

DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.11>

Р. Л. Пелех, В. М. Марич

*Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9078-8131> – Р. Л. Пелех
<https://orcid.org/0000-0001-7051-4494> – В. М. Марич
✉ marychvolodj@ukr.net

АНАЛІЗ ЧИННИКІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ТОНКОРОЗПИЛЕНОЮ ВОДОЮ

Вибір системи пожежогасіння як у житлових, комерційних, так і на об'єктах, які мають високу культурну та історичну цінність, залишається актуальним. Збереження матеріальних, історичних та культурних цінностей не тільки від вогню, але й від пошкоджень, які можуть бути спричинені використанням великої кількості води під час ліквідації пожежі, покладає перед проєктантами важке завдання вибору типу системи пожежогасіння, особливо на об'єктах, пожежі на яких не можуть гаситись класичними системами спринклерного або дренчерного пожежогасіння, а використання газового пожежогасіння є неможливим через його високу вартість або негерметичність об'єкта.

Сьогодні у 90 % на об'єктах монтуються системи спринклерного пожежогасіння. Такий метод є ефективним, проте він передбачає використання великих об'ємів води, що тягне за собою необхідність забезпечення великих площ для розміщення резервуарів та обладнання. Іншою проблемою є шкода, якої завдають приміщенням, прилеглим до зони пожежі, та майну, які природно зазнають впливу води. Гасіння пожежі тонкорозпиленою водою (далі – ТРВ) довело свою ефективність у світі, тому запроваджено можливість використання цієї технології в нашій країні.

Наведено аналіз механізмів гасіння і чинників, що впливають на ефективність систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою (далі – СПГ ТРВ) для гасіння пожеж, переваги їх використання порівняно із системами газового та спринклерного пожежогасіння, вплив на час евакуювання людей, а також збереження матеріальних, історичних та культурних цінностей.

Метою роботи є визначення основних чинників, які необхідно врахувати під час подальших досліджень та розроблення розпилювачів, для досягнення необхідного розподілу крапель за розмірами, щільності та інтенсивності зрошення, а також можливості їх використання в комбінаціях води з іншими добавками, які підвищують вогнегасну здатність систем та пришвидшують процес гасіння пожеж.

Ключові слова: системи пожежогасіння, тонкорозпилена вода, туман, водяний туман.

R. L. Pelekh, V. M. Marych

*Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
Lviv, Ukraine*

ANALYSIS OF FACTORS THAT INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS WITH FINE SPRAY WATER

The choice of fire extinguishing systems in residential, commercial and objects of high cultural and historical importance remains relevant. The preservation of material, historical and cultural values not only from fire, but also from damage that can be caused by the use of large amounts of water in firefighting impose a difficult task on designers to choose the type of fire extinguishing system, especially in facilities where fires cannot be extinguished by classical sprinkler or drencher fire extinguishing systems, and the use of gas fire extinguishing is impossible due to its high cost or leakage of the facility.

Currently, 90 % of facilities are equipped with sprinkler fire extinguishing systems. This method is effective, but it involves the use of large volumes of water, which entails the need to provide large areas for tanks and equipment. Another problem is the damage caused to the premises adjacent to the fire zone and property that

is naturally exposed to water. Fire extinguishing with fine sprayed water (hereinafter referred to as FW) has proven to be effective in the world, and therefore the possibility of using this technology in our country has been introduced.

An analysis of the extinguishing mechanisms and factors influencing on the effectiveness of fire extinguishing systems with fine spray water (hereinafter referred to as FES FSW) for extinguishing fires, the advantages of their use compared to gas and sprinkler fire extinguishing systems, the impact on the time of evacuation of people, as well as the preservation of material, historical and cultural values.

The aim of the study is to identify the main factors that need to be taken into account in further research and development of spray nozzles to achieve the required droplet size distribution, density and intensity of irrigation, as well as the possibility of using them in combinations of water with other additives, which will increase the fire extinguishing capabilities of the system and speed up the fire extinguishing process.

Key words: fire extinguishing systems, finely sprayed water, fog, water mist.

Постановка проблеми. В умовах сучасного розвитку економіки, продовження агресії росії та необхідності відновлення втрачених через військові дії об'єктів промисловості та цивільного будівництва, а також необхідності збереження об'єктів, майна та культурної спадщини питання захисту об'єктів від пожежі залишається актуальним. Сьогодні у 90 % на об'єктах монтується системи спринклерного пожежогасіння. Такий метод є ефективним, проте він передбачає використання великих об'ємів води, що тягне за собою необхідність забезпечення великих площ для розміщення резервуарів та обладнання. Іншою проблемою є шкода, якої завдають приміщенням, прилеглим до зони пожежі, та майну, які природно зазнають впливу води.

Гасіння пожежі тонкорозпиленою водою (далі – ТРВ) довело свою ефективність у світі, тому запроваджено можливість використання цієї технології і в нашій країні. В межах гармонізації українського законодавства з міжнародними та європейськими нормативними документами в Україні з 1 серпня 2016 року було дозволено використання CEN/TS 14972:2011 і введено в дію відповідний нормативний документ ДСТУ CEN/TS 14972:2016 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтування» [1], а з 1 листопада 2019 року вступили в дію зміни до ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту» [2]. Зокрема, введено можливість під час проектування систем протипожежного захисту передбачати сучасні СПГ ТРВ, які часто є ефективнішими за класичні дренчерні або спринклерні системи пожежогасіння.

