

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Криворучко Євген Миколайович

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІКИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ
ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ВОДЯНИМ СТРУМЕНЕМ

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Є. М. Криворучко

Науковий керівник:

Дубінін Дмитро Петрович, кандидат технічних наук, доцент

Черкаси – 2025

АНОТАЦІЯ

Криворучко Є. М. Удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2025 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання в галузі пожежної безпеки, а саме: удосконалення ефективності гасіння пожежі за рахунок застосування дрібнодисперсного водяного струменя, що створює установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** проаналізовано фізико-хімічні властивості води як вогнегасної речовини, у тому числі термодинамічні властивості води які є важливими при гасінні пожежі. Проаналізовано та обґрунтовано доцільність застосування суцільного, розпиленого та дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж. Встановлено, що найбільший вогнегасний ефект при гасінні пожежі досягається при подачі води в дрібнодисперсному вигляді, при цьому вогнегасна ефективність води залежить від розміру крапель води (дисперсності) та інтенсивності подачі вогнегасних речовин. Проаналізовані способи розпилення рідини, такі як: гідравлічний, механічний, пневматичний, пульсаційний, ультразвуковий, електростатичний, акустичний, електрогідравлічний та комбінований. Проаналізовані технічні засоби, що використовують пожежно-рятувальні підрозділи при подачі водяного струменя

при гасінні пожеж.

Проаналізовано розвиток технології пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем. Визначено, що одним із ключових чинників, які сприяли розвитку технологій застосування дрібнодисперсного водяного струменя для пожежогасіння, стала відмова від використання галонів (хладонів) відповідно до положень Монреальського протоколу, а також аналіз наслідків пожежі на шведському поромі «Scandinavian Star». Проаналізовано стан застосування засобів пожежогасіння гасіння дрібнодисперсним водяним струменем, що використовуються під час гасіння пожеж в Україні. Визначено, що проектування, монтування та підтримання експлуатаційної придатності систем дрібнодисперсним водяним струменем повинно відповідати вимогам ДСТУ CEN/TS 14972:2016.

Проаналізовані сучасні технічні засоби пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем. Встановлена доцільність використання мобільних установок для подачі дрібнодисперсного водяного струменя, особливо для боротьби з пожежами. Визначено, що недосконалість існуючої техніки подачі й розпилення води багато в чому знижує її ефективність.

Проведено огляд наукових досліджень щодо процесу розпилення води під дією ударної хвилі. Проведені в роботі дослідження підтвердили та визначили ефективність подрібнення води ударними хвилями високої інтенсивності. Встановлено, що підвищення інтенсивності ударної хвилі до числа Маха 2 та більше необхідне для ефективного розпилення рідини.

Як один із напрямків вирішення питання щодо застосування дрібнодисперсних водяних струменів при гасінні пожеж у будівлях, запропоновано використовувати установку пожежогасіння періодично-імпульсної дії за рахунок імпульсного (пульсаційного) способу.

У **другому розділі** представлені дослідження подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та дослідження заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем. Обґрунтовано та розроблено математичні моделі, які опрацьовані за

допомогою програмного середовища для проведення математичного моделювання процесів нагнітання води у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з подальшим її подрібненням ударною хвилею та для заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем.

За результатами математичного моделювання процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії встановлено високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до газодетонаційних процесів, що відбуваються в установці пожежогасіння. Визначено, що при експлуатації установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії не є доцільним застосовувати імпульсне впорскування води у ствол установки. Встановлено, що процес подрібнення води відбувається не під дією ударної хвилі, а під дією високошвидкісного газового потоку, що рухається за ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

За результатами математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем встановлено, що час заповнення складає 85 с, а за 100 с відбувається гасіння пожежі за рахунок досягнення густини крапель води у повітрі, при цьому швидкість розширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя в модельному приміщенні склала 0,14 м/с. Визначено, що у об'ємі модельного приміщення залишаються області, де концентрація крапель дрібнодисперсного водяного струменя не набуває вогнегасних властивостей.

У **третьому розділі** представлені дослідження установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини. Проведені дослідження із визначення параметрів роботи установки та тактико-технічних характеристик при формуванні дрібнодисперсного водяного струменя. Досліджено розвиток імпульсних систем для гасіння пожеж дрібнодисперсним водяним струменем. Встановлено, що при тиску пропано-кисневого заряду 0,1 МПа та куті нахилу ствола 30° далекобійність водяного струменя перевищила 15 м з максимальним радіусом розкриття струменя до 3 м.

У **четвертому розділі** представлені дослідження пожежогасіння

дрібнодисперсним водяним струменем, що засновані на розпилюванні води продуктами детонації у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. У цій установці дрібнодисперсного гасіння пожежі подавання води у ствол здійснюється безперервно, а імпульсне розпилювання води продуктами детонації відбувається з частотою 23–24 Гц. Саме розпилювання води, що подається безперервно, під дією імпульсних газових потоків становить науково-практичний інтерес.

У п'ятому розділі проведені експериментальні дослідження із формування дрібнодисперсного водяного струменя води під дією ударної хвилі. За результатами досліджень встановлена довжина розповсюдження дрібнодисперсного водяного струменя, що склала 34 м, а висота – 2,1 м. Також визначено, що найбільш інтенсивне осідання крапель води струменя відбувається на довжині 3 м від ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, при цьому встановлено форму осідання з розмірами $8 \times 1,9$ м. Середньоквадратична витрата води при подачі дрібнодисперсного водяного струменя склала $5,51 \pm 1,914_{0,9}$ л/хв.

Проведені експериментальні дослідження подавання дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації. За результатами експериментального дослідження підтверджено можливість застосування методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем для гасіння пожежі у тунелях складної конфігурації на основі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. За результатами проведених досліджень встановлено, що припинення горіння відбулося через 9 с. Повне загасання полум'я відбулося через 25 с від початку включення установки. Під час роботи установки витрата води складе 1800 л/год., що забезпечить відбір тепла із зони пожежі біля 4 ГДж/год. Визначено, що для витіснення повітря та газоподібних продуктів згорання з приміщення розміром $5 \times 3 \times 3$ м необхідно 36 л води. За результатами експериментальних досліджень встановлено час затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя із трубопроводу складної конфігурації в

залежності від його загальної довжини, а також витрату води, яка конденсувалася у трубопроводі. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при подачі дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж. Для оцінки ефективності застосування систем пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем були проведені натурні експерименти, які показали доцільність застосування установок пожежогасіння з газодетонаційною технологією.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше виявлено особливості заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем із розміром крапель 5 мкм з визначенням швидкості поширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні.

2. Вперше на основі теоретичних розрахунків виявлено, що основний процес подрібнення води відбувається не під дією ударної хвилі, а під дією високошвидкісного газового потоку що рухається за ударною хвилею.

3. Удосконалено методи подачі вогнегасних речовин в осередок пожежі за рахунок створення дрібнодисперсного водяного струменя через трубопроводи складної конфігурації, а також встановлено відсоток води, що конденсується у трубопроводі.

