

ЛЕВЧЕНКО ІРИНА

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-07134-2505>email: runalevchenko@ukr.net

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ РОЗМІРІВ ЧАСТИНОК ВОДЯНОГО ТУМАНУ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ В ХОЛОДИЛЬНИХ КАМЕРАХ

В рамках даного дослідження, з метою вивчення можливостей застосування технології водяного туману, було розроблено та змонтовано спеціалізовану експериментальну платформу. Ця платформа, створена власноруч, дозволила імітувати умови пожежі в холодильній камері та точно контролювати параметри системи пожежогасіння. В якості модельного горючого матеріалу було обрано пінополістирольну ізоляційну плиту, як типовий представник ізоляційних матеріалів, що широко використовуються в холодильних камерах. Експерименти були проведені для вивчення гасіння пожежі гептану та дизельного палива в обмеженому просторі, що дозволило зробити ряд важливих висновків. По-перше, дослідження виявило, що для пожежі у холодильних камерах характерне повторне займання, яке не залежить від розташування ізоляційного матеріалу. Навіть при тиску форсунки в 1 МПа, явище повторного займання все ще спостерігалось. Однак, при підвищенні тиску форсунки до 3 МПа та 9 МПа, повторне займання не відбувалося. Це свідчить про те, що водяний туман високого тиску є ефективним засобом для пожежогасіння в холодильних камерах. По-друге, в процесі пожежогасіння водяним туманом, спостерігається ефективне зниження концентрації CO, що утворюється під час пожежі. Особливо помітним є ефект зниження концентрації CO при тиску форсунки 9 МПа. В рамках даного дослідження було вивчено діапазон розмірів частинок води в межах 100-200 мкм та виявлено діапазон розмірів частинок, що забезпечує найкращий ефект пожежогасіння в умовах холодильних камер – 110-140 мкм. Саме цей діапазон розмірів частинок дрібнодисперсного водяного туману є найбільш придатним для протипожежного захисту холодильних камер. визначення оптимального діапазону розмірів частинок водяного туману для ефективного пожежогасіння в холодильних камерах.

Ключові слова: водяний туман, температура водяного туману, тиск; пожежі в холодильних камерах, пожежогасіння.

LEVCHENKO IRYNA

Sumy National Agrarian University

DETERMINING THE OPTIMAL WATER MIST PARTICLE SIZE RANGE FOR EFFECTIVE FIRE SUPPRESSION IN COLD STORAGE FACILITIES

Within this study, to examine the possibilities of applying water mist technology, a specialized experimental platform was developed and assembled. This analysis allowed for the determination of key parameters such as the initial decomposition temperature, the rate of release of combustible gases, and other important indicators that define the material's behavior under thermal stress. During the experiments, various fire parameters were carefully measured and analyzed, including flame temperature, fire spread rate, smoke level, combustion product concentration, and other key characteristics of the fire scene. Firstly, the study revealed that fires in cold storage facilities are characterized by re-ignition, which is independent of the insulation material's location. Even at a nozzle pressure of 1 MPa, re-ignition was still observed. However, when the nozzle pressure was increased to 3 MPa and 9 MPa, re-ignition did not occur. Secondly, during water mist fire suppression, an effective reduction in the concentration of CO produced during the fire was observed. The effect of reducing CO concentration is particularly noticeable at a nozzle pressure of 9 MPa. Simultaneously, the water mist system also contributes to reducing the concentration of O₂, creating a suffocating environment for the flame and helping to control the fire. The study also confirmed that as pressure increases, the size of the water mist droplets decreases. During the fire suppression process, the smaller the water particle diameter, the greater the proportion of droplets that evaporate, and the greater the increase in volume. Within this study, a water particle size range of 100-200 μm was investigated, and a particle size range that provides the best fire suppression effect in cold storage facilities was identified – 110-140 μm. This specific particle size range of fine water mist is the most suitable for fire protection in cold storage facilities.

Keywords: water mist; water mist temperature; pressure; cold storage fires; fire extinguishing

Вступ

Найпоширенішим вогнегасним агентом у протипожежній промисловості є галоновий вогнегасник [1], але після детального дослідження було виявлено, що він завдає значної шкоди озоновому шару. Це пояснюється тим, що галонові вогнегасні речовини містять хлор і бром. Під час використання вогнегасних речовин для гасіння пожежі галоновий газ опромінюється сонцем і розкладається на вільні радикали хлору та бром. Ці хімічно активні групи легко видаляють атоми кисню з молекули озону [2]; в результаті знижується концентрація озону і утворюється озонова діра. Таке зменшення озонового шару руйнує екологічне середовище та завдає шкоди людям. Продовження використання галонових вогнегасних речовин не відповідає принципам енергозбереження та скорочення викидів у 21 столітті. Тому необхідно розробити новий екологічно чистий вогнегасний агент [3].