Однак системи пожежогасіння ТРВ потребують доопрацювання у зв'язку з наявними недоліками, які виникають через саму природу такого типу систем пожежогасіння. Основними з них є такі:

- вплив вентиляції та протягів: дрібні краплі легко відхиляються від зони горіння через повітряні потоки;

- обмежена дальність розпилення: ефективна дальність дії розпилювачів зазвичай не перевищує 3–4 метрів;

- складність гасіння тліючих пожеж: недостатня змочувальна здатність для проникнення в глибокі шари горючих матеріалів;

- висока чутливість до забруднень: малий діаметр сопел призводить до частого забивання та виходу з ладу;

- залежність від тиску в системі: для ефективного розпилення потрібне стабільне високе значення тиску.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивчення та опис фундаментальних принципів гасіння пожеж рідкого та твердого палива водяним туманом можна простежити з середини 1950-х років [9; 10]. Ранні дослідження були зосереджені на механізмах гасіння водяного туману та оптимальних параметрів крапель ефективного гасіння пожеж. Було показано, що водяний туман з дрібнодисперсними розпилювачами є дуже ефективним для контролю пожежі рідкого та твердого палива, а також для запобігання вибуху вуглеводневих сумішей [11]. Проведення досліджень продовжується як українськими науковцями [12–16], так й іноземними [17–20], переважно спрямовуючись на використання тонкорозпиленої води як вогнегасної речовини пожежними бригадами та використання тонкорозпиленої води в системах пожежогасіння. Напрямок розвитку систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою здебільшого розвивається за межами України.

Мета статті (постановка завдання) – провести аналіз механізму гасіння та чинників, що впливають на ефективність СПГ ТРВ, визначити потребу в напрямках для покращення роботи СПГ ТРВ та з'ясувати подальші можливості для удосконалення систем.

Виклад основного матеріалу. Стандартами для розроблення СПГ ТРВ є NFPA 750 «Стандарт на Системи протипожежного захисту від водяного туману» в США [3], Європейський стандарт EN 14,972 [4], британський BS 8489

[5], американський UL 2167 [6], китайський GA 1149:2014 [7] та австралійський AS 4587:1999 [8].

Під способом пожежогасіння тонкорозпиленою водою розуміють спосіб внесення в зону пожежі дрібнодисперсно розпиленої води, в якій 99 % об'єму розпилення припадають на краплі діаметром менше 1 000 мікрон [3]. Таким чином створюється так званий водяний туман.

Використання водяного туману в пожежогасінні, порівняно з використанням газоподібних речовин і звичайних спринклерних, має достатньо переваг:

- відсутність проблем з токсичністю та задухою;
- екологічність системи за рахунок можливості використання чистої води;
- низька вартість системи порівняно із системами газового пожежогасіння;
- зменшення або повна відсутність шкоди порівняно з використанням спринклерних або дренчерних систем;
- висока ефективність під час гасіння певних видів пожеж.

Використання СПГ ТРВ спрямовані на вирішення проблеми поступової відмови від фреонів згідно з Монреальським протоколом 1989 року, а також гідрофторвуглеців (ГФВ) після поправки Кігалі 2016 року. Вони, можливо, представлятимуть наступне покоління водяних систем пожежогасіння, оскільки їх можна застосовувати для гасіння багатьох класів пожеж.

СПГ ТРВ настільки ж ефективні, як спринклери проти пожеж класу А (звичайні тверді горючі речовини), за винятком випадків, коли матеріал занадто товстий для проникнення дрібних крапель задля зволоження та охолодження поверхні. Їхня продуктивність також сильно залежить від насадки, положення відносно вогню та наявності екранування або вентиляції. Вони є також ефективними проти пожеж класу В (займисті рідини), оскільки не викликають розбризкування, за умови, що імпульс їх розпилення доволі низький. Дослідження показали, що водяний туман також ефективний проти пожеж класу С (займисті гази). Для гасіння пожеж класу F (кулінарні олії та жири) можливе використання локальних систем пожежогасіння, в яких вода поєднується з добавками, які мають здатність створювати плівку на поверхні горіння та містять добавки, які є інгібіторами горіння.

Пожежі в закритих просторах характеризуються високим виділенням теплової енергії. Радіаційна та конвекційна передача тепла поширюється на стіни та перекриття і випромінюється в різних напрямках. Під час згоряння утворюється

велика кількість СО та сажі, які накопичуються у верхній частині відсіку. Ця енергія безперервно випромінюється в оточення пожежі та призводить до підвищення температури і піролізу матеріалів. Невдовзі вона перевищує температуру самозаймання більшості горючих матеріалів і викликає спалах у зоні пожежі. Для гасіння пожежі, перш ніж вона виходить з-під контролю, необхідно використовувати системи пожежогасіння. Однією з таких систем є система пожежогасіння тонкорозпиленою водою, яка створює дрібні бризки крапель води, діаметр яких менше 1000 мкм, і зазвичай коливається від 100 мкм до 400 мкм. Розпорошені краплі поглинають тепло полум'я та порушують самостійність ланцюгової реакції пожежі. За рахунок того, що діаметр крапель значно менший для водяного туману, ніж для традиційних спринклерів, а більше крапель розпорошується, загальна площа поверхні крапель більша. При цьому тепло поглинається швидше, ніж з традиційними спринклерами. Під час поглинання тепла вода перетворюється на пару і розширюється в об'ємі з кратністю 1 700. Через брак окислювача для підтримки реакції горіння припиняється. На початковому етапі пожежі, крім гасіння та охолодження за рахунок осаджування продуктів горіння, евакуація людей із зони загоряння пришвидшується.