4. Удосконалено метод формування дрібнодисперсного водяного струменя за рахунок безперервного подавання води у ствол та періодичної дії на цівки води у стволі інтенсивними ударними хвилями з періодичністю 23 Гц та вище з виявленням ефективного розпилення води, що розтікається вздовж стінок ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

5. Набула подальшого розвитку техніка пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок газодетонаційного принципу прискорення рідини, яка дозволяє багаторазово скоротити витрату заряду для прискорення вогнегасної речовини.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримані в роботі теоретичні та експериментальні результати дозволяють

стверджувати про доцільність та ефективність використання дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж. За результатами експериментального дослідження підтверджено можливість застосування методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем для гасіння пожежі у конструкціях складної конфігурації на основі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Так, при проведенні досліджень встановлено, що припинення інтенсивного горіння відбулося через 9 с. Повне загасання полум'я відбулося через 25 с від початку включення установки. Під час роботи установки витрата води складала 30 л/хв, що забезпечує відбір тепла із зони пожежі біля 4 ГДж/год. Окрім цього визначено, що для витіснення повітря та газоподібних продуктів згорання з приміщення розміром $5 \times 3 \times 3$ м необхідно 36 л води. Другий етап досліджень передбачав подавання дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації довжиною 10 м за допомогою установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Встановлено, що вихід водяного аерозолі з труби ПВХ починає відбуватися через 22 с від початку включення установки та зі зростанням часу відбувалося формування дрібнодисперсної хмари у вигляді струменя. При цьому відсоток конденсації складав $0,517 \pm 1,224_{0,9} \%$.

При проведенні експериментальних досліджень на відкритому майданчику при подачі дрібнодисперсного водяного струменя за допомогою установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії встановлена довжина розповсюдження струменя, що склала 34 м, а висота – 2,1 м. Також визначено, що найбільш інтенсивне осідання крапель води дрібнодисперсного водяного струменя відбувається на довжині 3 м від ствола установки, при цьому встановлено форму осідання з розмірами $8 \times 1,9$ м. При цьому, середньоквадратична витрата води при подачі дрібнодисперсного водяного струменя склала $5,51 \pm 1,914_{0,9}$ л/хв.

Ключові слова: пожежа, гасіння, установка пожежогасіння, дрібнодисперсний водяний струмінь, вогнегасна речовина, вода, дисперсність, газ, ударна хвиля, детонація, математичне моделювання, модель.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus:

1. Dubinin D., Lisniak A., **Krivoruchko Y.**, Pobidash A. Experimental Investigations of the Thermal Decomposition of Wood at the Time of the Fire in the Premises of Domestic Buildings. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1066. P. 191–198. doi: <https://doi.org/10.4028/p-8258ob>.
2. Korytchenko K., Samoilenko D., Dubinin D., Kucherskyi V., **Krivoruchko Y.** Enhancing the Fire Resistance of Concrete Structures by Applying Fire-Retardant Temperature-Resistant Metal Coatings. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 500-505. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500>.
3. Dubinin D., Korytchenko K., **Krivoruchko Y.**, Tryfonov O., Sakun O., Ragimov S., Tryhub V. Numerical studies of the breakup of the water jet by a shock wave in the barrel of the fire extinguishing installation. *Sigurnost*. 2024. Vol. 66 (2). P. 139–150. doi: <https://doi.org/10.31306/s.66.2.4>.

Публікації в наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

4. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.** Тенденції розвитку імпульсних вогнегасних систем для гасіння пожеж дрібнорозпилим водяним струменем. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 45. С. 41–47. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9027>.
5. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., **Криворучко Є. М.**, Думчикова Д. М. Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі водяним аерозолем у приміщеннях складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46. С. 47–53. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10560>.
6. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.** Експериментальне дослідження водяного аерозолі, що створюється установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020.

№ 47. С. 29–34. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10844>.

7. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.**, Белоусов І. О. Експериментальне дослідження подавання водяного аерозолю через трубопровід складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020.

№ 48. С. 45–52. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12016>.

8. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., **Криворучко Є. М.**, Гапоненко Ю. І. Експериментальне дослідження розвитку пожежі в будівлі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 110–121. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-8>.

9. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., **Криворучко Є. М.**, Гапоненко Ю. І. Дослідження впливу будівельного матеріалу конструкції будівлі на розвиток внутрішньої пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-13>.

10. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., **Криворучко Є. М.**, Рагімов С. Ю., Тригуб В. В. Особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 2(38). С. 69–79. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2023-38-5>.

Патенти України на корисну модель:

11. Розбірна проміжна ємність для зберігання рідини: пат. 151203, МПК (2022.01) B65D 6/00, A62C 99/00, E03B 11/00. № u202200208; заяв. 17.01.2022; опубл. 15.06.2022, бюл. № 24.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Обґрунтування технічних характеристик імпульсних вогнегасних систем «IFEX». *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах*: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). м. Київ: ІДУЦЗ. 2019. С. 87–90.

13. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Дослідження застосування складних

конструкцій житлових будівель для подачі водяного аерозолю. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: збірник наукових праць Регіональної науково-практичної конференції. м. Львів: ЛДУ БЖД. 2020. С. 131–134.

14. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Проведення дослідження із визначення довжини та висоти розповсюдження водяного аерозолю. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2020. С. 34–36.

15. **Криворучко Є. М.**, Дубінін Д. П. Застосування дрібнорозпиленних водяних струменів під час гасіння пожежі. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 79–81.

16. **Криворучко Є. М.** Класифікація технічних засобів подачі вогнегасної речовини для гасіння пожеж: *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 80.

17. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Дослідження застосування дрібнорозпиленого водяного струменя для гасіння пожеж. *Безпека людини у сучасних умовах*: збірник доповідей XII Міжнародної науково-методичної конференції та 144 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS). м. Харків: НТУ «ХП», 2020. С. 253–255.

18. **Криворучко Є. М.** Дослідження способів розпилення води. *Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС*: матеріали круглого столу. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 53–54.

19. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Розвиток становлення водяного туману для гасіння пожеж. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 133–134.

20. **Криворучко Є. М.** Розвиток техніки пожежогасіння дрібнорозпиленними струменями води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 6.

21. Dubinin D., **Krivoruchko Y.**, Harbuz S. Investigation of the influence of water dispersion on the fire extinguishing process. *Sectoral research XXI: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» II International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference*. European Scientific Platform. Chicago, USA. 2021. P. 63–64. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/15324>.

22. Dubinin D., **Krivoruchko Y.**, Lisniak A. Research of creation of fine dispersed water jet for fire extinguishing. *Der sammlung wissenschaftlicher arbeiten «ΛΟΓΟΣ» Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz «Multidisziplinäre forschung: perspektiven, probleme und muster»*. Ullstein Buchverlage GmbH & Europäische. Wien-Vinnytsia. 2021 P. 131–132. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-09.04.2021.v1.44>.

23. **Криворучко Є. М.** Дослідження процесу розпилення води під дією ударної хвилі. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 125.

24. **Криворучко Є. М.** Подрібнення води ударною хвилею. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація*: матеріали круглого столу (вебінару). м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 167–169.

25. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Математичне моделювання впливу поширення ударної хвилі на потік води у стволі установки пожежогасіння. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. – С. 156.

26. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Обґрунтування технології створення дрібнорозпилених водяних струменів для гасіння пожеж. *Об'єднання теорії та*

практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 110–112.

27. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Обґрунтування умов припинення горіння та доцільність застосування дрібнорозпиленої води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 163.

28. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями в сучасних умовах. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції.* м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 248–249.

29. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 164.

ABSTRACT

Kryvoruchko Ye. M. *Improvement of Fire Extinguishing Techniques Using Fine Water Spray*. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of doctor of philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem in the field of fire safety, namely: improving the efficiency of fire extinguishing through the use of a fine water spray generated by a periodically-impulsive fire suppression system.

The introduction provides a general overview of the dissertation. The relevance of the dissertation topic is substantiated, the aim of the study and the main research objectives are formulated, and the connection of the work with scientific programs is demonstrated. Information is provided on the author's personal contribution, the approval of the research, and related publications.

In the first section analyzes the physicochemical properties of water as a fire extinguishing agent, including the thermodynamic properties of water that are important in firefighting. The feasibility of using continuous, sprayed, and fine water mist streams for fire suppression is reviewed and substantiated. It is established that the highest extinguishing efficiency is achieved when water is applied in the form of fine mist; in this case, the extinguishing effectiveness of water depends on the droplet size (dispersion) and the intensity of the agent's application.

Various liquid atomization methods are analyzed, including hydraulic, mechanical, pneumatic, pulsation, ultrasonic, electrostatic, acoustic, electrohydraulic, and combined techniques. The technical means used by fire and rescue units for delivering water streams during firefighting operations are also examined.

The development of fine water mist firefighting technology is reviewed. One of the key factors contributing to the advancement of this technology was the abandonment of halons (CFCs) in accordance with the provisions of the Montreal Protocol, as well as the analysis of the fire incident on the Swedish ferry *Scandinavian*

Star. The current state of fine water mist fire suppression technologies used in Ukraine is examined. It is determined that the design, installation, and maintenance of such systems should comply with the requirements of DSTU CEN/TS 14972:2016.

Modern technical means of firefighting using fine water mist are reviewed. The appropriateness of using mobile units for delivering fine water mist particularly for firefighting is confirmed. It is established that the shortcomings of existing water delivery and atomization technologies significantly reduce their effectiveness.

A review of scientific research on water atomization under the influence of shock waves is provided. The research conducted within the dissertation confirms the effectiveness of water atomization by high-intensity shock waves. It is found that increasing the shock wave intensity to Mach 2 or higher is necessary for effective liquid atomization. As one approach to addressing the use of fine water mist for extinguishing fires in buildings, a periodic-impulse fire suppression unit utilizing a pulsation method is proposed.

The second section presents the research on water atomization by a shock wave within the barrel of a periodic-impulse fire suppression unit, as well as the investigation of fine water mist distribution within a model room. Mathematical models were substantiated and developed, and subsequently processed using specialized software for simulating the processes of water pressurization into the barrel of the periodic-impulse fire suppression unit, its subsequent atomization by a shock wave, and the dispersion of fine water mist in the model room.

The results of the mathematical modeling of the water filling process in the barrel of the periodic-impulse fire suppression unit revealed a high time inertia of the water injection process relative to the gas-detonation processes occurring within the unit. It was determined that pulsed water injection into the barrel is not advisable during the operation of the periodic-impulse fire suppression unit. It was established that water atomization occurs not directly due to the shock wave itself, but due to the high-velocity gas flow following the shock wave inside the barrel of the unit.

Based on the mathematical modeling of the fine water mist dispersion in the model room, it was found that the filling time is 85 seconds, and fire suppression is

achieved after 100 seconds as a result of reaching a critical droplet density in the air. The propagation speed of the extinguishing capability of the fine mist stream within the model room was determined to be 0.14 m/s. It was also identified that certain areas within the model room remain where the concentration of fine water mist droplets does not reach levels sufficient to provide effective fire suppression.

The third section presents research on a fire suppression unit utilizing a gas-detonation principle for accelerating liquid. Studies were conducted to determine the operational parameters of the unit and its tactical and technical characteristics during the formation of a fine water mist stream.

The development of impulse systems for firefighting using fine water mist was investigated. It was established that, at a propane-oxygen charge pressure of 0.1 MPa and a barrel inclination angle of 30°, the range of the water jet exceeded 15 meters, with a maximum spray cone radius of up to 3 meters.

The fourth section presents research on fire suppression using a fine water mist generated by water atomization through detonation products within the barrel of a periodic-impulse fire suppression unit. In this fine water mist suppression system, water is supplied to the barrel continuously, while pulsed atomization by detonation products occurs at a frequency of 23-24 Hz.

The process of continuously supplied water being atomized by pulsed gas flows generated by detonation constitutes a subject of significant scientific and practical interest.

The fifth section presents experimental research on the formation of a fine water mist stream under the influence of a shock wave. The experiments determined that the dispersion length of the fine water mist stream was 34 meters, with a height of 2.1 meters. It was also found that the most intense droplet deposition occurred at a distance of 3 meters from the barrel of the periodic-impulse fire suppression unit, forming a deposition area with dimensions of 8×1.9 meters. The root mean square water flow rate during the discharge of the fine mist stream was $5.51 \pm 1.914_{0.9}$ l/min.

Experimental studies were also conducted on the delivery of fine water mist through a pipeline of complex geometry. The results confirmed the feasibility of

applying fine water mist for fire suppression in tunnels with complex configurations using the periodic-impulse fire suppression unit. According to the experiments, flame extinction began after 9 seconds, and full suppression occurred 25 seconds after system activation. During operation, the water consumption rate was 1800 l/h, which enabled the extraction of approximately 4 GJ/h of heat from the fire zone. It was also established that 36 liters of water were required to displace air and combustion gases from a $5 \times 3 \times 3$ meter room.

The research further determined the delay time for mist discharge from the pipeline depending on its total length, as well as the amount of water that condensed inside the pipeline. Practical recommendations were developed for the use of the periodic-impulse fire suppression unit in delivering fine water mist for fire extinguishing. To assess the effectiveness of fire suppression systems using fine mist, full-scale experiments were conducted, demonstrating the practicality of deploying gas-detonation-based suppression technologies.

Scientific Novelty of the Obtained Results:

1. For the first time, the features of filling a model room with a fine water mist stream with a droplet size of $5 \mu\text{m}$ have been identified, including the determination of the propagation velocity of the extinguishing capacity of the fine water mist in the model environment.
2. For the first time, based on theoretical calculations, it has been established that the main water atomization process occurs not under the influence of the shock wave itself, but under the action of a high-velocity gas flow trailing the shock wave.
3. The methods of delivering extinguishing agents to the fire source have been improved by generating a fine water mist stream through pipelines of complex geometry, and the proportion of water condensed within the pipeline has been determined.
4. The method of forming a fine water mist stream has been improved through continuous water supply to the nozzle and periodic exposure of water filaments inside the barrel to intense shock waves at a frequency of 23 Hz or higher, leading to efficient atomization of water flowing along the inner walls of the periodic-impulse fire

suppression unit.

5. The technique of fire suppression using a fine water mist stream has been further developed through the application of a gas-detonation-based liquid acceleration principle, which significantly reduces the charge consumption required to accelerate the extinguishing agent.