З 1990-х років водяне туманогасіння викликало широке занепокоєння, і в Монреальському протоколі про речовини, що руйнують озоновий шар, чітко зазначено про необхідність зменшення руйнування озонового шару [4]. Крім того, Програма ООН з навколишнього середовища вважає, що водяний туман є технологією чистої енергії зі швидкими можливостями пожежогасіння: відсутність забруднення та низьке споживання води. Тому його можна використовувати у вогнегасних речовинах, і

він не спричинить проблем забруднення навколишнього середовища, таких як руйнування озонового шару [5]. Вчені з різних країн також досліджують водяне туманогасіння і досягли успіхів [6]. Завдяки безперервним поглибленим дослідженням водяного туману вченими, його поступово застосовують у більшій кількості сфер [7], таких як тунелі, бібліотеки та архіви [8,9].

Люди все більше стурбовані збереженням харчових продуктів у міру зростання населення та економіки. Будівництво холодильної промисловості швидко розвивається, з річним темпом зростання 15% в Китаї [10]; розвиток галузі відіграє значну роль у сприянні економічному розвитку країни, але це також спричинить відповідні проблеми безпеки. Наприклад, питання пожежної безпеки: хоча ймовірність пожеж у холодильних камерах низька, її не можна ігнорувати [11], оскільки, якщо пожежа вийде з-під контролю, збитки будуть великими. Характеристики пожеж у холодильних камерах в основному зводяться до чотирьох пунктів: по-перше, вона горить бурхливо і утворює тривимірну пожежу; по-друге, горіння приховане, і важко знайти точку займання; по-третє, це горіння утворює значне задимлення, високу температуру та незручне пожежогасіння; по-четверте, є багато токсичних і шкідливих газів, і вибух є небезпечним; тому пожежну безпеку холодильних камер не можна ігнорувати. Більшість продуктів, що зберігаються в холодильних камерах, тісно пов'язані з життям людей. З точки зору безпеки харчових продуктів [12], вогнегасний агент, який використовується в процесі пожежогасіння, має бути нетоксичним і нешкідливим. З іншого боку, на поточному етапі протипожежного захисту холодильних камер все ще використовується оригінальна система форсунок, яка споживає багато води і не відповідає принципу енергозбереження. Тому водяний туман є підходящим вогнегасним агентом [13].

Підсумовуючи, ця стаття має на меті застосувати дрібнодисперсний водяний туман у системі протипожежного захисту холодильних камер. Після дослідження було встановлено, що багато факторів впливають на водяне туманогасіння, такі як розмір крапель води, які конкретно впливають на механізм пожежогасіння. Розмір цих крапель води різний, питома площа поверхні буде різною, і тепло, поглинене краплями під час випаровування, також різне. Взагалі, системи з меншим розміром крапель, як правило, працюють краще за однакових умов експлуатації [14,15]. Тиск також має великий вплив на ефективність пожежогасіння. Під час пожежі підвищення робочого тиску системи водяного туману скоротить тривалість полум'я, тим самим прискорюючи пожежогасіння [16,17]. У деяких складних пожежних ситуаціях положення перешкоди також значно впливає на водяне туманогасіння. Перешкоди зменшують імпульс туману розпилення, запобігаючи потраплянню деяких крапель води в центр полум'я. У звичайній спринклерній системі краплі води мають великий розмір частинок, і їм важко пройти крізь перешкоди, щоб досягти дна полум'я [18]. При використанні дрібного водяного туману для гасіння пожежі, через відносно малий розмір частинок, багато крапель води обходять перешкоду і оточують зону полум'я, як газ, щоб знизити температуру полум'я. Для підвищення ефективності пожежогасіння розмір крапель води можна відповідно зменшити, або імпульс можна збільшити. Умови вентиляції та потік туману також впливають на придушення пожежі водяним туманом [19–23].

Дослідження показують, що чим менший розмір крапель води, тим кращий ефект пожежогасіння. Однак, коли розмір частинок туману занадто малий, це призведе до недостатнього імпульсу, і важко проникнути крізь полум'я, щоб досягти кореня полум'я для пожежогасіння. Тому має бути оптимальний діапазон розмірів частинок для пожежогасіння [24,25]. Основне дослідження цієї статті полягає у впливі тиску та розміру крапель води на водяне туманогасіння. За допомогою комплексного аналізу обирається діапазон розмірів частинок водяного туману, найбільш придатний для пожежогасіння в холодильних камерах, що забезпечує теоретичну основу для проектування протипожежного захисту холодильних камер.

Мета дослідження - дослідити ефективність пожежогасіння водяним туманом в умовах холодильних камер, зокрема зосередившись на впливі тиску та розміру крапель води на ефективність гасіння пожежі.

Результати та обговорення

Експеримент з піролізу

Термогравіметричний аналіз (ТГА) може вимірювати залежність між масою зразка, що тестується, та зміною температури під контролем температури програми.

Диференціальна скануюча калориметрія (ДСК) - це техніка вимірювання залежності між різницею потужності та температурою досліджуваного зразка та еталонного зразка під контрольованою програмою температурою. Отримуючи відповідний сигнал, можна отримати криву зміни тепла з часом під час термічної реакції зразка, яка є кривою ДСК [26–29].