Механізми пожежогасіння. Вода має одні з кращих фізичних властивостей для гасіння пожеж. Її висока теплоємність (4,5 Дж/г·К) та висока питома теплота випаровування (2 442 Дж/г) здатні поглинати значну кількість тепла від полум'я та зони горіння. Вода також розширюється в 1 700 разів, коли випаровується до пари, що призводить до зменшення концентрації кисню і парів палива. Під час утворення дрібних крапель ефективність води в пожежогасінні ще більше підвищується завдяки значному збільшенню площі поверхні води, доступної для поглинання та випаровування тепла. Водяний туман під час пожежогасіння, однак, не поводить як «справжній» газоподібний агент. Коли вода впорскується в приміщення, не всі бризки, що утворюються, безпосередньо беруть участь у гасінні пожежі. Вони розділяються на низку фракцій таким чином [21]:

- краплі, які перетворюються на пару, не досягнувши вогнища пожежі;
- краплі, які проникають у факел пожежі або іншим чином досягають палаючих поверхонь під факелом пожежі, щоб інгібувати піроліз шляхом охолодження, а пара, що утворюється в результаті, розбавляє гази, що утворюються в результаті горіння, а також та наявний кисень;

– краплі, які потрапляють на стіни, підлогу та стелю відсіку та охолоджують їх або іншим чином стікають у відходи;

– краплі, які попередньо змочують сусідні горючі речовини для запобігання поширенню вогню.

Брайдех і Расбаш у своїх ранніх дослідженнях [9; 10] визначили два механізми, за допомогою яких водяний туман гасить пожежі: витіснення кисню і відведення тепла в результаті випаровування водяного туману в зоні, що оточує пожежу. Дослідження, проведені наразі, не змінили точності цих механізмів гасіння. Автори класифікували механізми гасіння водяного туману під час гасіння пожеж на первинні та вторинні [22], які можна узагальнити таким чином.

Первинні механізми:

– відведення тепла, охолодження факелу пожежі, змочування/охолодження поверхні зони горіння і навколишніх предметів;

– витіснення кисню, розбавлення парів палива.

Вторинні механізми передбачають зменшення кінетичного та радіаційного перенесення тепла, динамічне перемішування парів горіння та вирівнювання температури по об'єму.

Механізми охолодження водяного туману для пожежогасіння можна умовно поділити на охолодження вогняного факелу та змочування/охолодження поверхні палива. Охолодження полум'я водяним туманом пояснюється перш за все перетворенням води на пару, яке відбувається через високий відсоток дрібних крапель води, що потрапляє у факел пожежі і швидко випаровується. Пожежа буде погашена, коли адіабатична температура полум'я знизиться до нижньої температурної межі, що призводить до припинення реакції горіння паливно-повітряної суміші.

Під час утворення дрібних крапель площа поверхні водної маси і швидкість, з якою розпилювач поглинає тепло від гарячого газу і полум'я, значно збільшуються. Як зазначають Канурі [23] і Гертеріх [24], швидкість випаровування краплі залежить від температури довкілля, площі поверхні краплі, коефіцієнта тепловіддачі та відносної швидкості краплі до навколишнього газу.

Змочування/охолодження зони пожежі водяним туманом також зменшує швидкість піролізу палива і запобігає повторному займанню під час охолодження палива. Для речовин з низькою температурою спалаху потрібно більше водяних розпилювачів паливної поверхні, оскільки для утворення парів потрібно менше тепла. Первинна реакція горіння з таким видом палива, як тверде паливо, відбувається в зоні з високим

вмістом вуглецю, яка утворюється на поверхні палива. Отже, охолодження дифузійного полум'я над сформованою зоною обуглювання твердого палива може бути недостатнім для досягнення придушення [25]. Для охолодження поверхні палива або необхідно застосовувати водяний туман до того, як утвориться глибока зона обуглювання, або краплі води повинні проникнути в зону обуглювання, щоб досягти фактичної межі розділу між згорілим і незгорілим паливом.

Витіснення кисню може відбуватися як у масштабі відсіку, так і в локальному об'ємі [26].

На рівні відсіку концентрація кисню у відсіку суттєво зменшиться за рахунок швидкого випаровування і розширення дрібних крапель води до пари, коли водяний туман вприскується в гарячий відсік і поглинає тепло від пожежі, гарячих газів і поверхонь. Результати розрахунків показали, що концентрація кисню в приміщенні об'ємом 100 м³ може зменшитися приблизно на 10 %, коли 5,5 л води повністю перетворяться на пару [27].

Зменшення концентрації кисню в приміщенні за рахунок водяного туману залежить від розміру пожежі, тривалості горіння, об'єму відсіку та умов вентиляції в приміщенні. Зі збільшенням розміру пожежі або тривалості часу пожежі відбувається як зменшення концентрації кисню внаслідок пожежі, так і витіснення кисню внаслідок утворення більшої кількості водяної пари, спричиненої високим підвищенням температури у відсіках. Цей комбінований ефект значно знижує концентрацію кисню в приміщенні і підвищує ефективність водяного туману для гасіння пожежі.