Practical Significance of the Obtained Results

The theoretical and experimental results obtained in this work confirm the feasibility and effectiveness of using fine water mist for fire suppression. Experimental studies have verified the applicability of this method for extinguishing fires in complex-geometry structures using a periodic-impulse fire suppression unit. The investigations revealed that intense combustion was halted within 9 seconds, and complete flame extinction occurred 25 seconds after the activation of the unit. During operation, the water consumption rate was 30 L/min, which ensured a heat removal capacity of approximately 4 GJ/h from the fire zone.

Additionally, it was established that to displace air and combustion gases from an enclosure with dimensions of 5×3×3 m, 36 liters of water are required. The second stage of the study involved the delivery of fine water mist through a 10-meter pipeline of complex geometry using a periodic-impulse fire suppression unit. It was found that the aerosol mist began emerging from the PVC pipe 22 seconds after the system activation, gradually forming a mist cloud in the form of a jet. The condensation rate in the pipeline was determined to be $0.517 \pm 1.224_{0.9} \%$.

Outdoor field experiments demonstrated that the fine water mist stream generated by the periodic-impulse unit could reach a horizontal range of 34 meters and a vertical height of 2.1 meters. The most intense droplet deposition occurred at a distance of 3 meters from the nozzle, with the deposition area measured at 8×1.9 meters. The root mean square water consumption during the operation of the fine water mist system was $5.51 \pm 1.914_{0.9}$ L/min.

Keywords: fire, suppression, fire extinguishing system, fine water mist, extinguishing agent, water, dispersion, gas, shock wave, detonation, mathematical modeling, model.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ЗМІСТ.....	18
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПЕЦИФІКИ ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ.....	30
1.1 Аналіз фізико-хімічних властивостей води, як вогнегасної речовини	30
1.2 Способи застосування води під час гасіння пожеж.....	32
1.3 Технічні засоби гасіння пожежі водяним струменем.....	41
1.4 Огляд розвитку технології пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем.....	44
1.5 Аналіз стану застосування засобів гасіння дрібнодисперсним водяним струменем в Україні.....	47
1.6 Технічні засоби пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем.....	48
1.7 Аналіз досліджень процесу розпилення води під дією ударної хвилі.	51
1.8 Висновки до розділу 1.....	57
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ВОДЯНИМ СТРУМЕНЕМ.....	59
2.1 Постановка задачі математичного моделювання процесу подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.....	59
2.2 Постановка задачі математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем.....	61

2.3 Розробка математичної моделі дослідження в програмному середовищі.....	63
2.3.1 Моделі подрібнення води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.....	63
2.3.2. Модель заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем.....	68
2.4 Результати математичного моделювання процесів за технологією пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем.....	70
2.4.1 Результати математичного моделювання процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою.....	70
2.4.2 Результати математичного моделювання процесу подрібнення цівки води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії під дією ударної хвилі.....	74
2.4.3 Результати математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем.....	79
2.5 Розрахунок витрат енергії на подрібнення води.....	89
2.6 Висновки до розділу 2.....	91
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ СИСТЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ З МЕТАННЯ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНИМ ЗАРЯДОМ.....	93
3.1 Будова та принцип дії імпульсних систем гасіння пожеж з метання газодетонаційним зарядом.....	93
3.2 Дослідження установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини.....	95
3.3 Результати експериментального дослідження установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини.....	98
3.4 Висновки до розділу 3.....	104

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ВОДЯНИМ СТРУМЕНЕМ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПЕРІОДИЧНО-ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ.....	106
4.1 Будова установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та принцип формування дрібнодисперсного водяного струменя.....	106
4.2 Експериментальне дослідження параметрів ударної хвилі, що діє на цівку води.....	115
4.3 Висновки до розділу 4.....	121
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПЕРІОДИЧНО-ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ ПРИ ПОДАЧІ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ.....	122
5.1 Експериментальне дослідження формування дрібнодисперсного водяного струменя під дією ударної хвилі.....	122
5.2 Експериментальне дослідження подавання дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації.....	127
5.3 Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем у приміщеннях складної конфігурації.....	132
5.4 Рекомендації щодо застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при подачі дрібнодисперсного водяного струменя.....	137
5.5 Висновки до розділу 5.....	145
ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	148
ДОДАТКИ.....	164
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	164
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертаційної роботи...	170

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
ОРС ЦЗ – оперативно-рятувальна служба цивільного захисту;
ДДВС – дрібнодисперсний водяний струмінь;
УПГПД – установка пожежогасіння періодично імпульсної дії;
ВР – вогнегасна речовина;
ДСТУ – Держаний стандарт України;
EN – Європейський стандарт;
ISO – Міжнародна організація зі стандартизації;
ПВХ – полівінілхлорид;
СПБТ – суміш пропану-бутану технічного;
ЛЗР – легкозаймиста рідина;
ГР – горюча рідина.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. На сьогодні найбільш перспективним та ефективним напрямком щодо використання води для гасіння пожеж у будівлях є застосування технічних засобів пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем. Такі технічні засоби забезпечують зростання ефективності використання води з відповідним зменшенням її витрат. Ефект досягається за рахунок того, що поверхня охолодження збільшується в залежності від дисперсності за питомим відношенням з $0,18 \text{ л/м}^2$ до $0,017 \text{ л/м}^2$, при цьому забезпечується прискорене зниження температури в приміщеннях від 1000°C до 40°C .

Для створення дрібнодисперсного водяного струменя використовують такі способи розпилення як: гідравлічний, механічний, пневматичний, пульсаційний, ультразвуковий, електричний, акустичний, комбінований. Кожен з наведених способів розпилення має свої переваги й недоліки, однак з погляду практичного застосування у сфері пожежогасіння найбільший інтерес становлять гідравлічний, механічний, пневматичний і пульсаційний способи.

При гідравлічному розпиленні основним енергетичним фактором, який приводить до розпаду рідини на краплини є тиск нагнітання, при цьому реалізація потребує наявності постійного вододжерела та насосів високого тиску. При механічному способі рідина отримує енергію внаслідок тертя об робочий елемент, що обертається з великою швидкістю, при цьому реалізація його на практиці здійснюється за рахунок застосування форсунок, що є дуже дорогими, складними у виготовленні та експлуатації. При пневматичному способі розпилення енергія підводиться до рідини, внаслідок динамічної взаємодії її з високошвидкісним потоком розпилювального агенту (стиснутим газом), при цьому реалізація цього способу на практиці характеризується невисокою продуктивністю розпилювача, необхідністю у розпилювальному агенті і в додатковому обладнанні для його подачі, що, насамперед, зменшує сферу його застосування. Крім того необхідна значна кількість газу для розпилення води.

При пульсаційному способі відбувається накладення пульсацій тиску або витрати на потік рідини, що розпилюється, при цьому його реалізація на практиці здійснюється за допомогою імпульсних установок пожежогасіння. Таким чином, при застосуванні імпульсного способу розпилення ефективність використання вогнегасної речовини досягається за рахунок отримання високодисперсних високошвидкісних водяних струменів. Між тим імпульсні установки пожежогасіння мають ряд недоліків та потребують подальшого удосконалення за основними тактико-технічними показниками: дальність пострілу вогнегасною речовиною, кількість пострілів, маса вогнегасного заряду. Застосування більш потужного газодетонаційного заряду могло б дозволити підвищити характеристики імпульсних систем пожежогасіння щодо далекобійності та дисперсності водяного струменя.