ТГА теплоізоляційних матеріалів проводився на синхронному аналізаторі STA409C виробництва Netzsch, Німеччина. Атмосфера була повітряною, швидкість нагріву становила 10 л °C/хв, а розмір зразка становив приблизно 10 мг. Після обробки даних експерименту з піролізу ми можемо отримати інформацію про характеристики теплоізоляційного матеріалу, яка забезпечує теоретичну підтримку для наступних експериментів з пожежогасіння.

Експериментальний стенд для дослідження пожеж

Експериментальна система зображена на Рисунку 1. Експериментальна платформа складається з обмеженого простору, системи пожежогасіння тонкодисперсним водяним туманом, пластини для

горіння, термопари типу К, колектора температури, газоаналізатора, скляних дверей та відеокамери. Розмір обмеженого простору становить 1,8 м х 1,8 м х 3 м. Форсунка розташована на 2,3 м вище платформи, прямо над нею. У лабораторії є залізна рама, на якій будуть розміщені термопари. Залізна пластина розміщена в центрі залізної рами для утримання горючих матеріалів. Процес пожежогасіння записується за допомогою відео та тепловізійних камер (FLUKE-Ti400).

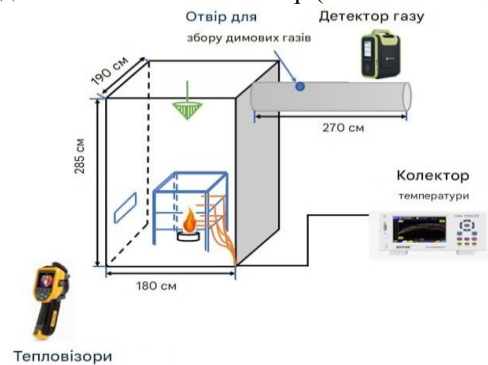


Рисунок 1. Схема пристрою експериментальної системи

У дослідженні для вимірювання внутрішньої зміни температури пінополістиролу використовувалася прецизійна термопара WRNK-191. Всього є 8 точок збору термопари. Розподіл розташування показано на малюнку 1. Точність термопари становить 0,4 класу, а час відгуку - 0,5 с. Таким чином, вона може ефективно співпрацювати з датчиком температури для збору даних. Модель системи збору температури - багатоканальний тестер температури EX4000. Обладнання перетворює електричні сигнали та сигнали перепаду тиску, отримані в результаті експерименту, у дані про температуру для запису. Частота збору становила 1 зразок температури в секунду.

У цій роботі вибрано всього 5 форсунок: відкрита та закрита парасолькова відцентрова форсунка діаметром 1 мм. Експериментальним обладнанням для вимірювання розміру частинок крапель води був промисловий лазерний аналізатор розміру частинок розпилення Winner9. Принцип роботи приладу полягає у вимірюванні спектра розсіювання групи частинок, а потім аналізі закону розподілу розмірів частинок. Розподіл розмірів частинок крапель води форсунок 7 л/хв під тиском 1, 3 і 9 МПа показано на малюнку 2. Розподіл розмірів частинок крапель води на 5 форсунках під тиском 9 МПа показано на малюнку 3.

Експериментальна платформа для пожежі

У експериментах з пожежогасіння було проведено два попередні експерименти. В одному використовувалася та сама форсунка, змінюючи тиск, а потім спостерігаючи вплив 1, 3 і 9 МПа на гасіння пожежі водяним туманом. Інший експеримент полягав у тому, що ми вибрали різні форсунки для вивчення впливу розміру крапель води на гасіння пожежі водяним туманом за умов постійного тиску. Було п'ять типів форсунок: 5, 7, 12, 17 і 20 л/хв.

Маса горючих речовин, що використовуються в кожній групі експериментів, залишається незмінною. Використовувалося 300 г теплоізоляційних матеріалів з пінополістиролу та 10 г метанолу для запалювання. Пристрій водяного туману вмикався під час експерименту, коли температура термопари досягала 350 °С, і вчасно вимикався, коли полум'я гасло.

Результати експериментів та аналіз. Аналіз результатів експерименту з піролізу.

Термічний розклад теплоізоляційного матеріалу має лише одну основну стадію, яка починається при 100 °С; втрата теплової маси становить близько 5%, і на відповідній кривій ДТГ виникає невеликий пік втрати маси. Втрата тепла на цій стадії в основному пов'язана з поступовим випаровуванням залишкової вологи та пороутворювача в матеріалі зі збільшенням температури, але молекулярний ланцюг у пінополістиролі не руйнується. Температурний діапазон реакції другої стадії становить приблизно 350-480 °С. Втрата теплової маси становить близько 90% від загальної втрати маси. Більший пік втрати маси також з'являється на відповідному ДТГ через кисень в атмосфері. У цей час молекулярні ланцюги з меншою енергією, необхідною в жорсткому пінополістиролі, розриваються, утворюючи вільні радикали та виділяючи тепло. Пінополістирол при цій температурі зазнає реакції горіння, виділяючи велику кількість газу, і в газі є багато токсичних і шкідливих компонентів (табл. 1).

