль. *Збірник наукових праць. Проблеми пожежної безпеки. Техн. науки*. Харків, 2016. Вип. 40, С. 26-34.
32. 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.
33. Баланюк В.М. Вогнегасна ефективність та флегматизувальна дія поєднання вогнегасного аерозолі, газової вогнегасної речовини і ударних хвиль. *Пожежна безпека. Технічні науки*. Львів, 2017. №29. С. 6-12.

Особистий внесок здобувача у роботах, які опубліковані у співавторстві:

[1, 3] – сформулював ідею, предмет та методики досліджень вогнегасних аерозолів та комбінованих газоаерозольних систем, узагальнив результати досліджень та сформулював висновки;

[4-7] – сформулював об'єкт, предмет та методики досліджень, особисто провів експериментальні дослідження з визначення вогнегасних концентрацій вогнегасних аерозолів та їх сумішей з газовими вогнегасними речовинами, узагальнив результати експериментальних досліджень, взяв участь у формулюванні висновків;

[12-14] – сформулював ідею, проблему та методику досліджень, узагальнив результати досліджень, сформулював висновки.

[17, 19, 21] – сформулював ідею, об'єкт, предмет, мету та методики проведення досліджень, здійснив загальне наукове і методичне керівництво, узагальнив результати досліджень, взяв участь у формулюванні висновків;

[18] – узагальнив результати досліджень, взяв участь у формулюванні висновків.

[22] – сформулював ідею, визначив об'єкт, предмет і мету проведення досліджень з визначення флегматизувальної властивості аерозолів, узагальнив результати експериментальних досліджень, сформулював висновки;

[23 – 30] – сформулював ідею, здійснив наукове керівництво, обґрунтував мету, об'єкт, предмет досліджень з визначення впливу добавок CO₂ на вогнегасну ефективність бінарної аерозольно-газової суміші, узагальнив результати, сформулював висновки;

Опубліковано в інших виданнях.

34. 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 “Пожежна безпека”, 6.170201 “Цивільний захист”. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012 р. – 18 с.

35. Лавренюк О.І., Баланюк В.М. Теорія розвитку та припинення горіння. Збірник вправ і задач. Частина І. Навчальний посібник. – Львів: ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2013. – 132 с.

36. Баланюк В.М., Квашук В.П., Юрим М.Ф., Степова К.В., Ференц Н.О., Петрова М.А., та інш., Під загальною редакцією Балого В.І., Довідник рятувальника на випадок виникнення надзвичайних ситуацій з небезпечними хімічними речовинами. Довідник. – Львів. ЛДУБЖД, 2012. – 2012. – 700 с.

37. 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”. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012 р. – 16 с.

38. Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. Теорія горіння та вибуху. Навчальний посібник. – Львів: ВОНДРВР ЛДУ БЖД, 2014. – 130 с.

39. Баланюк В.М. Михалічко Б.М. Щербина О.М. Термінологічний словник Львів: ЛДУ БЖД. 2010.

Патенти та авторські свідоцтва:

40. Аерозольний генератор з акустично-ударною активацією аерозолі: пат. 67867 Україна: МПК А62С 35/00. № 201109276; заявл. 25.07.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. 4 с.

41. Автономна установка аерозольного пожежогасіння : пат 107100 Україна: МПК А62С 35/00, А62С 37/00. №201510409; заявл. 25.05.2016; опубл. 25.05.2016, бюл. № 10. 4 с.

42. Спосіб комбінованого гасіння пожежі вогнегасним аерозолем, газовою вогнегасною речовиною і ударними хвилями та пристрій для його здійснення: пат. 115080 Україна: МПК: А62С 3/06, А62С 35/00, А62С 37/00, А62С 13/22, А62С 3/16. а62с 35/00. №201506267; заявл. 26.12.2016; опубл. 11.09.2017, бюл. № 17. 6 с.

43. Аерозольний вогнегасник (варіанти): пат. 115578 Україна. МПК: а62с 13/00, А62С 35/02 № 201507130; заявл. 16.07.2015; опубл. 27.11.2017, бюл. № 22. 14 с.

АНОТАЦІЯ

Баланюк В.М. Наукові основи зменшення впливу на довкілля пожеж на їх початковій стадії дією ударних хвиль. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальностями 21.06.01 – екологічна безпека та 21.06.02. – пожежна безпека. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Мінприроди України. Київ – 2019.