Як альтернатива використанню імпульсних установок пожежогасіння є доцільним застосування установки періодично-імпульсної дії з відсутністю вищезазначених недоліків при низці переваг: 1) вищий рівень безпеки за рахунок автономної роботи; 2) надшвидке наповнення ствола горючою сумішшю під високим тиском; 3) вища ефективність подрібнення рідини ударними хвилями високої інтенсивності; 4) підвищення далекобійності водяного струменя. Розвиток техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії направлений на удосконалення імпульсного способу розпилення рідини.

В даний час існують чимало робіт, в яких розглядаються різні способи і методи створення та застосування дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж. Це роботи Ю. О. Абрамова, А. В. Антонова, Д. П. Дубініна, А. Г. Виноградова, С. А. Виноградова, F. Pancawardani, V. Rodriguez, V. D. Zakhmatova, A. N. Semka, B. McDowella, Y. Zhou. Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень наведених авторів, щодо процесу створення дрібнодисперсного водяного струменя не дозволяють провести аналіз ефективності застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії із значною відмінністю як тактико-технічних показників, так і параметрів

роботи. При цьому, наявні математичні моделі не дозволяють досліджувати процес подрібнення ударною хвилею рідини у стволі установки за рахунок детонації, що поширюється у стволі установки, а отримані експериментальні результати згаданих науковців не можуть бути використані для оцінки ефективності застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

Таким чином, науково-технічне обґрунтування, щодо удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії є актуальною науково-прикладною задачею, що потребує вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження проводилося в рамках науково-дослідної роботи «Дослідження засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою, що застосовують у будівлях» (№ державної реєстрації 0121U000006), в якій автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності гасіння пожеж за рахунок удосконалення техніки подрібнення води шляхом застосування газодетонаційної технології.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- виявити напрями удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем на підставі аналізу специфіки застосування дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожежі;
- розробити математичні моделі та провести математичне моделювання процесів нагнітання води у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з подальшим подрібненням води ударною хвилею та заповненням модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем;
- обґрунтувати техніку та провести дослідження імпульсної системи гасіння пожежі з метання газодетонаційним зарядом;
- обґрунтувати техніку та здійснити дослідження системи

пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем на основі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії;

– здійснити оцінювання ефективності застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та розробити рекомендації щодо її практичного застосування.

Об’єкт дослідження – процес формування дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж на основі газодетонаційної технології подрібнення води періодично-імпульсної дії.

Предмет дослідження – фізичні та технологічні особливості формування дрібнодисперсного водяного струменя при використанні газодетонаційної технології подрібнення води установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

Методи досліджень. У роботі використано комплексний метод досліджень, що включає аналіз та доцільність застосування способів, методів, технічних засобів та технологій пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями; застосовувалось математичне моделювання процесу подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсними водяними струменями; математичне моделювання здійснювалось тиско-базисним методом за допомогою програмного середовища; використовуючи метод уловлювання крапель води, проведено дослідження, щодо встановлення діаметру крапель води (дисперсності); метод Ейлера-Лагранжа дозволив визначити об’ємний склад газового середовища при подаванні дрібнодисперсного водяного струменя у модельне приміщення; результати чисельних досліджень оброблялися з використанням програмного середовища, а при обробці результатів експериментальних досліджень застосовувалися статистичні методи.

Наукова новизна дисертації полягає у вирішенні актуального науково-технічного завдання щодо підвищення ефективності гасіння пожеж шляхом наукового обґрунтування можливості та способу і засобів подрібнення

вогнегасної речовини ударними хвилями високошвидкісного газового потоку.

При цьому *уперше*:

- виявлено особливості заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем при розмірі крапель 5 мкм з визначенням швидкості поширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні;

- на основі теоретичних розрахунків виявлено, що основний процес подрібнення води відбувається не під дією ударної хвилі, а під дією високошвидкісного газового потоку що рухається за ударною хвилею.

Удосконалено:

- метод формування дрібнодисперсного водяного струменя за рахунок безперервного подавання води у ствол та періодичної дії на цівки води у стволі інтенсивними ударними хвилями з періодичністю 23 Гц та вище з виявленням ефективного розпилення води, що розтікається вздовж стінок ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії;

- методи подачі вогнегасних речовин в осередок пожежі за рахунок створення дрібнодисперсного водяного струменя через трубопроводи складної конфігурації та встановлено відсоток води, що конденсується у трубопроводі.

Набула подальшого розвитку техніка пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок газодетонаційного принципу прискорення рідини, яка дозволяє багаторазово скоротити витрату заряду для прискорення вогнегасної речовини.

Практичне значення отриманих результатів.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили обґрунтувати застосування газодетонаційної технології пожежогасіння для формування дрібнодисперсного водяного струменя, що дозволяє ефективно здійснювати локалізацію та ліквідацію пожежі. Застосування розробленої математичної моделі та проведеного на її основі математичного моделювання дозволяє вирішувати задачі, щодо врахування процесів нагнітання води до

ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з подальшим її подрібненням ударною хвилею та при заповненні модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем при розмірі крапель 5 мкм.

Матеріали проведеного дисертаційного дослідження впроваджено в діяльність ГУ ДСНС України у Харківській та Сумській областях.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені у дисертації, особисто отримані автором на основі експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок використання установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Автор особисто брав участь у підготовці та проведенні всіх експериментальних досліджень. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто та наведені в роботах, що представлені в додатку А.

При проведенні дисертаційних досліджень здобувачем в роботі [A1] особисто здійснено визначення складу газового середовища при пожежі під час проведення експериментального дослідження. В роботі [A2] здобувач особисто здійснив оцінку отриманих результатів експериментального дослідження при застосуванні компресійно-детонаційної технології під час захисту будівельних матеріалів при пожежі. В роботах [A3, A25] здобувачу особисто належить розробка рівнянь математичної моделі та результати математичного моделювання процесу подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. В роботах [A4, A12] здобувач особисто провів дослідження, щодо удосконалення характеристик імпульсних установок пожежогасіння за рахунок установок пожежогасіння за газодетонаційним принципом прискорення рідини з послідовним обґрунтуванням. В роботі [A5] здобувач особисто здійснив підготовку та проведення експериментального дослідження методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем у тунелі складної конфігурації, при цьому визначив вогнегасну здатність методу гасіння за охолоджувальним ефектом та ефектом зменшення концентрації кисню. В роботах [A6, A14, A17, A22] здобувач