У локальному масштабі, коли водяні бризки проникають у факел пожежі і перетворюються на пару, вони розширюються в 1 700 разів порівняно з рідким станом. Коефіцієнт об'ємного розширення води, що випаровується, перешкоджає проникненню повітря (кисню) в полум'я і розбавляє газову суміш, доступну для згорання. В результаті, коли пари пожежі розбавляються нижче нижньої межі займистості паливно-повітряної суміші або коли концентрація кисню, необхідна для підтримки горіння, знижується нижче критичного рівня, пожежа буде погашена.

Водяна пара як інертний агент у пожежогасінні широко вивчалася. Розандер і Гізельссон [27] описали процес гасіння пожежі за допомогою утворення пари як «непряме гасіння». Вони рекомендують використовувати 35 % суміш води в навколишньому газі для гасіння пожежі шляхом утворення пари. З аналізу комп'ютерного моделювання Длугогорський та інші науковці [28] показали, що для ефективного гасіння необхідна концентрація водяної пари в суміші горючих газів,

яка залежить від температури довкілля, досягаючи 36 % і 44 % для температур довкілля 100 °C і 300 °C відповідно.

Вплив розбавлення кисню водяним туманом на гасіння пожежі сильно залежить від класу пожежі [25]. Це пов'язано з тим, що мінімальна кількість вільного кисню, необхідного для підтримки горіння, залежить від типу горючого матеріалу. Для більшості вуглеводневих палив критична концентрація кисню для підтримки горіння становить приблизно 13 % [25]. Для твердого палива критична концентрація кисню, необхідна для горіння, є ще нижчою.

Послаблення інфрачервоного випромінювання. Коли водяний туман огортає або досягає поверхні палива, вода може діяти як тепловий бар'єр для запобігання подальшому нагріванню випромінюванням поверхні палива, що горить, а також неспалених поверхонь [30–32]. Крім того, водяна пара в повітрі над поверхнею палива діє як випромінювач сірого тіла, що поглинає інфрачервону енергію, і повторно випромінює її на інші поверхні відбувається зі зменшеною інтенсивністю. Блокування інфрачервоного випромінювання водяним туманом зупиняє поширення вогню на незапалені поверхні і зменшує швидкість випаровування або піролізу на таких поверхнях.

Експериментальні випробування, проведені в Національній дослідницькій раді Канади [33], показали, що променевий потік на стіні випробувального відсіку був зменшений більш ніж на 70 % завдяки активації системи водяного туману. Розрахунок, проведений Логом [32], також показав, що під час навантаження розпилення 100 г/м³ і довжини шляху 1 м розпилення на межі між класом 1 і класом 2 ($Dv_{0.1} = 100$ мкм і $Dv_{0.9} = 200$ мкм) здатне блокувати близько 60 % інфрачервоного випромінювання від чорного тіла за температури 800 °C.

Показано, що ослаблення випромінювання дуже сильно залежить від діаметра та щільності крапель. Заданий об'єм води забезпечить більш ефективніший бар'єр проти випромінювання, якщо він складається з дуже дрібних крапель у щільному розпиленні, ніж туман з більшими краплями. Розрахунок, проведений Равігураджаном і Белтраном [30], показав, що для досягнення однакового ослаблення випромінювання на об'єкті за температури 650 K масова густина крапель розміром 100 мкм повинна бути в 10 разів більшою, ніж у крапель розміром 10 мкм. Довжина хвилі випромінювання, однак, є також важливою для визначення ослаблення випромінювання водяного туману. Туман буде поглинати більше випромінювання, якщо діаметр крапель близький до довжини хвилі випромінювання.

Інші типи впливів водяного туману на зону пожежі, на думку багатьох авторів, є менш суттєвими, хоча для різних класів пожеж можуть мати більший або менший вплив.

Чинники, що впливають на ефективність водяного туману. Визнано, що хоча всі вогнегасні механізми водяного туману тією чи іншою мірою беруть участь у гасінні пожежі туману, проте лише один або два механізми відіграють домінуючу роль [25]. Те, який механізм гасіння є домінуючим, залежить від характеристик водяного туману, сценаріїв пожежі, геометрії приміщення та умов вентиляції. Багато інших чинників, таких як ефект огороження, динамічне перемішування, що створюється потоком водяного туману, типи систем водяного туману, що застосовуються (загальне або локальне застосування), а також використання добавок і режимів розпилення, справляють важливий вплив на ефективність водяного туману під час гасіння пожеж [26; 34; 35].

Ефективність системи в гасінні пожежі безпосередньо пов'язана з характеристиками розпилення, що створюється зрошувачами. Таким чином, можна виділити перелік важливих параметрів водяних зрошувачів для гасіння пожеж:

- середня витрата на одиницю площі в зоні пожежі;
- розподіл швидкості потоку в зоні пожежі та навколо неї;
- напрямок розпилення;
- розмір і розподіл крапель;
- швидкість струменя водоповітряної суміші;
- додаткові хімічні елементи, які вводяться в склад розчину.

Хоча всі ці важливі параметри розпилення можуть бути використані для опису характеристики водяного туману під час пожежогасіння, їх можна звести до трьох основних параметрів: розподіл крапель за розмірами, щільність потоку та імпульс розпилення [1].