На основі аналізу характеристик існуючих засобів пожежогасіння створено наукові основи зменшення негативного впливу пожеж на довкілля, які враховують особливості та закономірності дії чинників на ефективність припинення горіння горючих середовищ на початковій стадії розвитку пожеж ударними хвилями, у тому числі за комбінованого їх застосування з екологічно прийнятними газовими та аерозольними вогнегасними речовинами. Експериментально встановлено, що серії з 3-х ударних хвиль при частоті 8- 12 Гц забезпечують підвищення вогнегасної ефективності вогнегасних речовин об'ємної дії до 20 % в умовах експериментальної камери порівняно з дією одинарної ударної хвилі. Виявлено ефект синергізму між компонентами комбінованої вогнегасної системи який проявляється у зниженні вогнегасної концентрації CO₂ 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. 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 забезпечує запобігання поширенню горіння та зменшення 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 призводить до підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки населення і територій України.

Проведені полігонні випробування показали прогнозовано високу вогнегасну ефективність розроблених генераторів вогнегасного аерозолю, автономних аерозольних установок попередження горіння та пожежогашіння, а також пристроїв комбінованого гасіння та попередження пожежі. При цьому вогнегасна концентрація вогнегасних компонентів при комбінованій дії в великогабаритних приміщеннях зменшується до 3 разів, що стосується вогнегасного аерозолю та для 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.

Результати дисертаційного дослідження є науковим підґрунтям зниження шкідливого впливу на довкілля продуктів горіння та вогнегасних речовин за рахунок значного підвищення ефективності вогнегасного аерозолю і газів та зменшення часу гасіння пожеж при дії ударних хвиль. 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 та ударними хвилями до 6 разів.

Ключові слова: екологічна безпека, пожежна безпека, вогнегасний аерозоль, діоксид вуглецю, азот, синергізм, нові технології гасіння, ударні хвилі, системи комбінованого гасіння, бінарні системи, довкілля, вогнегасна концентрація, генератори вогнегасного аерозолю, автономні системи аерозольного гасіння.

ABSTRACT

Balanyuk V.M. Scientific basis for reducing the environmental impact of fires at their initial stage by the action of shock waves. - Manuscript.

The dissertation for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in specialties 21.06.01 - ecological safety and 21.06.02. - fire safety. State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine. Kiev - 2019.

On the basis of the analysis of the characteristics of the existing fire extinguishing agents, the scientific basis for reducing the negative impact of fires on the environment was created, taking into account the features and regularities of the factors affecting the effectiveness of the combustion of combustible environments at the initial stage of the development of fires with shock waves, including their combined application with environmentally acceptable gas and aerosol fire substances. It has been experimentally established that a series of 3 shock waves at a frequency of 8 - 12 Hz provide an increase the fire-extinguishing efficiency of extinguish ants with volumetric effect up to 20% in the experimental chamber compared with the action of a single shock wave. It was discovered the effect of synergy between the components of the combined fire extinguishing system, which manifests itself in reducing the extinguish ant concentration of CO_2 to 4.8%, and nitrogen to the concentration of 10.2% under the condition of the influence of the single and triple shock waves series with the specified frequency, which lies down to reduction of their fire-extinguishing concentrations up to 7 times in comparison with their individual values. It was scientifically substantiated schematic decisions and parameters and created

the technical means that implement the technology of ceasefire at the initial stage of the development by using shock waves or their combinations with environmentally acceptable extinguishants of volumetric action, which prevents the spread of combustion and reduce environmental pollution. Shock wave generators can be both present in the device and installed separately and be used together with separately installed shock wave generators. At the same time, the duration of emissions and the volume of harmful substances to the environment as a result of fires are significantly reduced, which leads to an increase in the efficiency of ensuring the environmental safety of the population and territories of Ukraine.

The conducted field tests showed predictably high extinguishing efficiency of developed fire extinguishers aerosol generators, autonomous aerosol combustion and fire fighting combustion units, as well as combined fire extinguishing and fire prevention devices. At the same time, the extinguishing concentration of fire extinguishing components with combined action in large-sized premises reduces up to 3 times for fire extinguishers and for gas extinguishing substances (CO₂, N₂) up to 6 times in comparison with their individual values under the influence on the environment of series of shock waves with the capacity up to 2500 Pa and a frequency of about 10 Hz.

The results of the dissertation research are the scientific basis for reducing the harmful effects on the environment of combustion products and extinguishant substances by significant increasing the efficiency of extinguishant aerosol and gases and reducing the fire extinction time under the action of shock waves. It was found that mentioned quench method would reduce the emission of greenhouse gases - carbon dioxide up to 3 times compared with its individual extinguishing concentration, and in combination with extinguishant aerosols and shock waves up to 6 times.

Keywords: ecological safety, fire safety, fire extinguishing aerosol, carbon dioxide, nitrogen, synergism, new extinguishing technologies, shock waves, combined extinguishing systems, binary systems, environment, fire extinguishing concentration, fire extinguishing aerosol generators, autonomous systems of aerosol extinguishing.