особисто здійснив проведення експериментального дослідження дрібнодисперсного водяного струменя, що створюється установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії, при цьому визначив довжину та висоту розповсюдження струменя, витрату води з установки при її формуванні, а також осідання крапель води на земну поверхню. В роботі [A7, A13] здобувач особисто здійснив проведення експериментального дослідження подачі дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації за допомогою установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, при цьому визначив час затримки та витрати води, що конденсувалася у трубопроводі. В роботі [A8] здобувач здійснив оцінювання небезпеки при виникненні пожежі в житловому будинку в залежності від умов її розвитку. В роботі [A9] здобувач особисто здійснив оцінку будівельного матеріалу конструкції будівлі при розвитку внутрішньої пожежі. В роботі [A10] здобувач здійснив особисто проведення математичного моделювання процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. В роботі [A11] здобувачу особисто належить конструкція розбірної проміжної ємності для зберігання рідини, як додаткової ємності для установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. В роботі [A15] здобувачем особисто проведено аналіз технічних засобів із застосування дрібнодисперсних водяних струменів. В роботі [A19] здобувачем особисто проведено аналіз розвитку гасіння пожеж дрібнодисперсними струменями води. В роботі [A21] здобувач особисто здійснив розрахунок показників ефективності використання дрібнодисперсних водяних струменів під час гасіння пожеж. В роботах [A26, A27] здобувачем особисто проведено аналіз показників ефективності використання дрібнодисперсних струменів під час гасіння пожеж та визначення умов для припинення горіння. В роботах [A28, A29] здобувачем особисто проведено аналіз та визначено сферу застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, в тому числі в умовах ведення бойових дій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: 21 Всеукраїнській науково-практичній

конференції (за міжнародною участю) «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 2019); Регіональній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, 2020); X Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of Emergency Situations» (м. Харків, 2020, 2021, 2023); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, 2020, 2021, 2022, 2023); XII Міжнародній науково-методичній конференції та 144 Міжнародній науковій конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS) «Безпека людини у сучасних умовах» (м. Харків, 2020); Круглому столі «Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС» (м. Харків, 2021); II International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference «Sectoral research XXI: characteristics and features» (Chicago, USA, 2021); Internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz «Multidisziplinäre forschung: perspektiven, probleme und muster» (Wien-Vinnytsia, Republik Österreich-Ukraine, 2021); Круглому столі (вебінарі) «Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація» (м. Харків, 2022); круглому столі «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (м. Харків, 2023).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 10 наукових статтях у фахових виданнях (3 входять в наукометричну базу Scopus), 18 тезах доповідей на конференціях; отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота загальним обсягом 173 сторінки складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень та скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань і 2-х додатків, містить 91 рисунок та 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СПЕЦИФІКИ ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ

1.1 Аналіз фізико-хімічних властивостей води, як вогнегасної речовини

До вогнегасних речовин охолоджуючої дії відносяться речовини, що добре поглинають тепло: вода, вуглекислота в твердому стані та у стані аерозолі, різні водні розчини солей та змочувачів [1]. Вода є найбільш поширеною вогнегасною речовиною [1, 2]. Вода має високу питому теплоємність і значну приховану теплоту пароутворення, є хімічно інертною до більшості речовин і матеріалів, дешева, екологічна та доступна [3, 4]. Воду використовують як у чистому вигляді, так і з різними добавками, утворюючи суцільний (компактний), розпилений (із середнім діаметром крапель понад 100 мкм) або дрібнодисперсний струмінь (із середнім діаметром крапель до 100 мкм) [1, 5, 6].

Воду використовують для гасіння більшості твердих горючих речовин і матеріалів, а також для створення водяних завіс з метою охолодження об'єктів, технологічного обладнання та установок, розташованих поблизу осередку горіння. Крім того, розпилені та дрібнодисперсні водяні струмені ефективно застосовуються при ліквідації загорянь легкозаймистих і горючих рідин [7, 8]. За звичайних умов вода характеризується високою теплоємністю (4,19 кДж/кг·К) [9] та відзначається ефективними охолоджувальними властивостями [10, 11]. У процесі гасіння пожежі вода випаровується при взаємодії з розігрітими речовинами, матеріалами та конструкціями, при цьому з одного літра води утворюється до 1725 л пари [2, 12]. Це насамперед, сприяє розбавленню газового середовища в зоні горіння [1, 13]. Завдяки високій питомій теплоті пароутворення (2,3 МДж/кг), вода інтенсивно поглинає тепло з осередку горіння, що забезпечує суттєвий охолоджувальний ефект [1]. Низька теплопровідність води допомагає утворити на поверхні горючого матеріалу ефективний

теплоізоляційний шар, а її висока термічна стійкість забезпечує безпечне гасіння більшості твердих матеріалів, які горять при температурах до 1300 °С, тоді як розкладання води на водень і кисень починається лише при температурі понад 1700 °С [2, 13]. Завдяки здатності розчиняти певні рідини, такі як спирт, ацетон, альдегіди та органічні кислоти, вода може знижувати їх концентрацію до рівня, при якому горіння припиняється [14]. Крім того, вона розчиняє деякі гази та поглинає аерозолі, що зменшує густину та концентрацію продуктів згоряння, створюючи більш сприятливі умови для проведення оперативних дій [1, 15].

Фізико-хімічні властивості води, що мають значення для гасіння пожеж, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Фізико-хімічні властивості води [15, 16]

Параметр	Значення
Теплоємність, кДж/кг·К	4,19
Теплоту пароутворення, МДж/кг	2,3
Температура випаровування за н.у., К	373
Температура замерзання за н.у., К	273
Молярна маса, г/моль	18
<i>Примітка: н.у. – нормальні умови</i>	

Проте вода як вогнегасна речовина має певні недоліки. Зокрема, вона характеризується високим поверхневим натягом, що призводить до недостатньої змочувальної здатності стосовно неполярних горючих матеріалів. Крім того, низька кінематична в'язкість спричиняє швидке стікання води з поверхонь, що горять. Через це лише близько 3–5% поданої води фактично використовується для гасіння, а решта витрачається марно, що може спричинити пошкодження будівель, майна та обладнання [17, 18]. Електропровідність води з домішками потребує особливого підходу при гасінні пожеж у електроустановках, які перебувають під напругою [19]. Крім того, здатність води реагувати з певними

речовинами та матеріалами вимагає врахування можливих наслідків таких реакцій [20, 21].

1.2 Способи застосування води під час гасіння пожеж

Суцільні або компактні водяні струмені являють собою безперервний потік із високою швидкістю та відносно невеликим перерізом. Вони відзначаються значною ударною силою і великою дальністю польоту, при цьому великі об'єми води впливають на невелику площу [1]. Компактний струмінь, проходячи через зону горіння, практично не впливає на неї і сам майже не зазнає впливу полум'я, оскільки має невелику площу контакту з вогнем і короткий час взаємодії [2].

Суцільні (компактні) водяні струмені води застосовують для гасіння великих пожеж, коли потрібно подавати воду на значну відстань або забезпечити високу ударну силу. Наприклад, їх використовують при ліквідації пожеж великої площі, коли через інтенсивний тепловий вплив неможливо близько піднести обладнання для подачі води до осередку горіння. Також суцільні струмені застосовують для охолодження з великої відстані сусідніх будівельних конструкцій, резервуарів та інших об'єктів. Висока ударна сила суцільних (компактних) водяних струменів ефективна при гасінні великих штабелів деревини, завдяки сильному тиску вода проникає всередину штабеля, де відбувається горіння. Під час гасіння газових фонтанів суцільні струмені "підіймають" нижню кромку факела полум'я [1, 17]. Цей метод гасіння та охолодження є найбільш простим і широко застосовуваним. Однак одним із недоліків є нерівномірне зрошення зони пожежі, через що далеко не вся вода, особливо та, що стікає нижче рівня осередку горіння, впливає на процес гасіння пожежі. Зокрема, з загального об'єму води, поданої суцільними (компактними) водяними струменями, для гасіння використовується лише 6–10 %, а в окремих випадках не більше 1%. Це пов'язано з низьким коефіцієнтом теплопровідності води: проходячи через факел полум'я, великі краплі майже не встигають нагрітися і поглинути тепло, тому вони швидко падають вниз [1, 18].