Таблиця 1

Показники втрат теплової маси

Зразок	Втрата маси 5%	Втрата маси 95%	Максимальна маса	Піроліз
	Температура 0°C	Температура 0°C	Швидкість втрати, °	Залишок, %
Горючі матеріали	195	350	480	9,8

У повсякденному житті холодильні камери зазвичай використовуються для зберігання харчових продуктів, тому газ, що виділяється під час горіння ізоляційного матеріалу, неминуче забруднюватиме

продукти в холодильній камері. З точки зору безпеки харчових продуктів, найефективніший спосіб гасіння пожежі в холодильній камері - це загасити вогонь до того, як пінополістирольний матеріал згорить на великій площі. Тому в наступному експерименті з гасіння пожежі водяним туманом температуру, при якій водяний туман починав розпилюватися, було встановлено до 350 °С.

Застосування водяного туману різного тиску

Графік кривої температури природного горіння до гасіння пінополістиролу представлено на графіку 1 а. Коли температура інших термопар досягає кімнатної температури, температура термопар 2 раптово підвищується, а потім через деякий час падає до кімнатної температури. Цей експеримент значною мірою відображає характеристики пожеж у холодильних камерах, і він схильний до повторного займання.

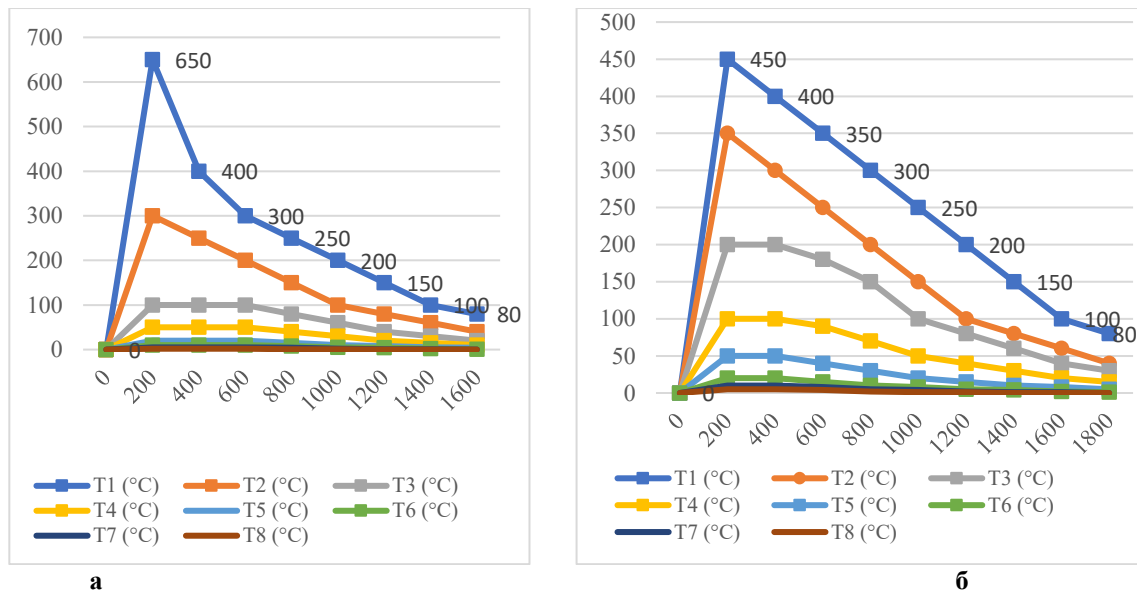


Рис. 1. Крива температури теплоізоляційного матеріалу в стані природного горіння: (а) де матеріали розміщені горизонтально, (б) де матеріали розміщені вертикально

Після розміщення термоізоляційного матеріалу боком (рисунк 6 б), термопара 1 раптово піднімається, коли температура інших термопар падає через явище повторного займання. Це показує, що повторне займання ізоляційного матеріалу не має нічого спільного з розміщенням.

Отримані дані вказують на те, що коли водяний туман застосовується деякий час, температура гасіння полум'я знижується, але через дві хвилини після того, як полум'я гасне, термопара 1 показує криву зростання, і полум'я, здається, знову спалахує. Це явище повторного займання показує, що хоча дрібний водяний туман 1 МПа може загасити полум'я, він не може запобігти проблемі повторного займання теплоізоляційного матеріалу.

Коли тиск становить 3 МПа, термопара вимірює температуру поза полум'ям, і зміна помітна. Протягом усього процесу гасіння пожежі явище повторного займання відсутнє. Згідно з діаграмою температури горіння та експериментальним явищем, коли тиск становить 3 МПа, дрібний водяний туман може ефективно вирішити проблему горіння теплоізоляційного матеріалу, який легко спалахує повторно. Коли тиск становить 9 МПа, рисунок 8 показує відсутність явища повторного горіння протягом усього процесу гасіння полум'я.