Ці три основні параметри водяного туману не тільки безпосередньо визначають ефективність водяного туману для пожежогасіння, але й потенційно визначають відстань між розпилювачами, а також обмеження висоти стелі для конкретної установки.

Розподіл крапель за розмірами, наведений у табл. 1, належить до діапазону крапель, що містяться в репрезентативних зразках хмари розпилення або туману, виміряних у визначених місцях.

NFPA 750 [3] розділив краплі, що утворюються системою водяного туману, на три класи, щоб розрізнити «більші» і «менші» розміри крапель у межах 200–1000-мікронного діапазону.

Таблиця 1

Розподіл діаметру крапель води, та необхідний тиск системи згідно з NFPA 750

Класи	Розмір крапель, мкм	Орієнтовний необхідний тиск системи
клас 1	Dv0.9 < 200	до 12,1 бар
клас 2	200 < Dv0.9 < 400	від 12,1 до 34,5 бар
клас 3	Dv0.9 > 400	понад 34,5 бар

Теоретично дрібні краплі більш ефективні під час гасіння пожежі, ніж великі, через більшу загальну площу поверхні, доступну для випаровування та відведення тепла. Вони більш ефективні в ослабленні радіаційного та конвекційного випромінювання [30]. Крім того, дрібні краплі мають довший час перебування в об'ємі, що дає їм змогу переноситися повітряними потоками у віддалені або закриті частини об'єкта. Вони можуть демонструвати більш газоподібну поведінку і кращу здатність до змішування. Однак дрібним краплям дуже важко проникнути у факел пожежі і досягти поверхні палива через опір і гідродинамічний ефект факелу пожежі. Дрібні краплі з низьким імпульсом легко переносяться від пожежі повітряними потоками. Крім того, для утворення дрібних крапель і перенесення їх до вогню потрібно більше енергії.

Великі краплі можуть легко проникати у факел пожежі, забезпечуючи прямий контакт з вогнем, а також змочувати та охолоджувати горючі речовини. Однак великі краплі мають меншу загальну поверхню для відведення тепла і випаровування. Здатність водяного туману в гасінні загороджених/екранованих пожеж зменшується зі збільшенням розміру крапель.

Крім того, великі краплі з високою швидкістю можуть спричинити розбризкування рідкого палива, що призводить до збільшення розміру пожежі.

Таким чином, можна стверджувати, що оптимальний розмір крапель для пожежогасіння сильно залежить від багатьох чинників, таких як властивості горючої речовини, ступінь перешкод у приміщенні та розмір пожежі. Розподіл крапель за розміром, який найефективніший для гасіння одного сценарію пожежі, не обов'язково буде найкращим для інших сценаріїв. Не існує єдиного розподілу розмірів, який би підходив для всіх сценаріїв пожежі. Насправді ефективність водяного туману з добре змішаним розподілом дрібних і великих крапель краща, ніж за рівномірного розподілу крапель [1; 36]. Крім того, будь-які зміни розміру пожежі, швидкості розпилення (імпульсу) і ефекту огороження змінюють оптимальний розмір крапель для пожежогасіння.

Щільність потоку розпилення – це кількість розпиленої води в одиниці об'єму (л/хв/м^3) або на одиницю площі (л/хв/м^2) [1]. У масштабі відсіку збільшення щільності потоку зменшить температуру у відсіку, але не матиме значного впливу на концентрацію кисню у відсіку [34]. Без достатньої щільності потоку розпилюваної води для відведення певної кількості тепла від пожежі або для охолодження палива нижче точки займання вогонь може підтримувати себе, підтримуючи високу температуру полум'я і високу температуру зони горіння.

Оскільки водяний туман не поводить себе як «справжній» газоподібний агент, важко встановити «критичну концентрацію» крапель води, необхідну для гасіння пожежі (тобто мінімальну сумарну масу води в краплях на одиницю об'єму або на одиницю площі для гасіння пожежі) [1; 37; 38]. Кількість туману, що досягає пожежі, визначається багатьма чинниками. До них належать імпульс і кут розпилення, екранування, розмір пожежі, умови вентиляції та геометрія відсіку.

Крім того, сучасна технологія розпилення і відповідне розташування розпилювачів у відсіку не можуть забезпечити рівномірну щільність потоку розпилення. Щільність потоку розподіл водяного туману в межах конуса розпилення однієї форсунки неоднорідний. Деякі типи розпилювачів для виробництва водяного туману концентрують великий відсоток водяного туману в центрі конуса, тоді як інші типи розпилювачів можуть мати меншу концентрацію водяного туману в центральній частині [34; 39]. Коли конуси розпилення від групи розпилювачів перекриваються, щільність потоку в будь-якій точці також відрізняється від тієї, що спостерігається з однією форсункою через динаміку взаємодії розпилювачів.

Ендрюс [38] порівняв мінімальні витрати, необхідні для гасіння твердопаливних пожеж, запропоновані 19 авторами. Виявлено, що ці мінімальні витрати широко варіюються залежно від умов застосування, і жодна «критична концентрація» водяного розпилювача не може відповідати всім випадкам застосування.

Імпульс розпилення належить до маси розпилення, швидкості розпилення та його напрямку відносно факела пожежі. Імпульс розпилення визначає не тільки те, чи можуть краплі води проникнути в полум'я або досягти поверхні палива, але й швидкість втягування навколишнього повітря у факел пожежі. Турбулентність, що створюється розпилювачем, змішує дрібні краплі води і водяну пару в зоні горіння, що розбавляє кисень і пари пального та підвищує вогнегасну ефективність водяного туману під час пожежогасіння.