Під час гасіння пожеж водою у більшості випадків не використовуються її унікальні фізичні властивості через низку причин. Незважаючи на широке застосування води для пожежогасіння, її коефіцієнт використання залишається досить низьким, що давно стимулює фахівців шукати методи підвищення ефективності води як вогнегасної речовини [1, 2]. Найвищий ефект гасіння пожеж досягається тоді, коли охолоджувальна дія води є максимальною, тобто коли вся подана в осередок горіння вода випаровується за рахунок відбору тепла безпосередньо від факела полум'я. Тому для ефективного припинення горіння важливо, щоб якомога більша частина води випаровувалась саме в зоні осередку горіння, а не поза його межами. Недосконалість обладнання для подачі та розпилення води значною мірою знижує її ефективність [22, 23].

Максимальний вогнегасний ефект досягається при подачі води в розпиленому стані, оскільки це значно збільшує площу одночасного рівномірного охолодження. Вода швидко нагрівається і переходить у парову фазу, поглинаючи велику кількість теплоти [1, 2]. Щоб уникнути зайвих втрат, розпилена вода застосовується при відносно низькій висоті полум'я, коли можна подавати струмінь безпосередньо крізь факел на нагріту поверхню (наприклад, при горінні обшивки перекриттів, стін, перегородок, решетування дахів, волокнистих матеріалів, пилу, нафтопродуктів тощо) [1, 24]. Розпилені водяні струмені також використовують для зниження температури в приміщеннях, захисту від теплового випромінювання (водяні завіси), охолодження нагрітих поверхонь будівельних конструкцій і обладнання, а також для осадження диму [25, 26].

Розпилені водяні струмені мають порівняно невелику ударну силу та обмежену дальність дії, проте забезпечують широке покриття поверхні. Їх використання створює найсприятливіші умови для інтенсивного випаровування води, що посилює охолоджувальний ефект і сприяє розбавленню горючого середовища водяною парою [1, 2]. Встановлено, що за однакової інтенсивності подачі води, сумарний коефіцієнт тепловіддачі при охолодженні металевих конструкцій розпиленими струменями у 2–3 рази вищий, ніж при застосуванні

компактного струменя [1, 2]. Це зумовлено розширенням сумарної площі поверхні водяних крапель, через яку ефективніше відводиться тепло. Основний механізм гасіння розпиленою водою полягає в охолодженні горючої речовини та розведенні її парів водяною парою [1, 27].

Ефективність води як вогнегасної речовини визначається низкою чинників, серед яких ключову роль відіграють розмір водяних крапель (дисперсність) і вплив хімічних домішок. Відповідно, існують два основні підходи до підвищення її вогнегасної дії: 1) фізичний – зміна дисперсності й температури води, що подається для гасіння пожежі; 2) хімічний – застосування для цілей пожежогасіння водних розчинів різних хімічних сполук.

Проблематика розпилення рідин постійно перебуває в центрі уваги [28, 29], що обумовлено широким використанням технічних засобів [30, 31] та технологій розпилення [32, 33] у промисловості, енергетиці та інших технічних галузях. На сьогодні існує велика кількість способів та методів розпилення, які класифікують залежно від джерела енергії, що використовується для подрібнення потоку рідини [34]. Основними способами розпилення рідин є гідравлічний, механічний, пневматичний, пульсаційний, ультразвуковий, електричний, акустичний та комбінований [35, 36]. Кожен метод має свої особливості, але з практичної точки зору найбільший інтерес становлять гідравлічний, механічний, пневматичний і пульсаційний способи розпилення рідин (рис. 1.1) [15, 35].

Для підвищення вогнегасної ефективності води необхідно вдосконалювати методи та засоби її розпилення, які б забезпечували утворення крапель з питомою поверхнею, максимальною для одиниці маси, та з розмірами їх діаметра близько 10–50 мкм. В пожежно-рятувальних автомобілях найбільшого поширення набув гідравлічний спосіб розпилення води. Він є найпростішим у реалізації та найбільш енергоефективним, оскільки потребує лише 2–4 кВт енергії для диспергування 1 т рідини [37, 38]



Рис. 1.1. Класифікація способів розпилення води [15, 35]

При гідравлічному способі розпилення основним джерелом енергії, що забезпечує руйнування суцільного потоку рідини на краплі, є тиск нагнітання. Під час проходження через розпилювальний пристрій потік рідини, по-перше, прискорюється до значних швидкостей, а по-друге, набуває форми, що сприяє ефективному диспергуванню у вигляді струменя, плівки або великих фрагментів (залежно від конструктивного типу розпилювального елемента) [37, 38]. Однак такий спосіб забезпечує утворення порівняно грубого та нерівномірного аерозолі (з дисперсністю крапель близько 300 мкм). Крім того, для гідравлічного розпилення характерні труднощі в регулюванні витрати рідини при збереженні заданої якості дисперсності, а також обмежена ефективність при розпиленні рідин з підвищеною в'язкістю [15, 36].

При механічному способі розпилення рідина отримує енергію завдяки тертю об поверхню робочого елемента, який обертається з високою швидкістю. Вода, набуваючи руху обертання разом із робочим елементом, під дією відцентрової сили відривається від розпилювача у вигляді струменів і дробиться на краплини. Для цього переважно застосовують спеціальні форсунки, встановлені на стволах: дефлекторні, щілинні, гвинтові, відцентрові та

розпилювачі зіткнення струменів. Найбільше поширення отримали гвинтові та відцентрові (турбінні) розпилювачі, які забезпечують дрібнодисперсний водяний струмінь із розміром крапель 100–200 мкм [15, 36]. Основним недоліком цих розпилювачів є обмежена дальність польоту струменя, що не перевищує 7–8 м. Низька далекобійність зумовлена розпиленням рідини безпосередньо біля вихідних соплових перетинів. Навіть при високій швидкості витікання крапель вони швидко сповільнюються, долаючи невеликі відстані [36, 39].

До переваг механічного способу розпилення належать можливість обробки високов'язких і забруднених рідин, а також регулювання продуктивності розпилювача без суттєвих змін дисперсності крапель. Водночас до недоліків цього методу відносять високу вартість розпилювачів, складність їх виготовлення та експлуатації, а також високу енергоємність близько 15 кВт на диспергування 1 т рідини [40]. Продуктивність обмежується геометричними розмірами диска і швидкістю його обертання. Крім того, механічні розпилювачі формують широкий факел розпилу, що ускладнює досягнення необхідної інтенсивності зрошення. Цей спосіб застосовують переважно для подрібнення в'язких рідин та суспензій [36, 41].