Під час процесу горіння теплоізоляційного матеріалу утворюватиметься велика кількість диму, що робить видимість дуже низькою. Утворення диму може знизити ефективність евакуації. За статистикою, 80% жертв пожеж пов'язані з токсичними та шкідливими газами. Велика кількість диму, що утворюється під час горіння горючих речовин, також може становити загрозу для життя. Тому зміна диму під час пожежі також є способом дослідження ефективності гасіння пожежі.

Як видно на рисунку 2, застосування водяного туману може ефективно знизити вміст СО порівняно із застосуванням без водяного туману. Коли тиск різний, зміна концентрації СО також різна. Максимальне значення концентрації СО нижче, ніж в інших умовах, коли тиск становить 9 МПа. Тому що коли тиск становить 9 МПа, дрібний водяний туман може швидко загасити вогонь, зупинити реакцію горіння та зменшити виробництво газу СО. Це показує, що водяний туман високого тиску може знизити концентрацію СО під час експерименту. Тому, коли для гасіння пожежі використовується водяний туман високого тиску, він може добре захистити людей від вогню.

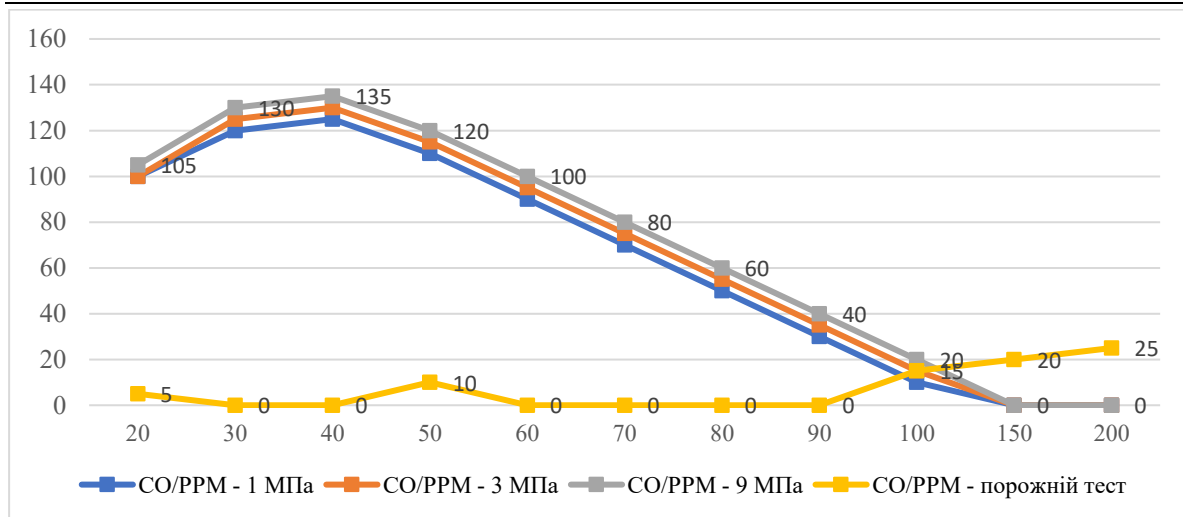


Рис. 2. Крива зміни концентрації CO за різних тисків

Концентрація кисню після застосування водяного туману була нижчою за концентрацію кисню без водяного туману, що свідчить про те, що водяний туман може знизити концентрацію кисню у разі пожежі. Цей принцип зумовлений малим об'ємом водяного туману високого тиску, який може швидко поглинати тепло. Коли водяний туман потрапляє в поле пожежі, він може швидко випаровуватися, утворюючи водяну пару, збільшуючи об'єм водяної пари. Коли об'єм водяної пари збільшується більш ніж у 170 разів, він може утворити повітряну завісу, яка покриває полум'я в полі пожежі, запобігаючи потраплянню навколишнього повітря в полум'я, тим самим відіграючи роль ізоляції кисню та зниження концентрації кисню в зоні горіння полум'я. З іншого боку, коли краплі водяного туману швидко випаровуються, утворюватиметься більше водяної пари, і концентрація кисню навколо вогню знизиться. Оскільки кисень є важливим у процесі горіння, коли концентрація кисню знижується, ефективність горіння також знижується, тим самим досягаючи ефекту гасіння пожежі. Концентрація кисню в дрібнодисперсному водяному тумані, що застосовується під різним тиском, змінюється відповідно. Наприклад, концентрація кисню падає найшвидше при 9 МПа, і концентрація кисню при 9 МПа завжди вища, ніж в інших умовах тиску, що також показує, що водяний туман високого тиску може ефективно гасити вогонь, зменшувати взаємодію між горючими речовинами та киснем, і ефект гасіння пожежі кращий.

Аналіз ефекту гасіння пожежі за різних умов.