Маса розпилення визначається в імпульсі розпилення, отже, включає не тільки масу рідкої фази води, але й масу води в пароподібній фазі та повітря, захопленого водяним туманом [26].

Імпульс розпилення води визначається багатьма чинниками. До них належать розмір і швидкість крапель, тиск нагнітання і кут конуса розпилювача, відстань між форсунками, умови вентиляції і геометрія відсіку. [26]. Крім того, імпульс розпилення буде поступово зменшуватись, оскільки дрібні краплі води проходять через гарячий газ, а швидкість і розмір крапель зменшуються через гравітаційні сили та сили опору на краплі під час випаровування [40]. Відстань від сопла, яку повинні пройти краплі води перед падінням у повітря, визначається імпульсом розпилення та кутом конуса розпилення [40].

Відстані падіння значно зменшуються зі зменшенням розміру краплі та підвищенням температури довкілля. Отже, за високої стелі імпульс дрібних крапель води стане дуже малим, перш ніж вони досягнуть вогню. Такі дрібні водяні бризки з низьким імпульсом не зможуть пробитися крізь сильний висхідний факел вогню і досягти пожежі, що призведе до нездатності придушити пожежу.

Щоб уникнути захоплення туману (і водяної пари) вогняним шлейфом, імпульс туману повинен бути щонайменше рівним за величиною і протилежним за напрямком імпульсу вогняного факелу [26].

Імпульс розпилення також особливо важливий для зонованих систем пожежогасіння водяним туманом та для пожеж з високим ступенем перешкод. Для таких пожеж водяний туман повинен спрямовуватися безпосередньо на вогонь і гасити його за рахунок придушення полум'я та охолодження палива.

Додатково в подальшому варто розглянути ефективність систем пожежогасіння у разі пожеж у закритих приміщеннях за рахунок створення ефекту оболонки, динамічного переміщення парів пожежі та рівномірного розподілу температури по всьому об'єму простору пожежі. Окремих досліджень потребують питання вибору типів форсунок, способу генерації вогнегасної речовини та можливість додавання до води добавок, які зможуть покращити процес гасіння пожежі.

Висновки. Механізми гасіння систем водяного туману були визначені як охолодження джерела пожежі, витіснення кисню і продуктів горіння, а також зменшення теплового випромінювання. Чинниками, які впливають на ефективність гасіння пожеж СПГ ТРВ, є правильна побудова розпилювача, яка буде впливати на розподіл крапель за розмірами, щільності та інтенсивності зрошення,

та комбінація води з іншими добавками, яка підвищить вогнегасні здатності системи.

Можна виділити такі подальші напрями для вдосконалення СПГ ТРВ, які покращать ефективність гасіння пожеж:

- розроблення нових типів форсунок: створення форсунок з адаптивною геометрією та механізмами самоочищення;
- оптимізація розміру крапель: дослідження оптимального розміру крапель для різних типів пожеж (20–1 000 мкм);
- впровадження багаторежимних систем: розроблення систем, що можуть змінювати параметри розпилення залежно від умов пожежі;
- модифікація води та використання добавок: використання поверхнево-активних речовин (ПАР), пінних та інших хімічних елементів для кращого проникнення в матеріали, інгібування горіння та підвищення ефективності системи;
- поєднання переваг водяного туману та інертних газів.

Поєднання лабораторних досліджень і комп'ютерного моделювання з перевіркою на пожежних випробуваннях є необхідною умовою підвищення ефективності систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ CEN/TS 14972:2016 «Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтажування». (CEN/TS 14972:2011, IDT).
2. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту.
3. National Fire Protection Association: NFPA 750 (2023). Technical report.
4. European Committee for Standardization: EN 14972-1 (2020) Technical report.
5. British Standards Institution: BS 8489-1 (2016) Technical report Fire Technology 2024.
6. UL: UL 2167 (2011) Technical report.
7. People's Republic of China Public Security Industry Standards: GA 1149 (2014) Technical report.
8. Standards Australia Committee FP/12: AS 4587 (2020) Technical report.
9. Braidech, M. M., Neale, J. A., Matson, A. F. and Dufour, R. E., The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water, Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, p. 73, 1955.
10. Rasbash, D. J. and Rogowski, Z. W. Extinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays. Combustion and Flame, Vol. 1, 1957.
11. McCaffrey, B. J. Jet Diffusion Flame Suppression Using Water Sprays: An Interim Report. Combustion Science and Technology, Vol. 40, 1984, pp. 107–136.