Результати гасіння пожежі водяним туманом під різним тиском представлено у таблиці 2. Комплексне порівняння проводилося з точки зору часу гасіння пожежі, CO, що утворюється під час горіння, та O₂, що споживається під час горіння. Ефект гасіння пожежі був найкращим, коли тиск становив 9 МПа. Матеріал не буде повторно займатися під тиском 9, що ефективно вирішує проблему повторного займання під час процесу гасіння пожежі в холодильній камері. З огляду на це, пожежі в холодильних камерах можна гасити за допомогою водяного туману високого тиску.

Таблиця 2

Результати гасіння пожежі водяним туманом під різним тиском

Розміщення	Тиск в соплі/МПа	Розмір частинок крапель/мкм	Час гасіння/с	Чи відбулося повторне займання
Горить природним шляхом	–	–	–	так
Вертикальне	1	170.926 ± 2	36	ні
	3	167.636 ± 2	24	ні
	9	112.792 ± 2	16	ні
Горить природним шляхом	–	–	–	так
Горизонтальне	1	170.926 ± 2	34	так ні
	3	167.636 ± 2	26	
	9	111.192 ± 2	15	ні

Отримані дані показали, що хоча швидкість охолодження форсунок 4 і 5 є високою, відбулося явище повторного горіння. У таблиці 3 показано час гасіння пожежі за різних форсунок. Наприклад, хоча форсунка 1 не повторно запалювалася, час гасіння пожежі був довшим, ніж у форсунки 2. Температурна діаграма реакції горіння за різних форсунок представлена у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати гасіння пожежі водяним туманом за різних форсунок

Розміщення	Витрати із сопла, л/хв	Тиск потоку в соплі, МПа	Розмір частинок крапель, мкм	Час гасіння, с	Чи відбулося повторне займання
Вертикальне	5	9	95.342 ± 2	18	ні
	7	9	111.792 ± 2	15	ні
	12	9	138.889 ± 2	19	ні
	17	9	147.897 ± 2	23	так
	20	9	161.467 ± 2	14	так

Як видно із представлених у таблиці 3 даних концентрації СО різних форсунок, яка показує, що концентрація СО, вироблена форсункою 2, нижча, ніж у інших форсунок. Після увімкнення форсунки 5 концентрація СО швидко падає, і зниження більше, ніж у форсунки 2. Однак після подальшої зупинки розпилення водяного туману відбулося явище повторного займання. Концентрація СО знову зростає через великий розмір частинок, що утворюються форсункою 5, що значною мірою пригнічує полум'я на початковій стадії пожежі. Однак, оскільки теплоізоляційний матеріал покритий захисним шаром, дрібний водяний туман не потрапляє всередину теплоізоляційного матеріалу під час процесу гасіння пожежі. Коли полум'я на поверхні теплоізоляційного матеріалу гасне, пристрій для генерації водяного туману вимикається. Оскільки залишкова температура залишається всередині теплоізоляційного матеріалу, він знову горітиме після досягнення точки займання. Концентрації O_2 показує, що концентрація O_2 форсунки 2 вища, ніж у інших форсунок, що свідчить про те, що ця форсунка ефективніше гасить пожежі, що пояснюється скороченням часу горіння. Коли час реакції горіння скорочується, закритий простір зберігає більшу концентрацію кисню в закритому просторі.

Результати експерименту показують, що форсунка 2 має найкращий ефект гасіння пожежі. Оптимальний розмір частинок ізоляційного матеріалу для гасіння становить від 110 до 140 мкм. У певному діапазоні, чим менший розмір частинок крапель води, тим кращий ефект гасіння пожежі, хоча вогнегасна дія буде меншою, коли розмір частинок крапель води дуже малий через недостатній імпульс.

Висновки

Завдяки експериментальному дослідженню пригнічення пожежі н-гептану та дизельного палива в обмеженому просторі зроблені наступні висновки:

Коли в холодильній камері виникає пожежа, легко відбувається повторне займання, і на це не впливає розташування ізоляційного матеріалу. Коли тиск форсунки становить 1 МПа, явище повторного займання все одно відбуватиметься, а коли тиск форсунки становить 3 МПа та 9 МПа, явище повторного займання не відбуватиметься, так що водяний туман високого тиску можна використовувати при пожежах у холодильних камерах. Якщо для гасіння пожежі в холодильній камері використовується водяний туман, ефект гасіння хороший, і можна заощадити водні ресурси. Це дає інноваційну ідею для енергозбереження та захисту навколишнього середовища.

У процесі гасіння пожежі водяним туманом він може ефективно знизити концентрацію СО, що утворюється під час пожежі. Коли тиск форсунки становить 9 МПа, ефект зниження концентрації СО є більш очевидним. Тому водяний туман високого тиску має хороший ефект придушення пожеж у холодильних камерах. Водночас він також може знизити концентрацію O_2 , що може задусити полум'я та допомогти контролювати пожежу.

Зі збільшенням тиску розмір крапель води поступово зменшується для дрібнодисперсних крапель водяного туману. Під час процесу гасіння пожежі, чим менший діаметр частинок води, тим більше крапель води випаровується, і тим більше розширення об'єму. Однак не завжди менший розмір частинок є більш придатним для пожежогасіння. У цьому дослідженні вивчали діапазон розмірів частинок крапель води в межах 100-200 мкм і виявили діапазон розмірів частинок, який має кращий ефект і більше підходить для протипожежного захисту холодильних камер. Після експериментальних досліджень було виявлено, що коли розмір крапель води становить від 110 до 140 мкм, він більше підходить для протипожежного захисту холодильних камер.

Це дослідження все ще має потенціал для вдосконалення, оскільки експериментальна установка була обмеженою, а реальне середовище холодильного складу може включати перешкоди, погану вентиляцію та інші елементи. Слід побудувати повномасштабну копію реального холодильного складу, і слід включити додаткові фактори впливу, щоб дослідити вогнегасні властивості водяного туману з різними розмірами частинок. Окрім надання точніших експериментальних даних для подальшого проектування системи запобігання пожежам у холодильних складах, це підвищить достовірність експериментальних результатів.

References

1. Wuebbles, D. J. (2015). Ozone Depletion and Related Topics|Ozone Depletion Potentials. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2nd ed.). Elsevier Inc.
2. Kim, H.-Y., Oh, S.-Y., & Chung, J. T. (2004). Effects of Spray Characteristics of Water Mist on The Extinction of a Liquid Pool Fire. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 28, 1591–1599.
3. Liao, G., Liu, J., Qin, J., & Yao, B. (2001). Experimental study on the interaction of fine water spray with liquid pool fires. *Journal of Thermal Science*, 10, 377–384. <https://doi.org/10.1007/s11630-001-0053-3>
4. Heath, E. A. (2017). Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer (Kigali Amendment). *International Legal Materials*, 56, 193–205. <https://doi.org/10.1017/S002078291700013X>
5. Liu, Z., & Kim, A. K. (1999). A review of water mist fire suppression systems: Fundamental studies. *Journal of Fire Protection Engineering*, 10(1), 32–50. <https://doi.org/10.1177/104239159901000104>
6. Back, G. G., Beyler, C. L., & Hansen, R. L. (2000). A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems. *Fire Safety Journal*, 35, 327–362. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00022-0)
7. Darwin, R. L., & Williams, F. W. (2000). The Development of Water Mist Fire Protection Systems for U.S. Navy Ships. *Naval Engineers Journal*, 112, 49–57. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2000.tb00004.x>
8. Yang, Z., Lian, Z., Xiong, J., Miao, Z., An, Y., & Chen, A. (2018). Feasibility study on applying the mist-spraying cooling to improve the capacity of ultra-large container ships for loading reefers. *Ocean Engineering*, 163, 377–390. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.024>
9. Fan, C., Bu, R., Xie, X., & Zhou, Y. (2021). Full-scale experimental study on water mist fire suppression in a railway tunnel rescue station: Temperature distribution characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.033>
10. Zhao, H., Liu, S., Tian, C., Yan, G., & Wang, D. Z. (2018). An overview of current status of cold chain in China. *International Journal of Refrigeration*, 88, 483–495. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.02.011>
11. Sun, R.-S., Yang, X., Wang, J., Chen, P., & Wu, L. (2021). Experimental Study on Axial Temperature Profile of Jet Fire of Oil-Filled Equipment in Substation. *Processes*, 9(8), 1460. <https://doi.org/10.3390/pr9081460>
12. Chan, M. (2014). Food safety must accompany food and nutrition security. *Lancet*, 384, 1910–1911. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)61871-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)61871-0)
13. Liu, Y., Wang, X., Liu, T., Ma, J., Li, G., & Zhao, Z. (2020). Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. *Process Safety and Environmental Protection*, 141, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.032>
14. Liu, H., Wang, C., De Cachinho Cordeiro, I. M., Yuen, A. C. Y., Chen, Q., Chan, Q. N., Kook, S., & Yeoh, G. H. (2020). Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems. *Journal of Building Engineering*, 28, 100999. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100999>
15. Cui, Y., & Liu, J. (2021). Research ¹ progress of water mist fire extinguishing technology and its application in battery fires. *Process Safety and Environmental Protection*, 149, 559–574. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.049>
16. Yao, B., Cong, B., Qin, J., & Chow, W. K. (2012). Experimental study of suppressing Poly (methyl methacrylate) fires using water mists. *Fire Safety Journal*, 47, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.09.004>
17. Jeong, C. S., & Lee, C. Y. (2021). Experimental investigation on spray characteristics of twin-fluid nozzle for water mist and its heptane pool fire extinguishing performance. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 724–736. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.037>
18. Chiu, C.-W., & Li, Y.-H. (2015). Full-scale experimental and numerical analysis of water mist system for sheltered fire sources in wind generator compartment. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.06.010>
19. Liu, Y., Fu, Z., Zheng, G., & Chen, P. (2022). Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*, 130, 103601. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103601>
20. Lefort, G., Marshall, A. W., & Pabon, M. (2009). Evaluation of Surfactant Enhanced Water Mist Performance. *Fire Technology*, 45, 341–354. <https://doi.org/10.1007/s10694-008-0073-x>
21. Liang, T., Liu, Z.-L., Xiao, X.-K., Luo, S.-M., Liao, G., & Zhong, W. (2013). Experimental and Numerical Study of Fire Suppression Performance of Ultra-Fine Water Mist in a Confined Space. *Procedia Engineering*, 52, 208–213. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.099>
22. Zhou, Y., Bu, R., Gong, J., Zhang, X., Fan, C., & Wang, X. (2018). Assessment of a clean and efficient fire-extinguishing technique: Continuous and cycling discharge water mist system. *Journal of Cleaner Production*, 182, 682–693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.060>