12. Дубінін Д. П. Обґрунтування та визначення сфери застосування засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 341–343.
13. Кириченко О. В., Абрамов Ю. О., Собина В. О. Дослідження ефективності застосування тонкорозпиленої води під час гасіння пожеж у житлових приміщеннях. *Науковий вісник НУЦЗУ*. 2021. № 2(24). С. 110–117.
14. Балагура Є. Г., Ніжник В. В. Експериментальні дослідження параметрів розпилення води системами пожежогасіння високого тиску. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(11). С. 4–12.
15. Антошкін О. А., Рак Т. Є. Моделювання динаміки розповсюдження тонкорозпиленої води в умовах пожежі. *Пожежна безпека*. 2020. № 36. С. 6–12.
16. Зобенко Н. В., Ковальов А. І. Експериментальні дослідження модифікованих водних розчинів для систем пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. № 2. С. 45–52.
17. Yu, H. Z. (2022). Fire suppression with water mist: The effect of drop size distribution. *Fire Safety Journal*, 127, 103473. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103473
18. Xin, Y., Beji, T., & Merci, B. (2021). Numerical study of water mist suppression of small-scale compartment fires. *Fire Technology*, 57(1), 19–41. DOI: 10.1007/s10694-020-01030-9
19. Holmstedt, G., & Persson, H. (2019). Water mist systems – Research, standards and components. *Fire Safety Journal*, 105, 350–368. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.02.011.
20. Zheng, B., Liu, Y., Liu, R., & Xiao, S. (2021). Enhanced fire suppression of water mist with addition of charged particles. *Applied Sciences*, 11 (3), 1289. DOI: 10.3390/app11031289
21. Pietrzak, L. M. and Ball, J. A. A Physically Based Fire Suppression Computer Simulation – Definition, Feasibility Assessment, Development Plan, and Applications, Mission Research Corporation, MRC-R-732, April 1983.
22. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, *Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994*, pp. 47–60.
23. Kanury, A. M. Introduction to Combustion Phenomena, Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
24. Herterich, A. O. Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: The Diffuse Jet – Spray Jet, The Dr. Alfred Huthig Publishing Co., Heidelberg, 1960.
25. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, NY, 1985.
26. Mawhinney, J. R. and Back, G. G. Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems, *Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, Feb., 1998*.
27. Rosander, M. and Giselsson, K., Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes, *Fire*, Oct., 1984, pp. 43–46.
28. Dlugogorski, B. Z., Hichens, R. K., Kennedy, E. M. and Bozzelli, J.W. Water Vapour as an Inerting Agent, *Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1997*, p. 7.
29. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, *Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994*, pp. 47–60.
30. Ravigururajan, T. S. and Beltran, M. R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, 1989, pp. 171–181.
31. Coppalle, A. Fire Protection: Water Curtains, *Fire Safety Journal*, Vol. 20, 1993, pp. 241–255.
32. Log, T. Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays, *Fire Safety Science Proceedings of Fourth International Symposium, 1996*, pp. 425–434.
33. Mawhinney, J. R. Water Mist Fire Suppression Systems: Principles and Limitations, *International Conference on Fire Protection in the HVDC Industry, Vancouver, Canada, 1995*.
34. Back, G. G. A Quasi-Steady State Model for Predicting Fire Suppression in Spaces Protected by a Water Mist System, Master's Thesis, University of Maryland, December, 1996.
35. Liu, Z. and Kim, A. K. Water Mist as a Halon Alternative: Its Status and Development, 1997 Society of Fire Protection Engineers Seminar, Los Angeles, CA, U.S.A, May, 1997.
36. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, *International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993*.
37. Hansen, R. USCG Full Scale Water Mist Testing Vertical & Horizontal Scaling, *Proceedings: International Conference on Fire Research and Engineering, 1995*, p. 313.
38. Andrews, S. P. Literature Review: Fire Extinguishing by Water Sprays, Building Research Establishment, UK, Internal Report, 1992.
39. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, *International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993*.
40. Andersson, P., Arvidson, M. and Holmstedt, G. Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist, Technical Report 3080, Dept. of Fire Safety