23. Liu, W.-Y., Chen, C.-H., Shu, Y. L., Chen, W.-T., & Shu, C.-M. (2020). Fire suppression performance of water mist under diverse desmoking and ventilation conditions. *Process Safety and Environmental Protection*, 133, 230–242. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.10.019>
24. Santangelo, P. E. (2010). Characterization of high-pressure water-mist sprays: Experimental analysis of droplet size and dispersion. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), 1353–1366. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.05.016>
25. Gupta, M., Pasi, A., Ray, A., & Kale, S. R. (2013). An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 44, 768–778. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.08.017>
26. Liu, Y.-C., Huang, A.-C., Tang, Y., Huang, C.-F., Shen, Q., Shu, C.-M., Xing, Z.-X., & Jiang, J.-C. (2021). Thermokinetic analysis of the stability of acetic anhydride hydrolysis in isothermal calorimetry techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(5), 7865–7873. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-11189-1>
27. Chen, F., Dong, X., Tang, Y., Huang, A.-C., Zhang, M., Kang, Q., Shu, Z.-J., & Xing, Z. (2022). Thermal Characteristic Analysis of Sodium in Diluted Oxygen via Thermogravimetric Approach. *Processes*, 10(4), 704. <https://doi.org/10.3390/pr10040704>
28. Yao, C., Liu, Y.-C., Wu, J., Tang, Y., Zhai, J., Shu, C.-M., Jiang, J.-C., Xing, Z., Huang, C.-F., & Huang, A.-C. (2022). Thermal Stability Determination of Propylene Glycol Sodium Alginate and Ammonium Sulfate with Calorimetry Technology. *Processes*, 10(6), 1177. <https://doi.org/10.3390/pr10061177>
29. Baranovskiy, N. V., & Kirienko, V. A. (2022). Forest Fuel Drying, Pyrolysis and Ignition Processes during Forest Fire: A Review. *Processes*, 10(5), 89. <https://doi.org/10.3390/pr10050089>
30. Liu, Y.-C., Jiang, J.-C., Huang, A.-C., Tang, Y., Yang, Y.-P., Zhou, H.-L., Zhai, J., Xing, Z., Huang, C.-F., & Shu, C.-M. (2022). Hazard assessment of the thermal stability of nitrification by-products by using an advanced kinetic model. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.02.032>
31. Jia, G. (2021). Combustion Characteristics and Kinetic Analysis of Biomass Pellet Fuel Using Thermogravimetric Analysis. *Processes*, 9(5), 868. <https://doi.org/10.3390/pr9050868>
32. Inayat, A., Fasolini, A., Basile, F., Fridrichova, D., & Lestinsky, P. (2022). Chemical recycling of waste polystyrene by thermo-catalytic pyrolysis: A description for different feedstocks, catalysts and operation modes. *Polymer Degradation and Stability*, 201, 109981. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109981>
33. Fuentes, C. A., Lerner, J. E. C., Vazquez, P. G., & Sambeth, J. E. (2021). Analysis of the emission of PAH in the thermal and catalytic pyrolysis of polystyrene. *Catalysis Today*, 372, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.04.004>
34. Sałasińska, K., Kirpluks, M., Cabulis, P., Kovalovs, A., Skukis, E., Kozikowski, P., Celiński, M., Mizera, K., Gałęcka, M., Kalniņš, K., & Boczkowska, A. (2021). Experimental Investigation of the Mechanical Properties and Fire Behavior of Epoxy Composites Reinforced by Fabrics and Powder Fillers. *Processes*, 9(4), 738. <https://doi.org/10.3390/pr9040738>
35. Li, L., Zhu, D., Gao, Z., Xu, P., & Zhang, W. (2021). A study on longitudinal distribution of temperature rise and carbon monoxide concentration in tunnel fires with one opening portal. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101535. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101535>
36. Lv, D., Tan, W., Zhu, G., & Liu, L. (2019). Gasoline fire extinguishing by 0.7 MPa water mist with multicomponent additives driven by CO₂. *Process Safety and Environmental Protection*, 129, 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.016>
37. Mortimer, R. J. G. (2000). Work, Heat, and Energy: The First Law of Thermodynamics. In *Physical Chemistry*. Academic Press.
38. Wang, J. (2009). Modern thermodynamics—New concepts based on the second law of thermodynamics. *Progress in Natural Science*, 19(2), 125–135. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.011>