REFERENCES

1. DSTU CEN/TS 14972:2016. Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Systemy pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu. Proektuvannia ta montuvannia [Fixed fire-fighting systems. Water mist systems. Design and installation] (CEN/TS 14972:2011, IDT).
2. DBN V.2.5-56:2014 Systemy proty pozhezhnoho zakhystu [Fire protection systems. Design standards].
3. National Fire Protection Association: NFPA 750 (2023) Technical report.
4. European Committee for Standardization: EN 14972-1 (2020) Technical report.
5. British Standards Institution: BS 8489-1 (2016) Technical report Fire Technology 2024.
6. UL: UL 2167 (2011) Technical report.
7. People's Republic of China Public Security Industry Standards: GA 1149 (2014) Technical report.
8. Standards Australia Committee FP/12: AS 4587 (2020) Technical report.
9. Braidech, M. M., Neale, J. A., Matson, A. F. and Dufour, R. E., The Mechanisms of Extinguishment of Fire by Finely Divided Water, Underwriters Laboratories Inc. for the National Board of Fire Underwriters, NY, p. 73, 1955.
10. Rasbash, D. J. & Rogowski, Z. W. Extinction of Fires in Liquids by Cooling with Water Sprays, Combustion and Flame, Vol. 1, 1957.
11. McCaffrey, B. J. Jet Diffusion Flame Suppression Using Water Sprays: An Interim Report, Combustion Science and Technology, Vol. 40, 1984, pp. 107–136.
12. Dubinin, D. P. (2022). Obhruntuvannia ta vyznachennia sfery zastosuvannia zasobiv pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu [Justification and determination of the scope of application of water mist fire extinguishing agents]. Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention in Today's Conditions: Collection of Scientific Papers of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation. Lviv : Lviv State University of Life Safety, pp. 341–343.
13. Kyrychenko, O. V., Abramov, Yu. O., & Sobina, V. O. (2021). Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia tonkorozpylenoi vody pid chas hasinnia pozhezh u zhytlovykh prymyshchenniakh [Study of the efficiency of using water mist during fire extinguishing in residential premises]. Scientific Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine, 2(24), pp. 110–117.
14. Balagura, Ye. H., & Nizhnyk, V. V. (2022). Eksperymentalni doslidzhennia parametriv rozpylennia vody systemamy pozhezhohasinnia vysokoho tysku. [Experimental studies of water spray parameters in high-pressure fire extinguishing systems]. Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(11), pp. 4–12.
15. Antoshkin, O. A., & Rak, T. Ye. (2020). Modeliuvannia dynamiky rozpovsiudzhennia tonkorozpylenoi vody v umovakh pozhezh [Modeling the dynamics of water mist dispersion under fire conditions]. Fire Safety, 36, pp. 6–12.
16. Zobenko, N. V., & Kovalov, A. I. (2023). Eksperymentalni doslidzhennia modyfikovanykh vodnykh rozchyniv dlia system pozhezhohasinnia tonkorozpylenoiu vodoiu [Experimental studies of modified aqueous solutions for water mist fire extinguishing systems. Emergencies]: Prevention and Response, 2, pp. 45–52.
17. Yu, H. Z. (2022). Fire suppression with water mist: The effect of drop size distribution. Fire Safety Journal, 127, 103473. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103473
18. Xin, Y., Beji, T., & Merci, B. (2021). Numerical study of water mist suppression of small-scale compartment fires. Fire Technology, 57(1), 19–41. DOI: 10.1007/s10694-020-01030-9
19. Holmstedt, G., & Persson, H. (2019). Water mist systems – Research, standards and components. Fire Safety Journal, 105, 350–368. DOI: 10.1016/j.firesaf.2019.02.011.
20. Zheng, B., Liu, Y., Liu, R., & Xiao, S. (2021). Enhanced fire suppression of water mist with addition of charged particles. Applied Sciences, 11(3), 1289. DOI: 10.3390/app11031289
21. Pietrzak, L. M. and Ball, J. A. A Physically Based Fire Suppression Computer Simulation – Definition, Feasibility Assessment, Development Plan, and Applications, Mission Research Corporation, MRC-R-732, April 1983.
22. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K., A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist, Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994, pp. 47–60.
23. Kanury, A. M. Introduction to Combustion Phenomena, Eighth Edition, Gordon and Breach Science Publishers, USA, 1994.
24. Herterich, A. O. Library of the Science of Fire Protection and Related Areas: Section 3: The Diffuse Jet – Spray Jet, The Dr. Alfred Huthig Publishing Co., Heidelberg, 1960.
25. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley and Sons, NY, 1985.
26. Mawhinney, J. R. and Back, G. G. Bridging the Gap Between Theory & Practice: Protecting Flammable Liquid Hazards Using Water Mist Fire Suppression Systems, Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, Feb., 1998.
27. Rosander, M. and Giselsson, K. Making the Best Use of Water for Fire Extinguishing Purposes, Fire, Oct., 1984, pp. 43–46.
28. Dlugogorski, B. Z., Hichens, R. K., Kennedy, E. M. and Bozzelli, J. W., Water Vapour as an Inerting Agent, Proceedings: Halon Alternatives Technical Working Conference, 1997, p. 7.
29. Mawhinney, J. R., Dlugogorski, B. Z. and Kim, A. K. A Closer Look at the Fire Extinguishing

Properties of Water Mist, Fire Safety Science – Proceedings of Fourth International Symposium, 1994, pp. 47–60.

30. Ravigururajan, T. S. and Beltran, M. R. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets, Fire Safety Journal, Vol. 15, 1989, pp. 171–181.

31. Coppalle, A. Fire Protection: Water Curtains, Fire Safety Journal, Vol. 20, 1993, pp. 241–255.

32. Log, T. Radiant Heat Attenuation in Fire Water Sprays, Fire Safety Science Proceedings of Fourth International Symposium, 1996, pp. 425–434.

33. Mawhinney, J. R. Water Mist Fire Suppression Systems: Principles and Limitations, International Conference on Fire Protection in the HVDC Industry, Vancouver, Canada, 1995.

34. Back, G. G. A Quasi-Steady State Model for Predicting Fire Suppression in Spaces Protected by a Water Mist System, Master's Thesis, University of Maryland, December, 1996.

35. Liu, Z. and Kim, A.K. Water Mist as a Halon Alternative: Its Status and Development, 1997 Society

of Fire Protection Engineers Seminar, Los Angeles, CA, U.S.A, May, 1997.

36. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993.

37. Hansen, R. USCG Full Scale Water Mist Testing Vertical & Horizontal Scaling, Proceedings: International Conference on Fire Research and Engineering, 1995, p. 313.

38. Andrews, S. P. Literature Review: Fire Extinguishing by Water Sprays, Building Research Establishment, UK, Internal Report, 1992.

39. Mawhinney, J. R. Characteristics of Water Mists for Fire Suppression in Enclosures, International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Sweden, 1993.

40. Andersson, P., Arvidson, M. and Holmstedt, G. Small Scale Experiments and Theoretical Aspects of Flame Extinguishment with Water Mist, Technical Report 3080, Dept. of Fire Safety Engineering, Lund University, May, 1996. Volume 10, Issue 3. <https://doi.org/10.1177/104239159901000303>

© Р. Л. Пелех, В. М. Марич

Оглядова стаття

Надійшла до редакції 20.04.2025

Прийнято до публікації 04.06.2025