При пневматичному способі розпиленні [15, 36] енергія підводиться до рідини переважно за рахунок динамічної взаємодії її з високошвидкісним потоком розпилювального агента, а саме стиснутого газу (зазвичай повітря). Завдяки великій відносній швидкості потоків у розпилювачі або за його межами рідина спочатку розпадається на тонкі нитки, які потім дробляться на краплі. Окрім дії надлишкового тиску, у соплі розпилювача відбувається турбулізація потоку повітря, що забезпечує високий ступінь дисперсності води та значний радіус дії струменя завдяки імпульсу, внесеному газом [36, 42]. Дисперсність крапель води при пневматичному способі розпилення лежить в межах 50–200 мкм [36, 43]. До переваг пневматичного способу належать: незначна залежність якості розпилення від витрати рідини (на відміну від гідравлічного способу, де ця залежність суттєва), висока надійність в експлуатації, можливість досягти дуже високої дисперсності крапель з медіанним діаметром у кілька

мікронів, а також формування необхідного факела розпилу. Крім того, пневматичний спосіб дозволяє розпилювати високов'язкі рідини. Однак основним недоліком є необхідність використання розпилювального агента та додаткового обладнання для його подачі (компресорів і газової апаратури), велика витрата газу для розпилення, а також підвищене енергоспоживання, що складає 50-60 кВт на 1 т. рідини [40]. Це суттєво підвищує вартість цього способу диспергування [39, 42].

При пульсаційному способі розпилення [15, 36] дроблення струменя рідини відбувається за рахунок пульсацій тиску та змін витрати. Ці пульсації викликають додаткові коливання рідини, що призводить до збільшення поверхневої енергії струменя, швидкої втрати його стійкості та, як наслідок, до більш дрібнодисперсного розпилення [39, 42].

Робота більшості конструкцій стволів-розпилювачів цього типу заснована на періодичному повному перекритті проточних ліній, унаслідок чого відбувається підвищення тиску перед форсункою та витікання рідини певними порціями [43]. Також застосовуються конструкції, у яких пульсації тиску накладаються на основний потік рідини. У таких випадках ефективність розпилення визначається співвідношенням між статичним тиском основного потоку та амплітудою накладених пульсацій [15, 36].

Пульсуюче витікання рідини з подальшим дрібнодисперсним розпилом може також забезпечуватись установками циклічної дії, в яких струмінь формується за рахунок витіснення рідини попередньо стиснутим газом. Стиснення газу в робочій ємності таких установок, як правило, здійснюється або шляхом впорскування в пневмогідроаккумулятор горючих сумішей з подальшим їх запаленням, або шляхом прямого введення до нього стиснутого повітря чи продуктів згоряння порошу [15, 36].

При цьому в пневмогідроаккумуляторі створюється тиск порядку 3–5 МПа, під дією якого і відбувається подача рідинного струменя. Перевагою таких конструкцій є можливість подачі струменів на відносно великі відстані (до 100 м) при високій якості розпилу [40]. Водночас, ці системи мають низку

суттєвих недоліків: зміна параметрів витікання у міру зниження тиску в пневмогідроаккумуляторі; значне відношення часу його заповнення до часу витікання; конструктивна складність; а також потреба в наявності джерела стисненого повітря або палива для забезпечення роботи установок [39, 42]. Відмінною особливістю цього способу є накладення пульсацій тиску або витрати (частіше – одночасно обох) на потік рідини, що розпилюється. Виникаючі при цьому додаткові коливання струменя сприяють збільшенню поверхневої енергії, швидкій втраті стійкості потоку та, як наслідок, більш тонкому диспергуванню [36, 44].

Пульсаційне розпилення може бути інтегроване з будь-яким із розглянутих вище способів. У таких випадках до переваг основного способу додається підвищення якості та однорідності дроблення водяного струменя. При цьому в низці ситуацій досягається покращення характеристик розпилю без зростання енерговитрат і за умов лише незначного ускладнення конструкції розпилювальних пристроїв [40].

Акустичне розпилення [15, 44] має багато спільного з пневматичним способом, оскільки також передбачає передачу енергії рідині через взаємодію з газовим потоком. Водночас, на відміну від пневматичного способу, у цьому випадку газу надаються коливання ультразвукової частоти, що, за інших рівних умов, сприяє більш тонкому та рівномірному дробленню рідини. Такий метод є економнішим і більш перспективним порівняно з пневматичним, хоча конструкція акустичних розпилювачів є складнішою. Застосування акустичного методу дозволяє формувати дрібнодисперсний водяний струмінь із високим ступенем монодисперсності. Зазвичай для цього використовуються коливання в ультразвуковому діапазоні. Акустична енергія подається до межі поділу газу і рідини, причому це може здійснюватися як з боку рідини, так і з боку газу [39, 42]. Розпилення рідини у фонтанному режимі відбувається завдяки впровадженню в рідину ультразвукових коливань високої частоти (1-3 МГц). Необхідна інтенсивність цих коливань досягається за допомогою акустичних фокуруючих систем, які спрямовують ультразвукову енергію в точку поблизу

межі розділу рідини та газу [40]. Як фокубуючі елементи застосовують п'єзоелектричні пристрої напівсферичної форми або акустичні лінзи збирального типу, під якими розміщують плоскі п'єзокерамічні елементи [42, 44].

Внаслідок інтенсивних кавітаційних процесів у зоні фокусування з рідинного об'єму вириваються струмені та великі краплі, на поверхні яких формуються стоячі капілярні хвилі [42, 44]. У момент втрати стійкості з гребенів цих хвиль відриваються майже монодисперсні дрібні краплі, що формують аерозоль. Великі краплі, які не встигли повністю диспергуватися, повертаються назад у рідинний об'єм за допомогою спеціальної системи відбивачів. Отримана дисперсність крапель при цьому перебуває в межах 0,5–5 мкм [39, 41]. Сформований аерозольний факел не піддається керованому формуванню, оскільки легкі за масою краплі легко відхиляються навіть при незначному русі повітря. Регулювання продуктивності процесу у цьому випадку практично неможливе.

При розпиленні рідини в тонкому шарі ультразвукові коливання вводяться безпосередньо в цей шар, що спричиняє утворення кавітаційно-хвильового механізму диспергування [40]. Реалізація даного способу розпилення здійснюється із використанням спеціалізованих ультразвукових диспергаторів. У них завдяки застосуванню трансформаторів коливальної швидкості досягається необхідна амплітуда коливань, яка забезпечує руйнування капілярних хвиль на поверхні рідини [42, 44]. При цьому способі розпилення утворюється аерозоль із дисперсністю в межах 5–20 мкм, що дає змогу формувати необхідну геометрію аерозольного факела за рахунок конфігурації поверхні розпилення. Кавітаційний механізм утворення аерозолі в ультразвукових диспергаторах сприяє автоматичному очищенню каналів подачі рідини, що знижує вимоги до її попередньої фільтрації [40]. Цей спосіб є одним із найпоширеніших у мехатронних системах завдяки низькому енергоспоживанню, малій інерційності та широким можливостям електронного регулювання продуктивності [42, 44].

Електростатичне розпилення [39, 44] передбачає надання рідині електростатичного заряду до або в момент її витікання. Під впливом кулонівських сил струмінь рідини чи плівка розпадається на краплі такого розміру, при якому сили електростатичного відштовхування урівноважуються силами поверхневого натягу. Існує також інший підхід, за якого рідина подається в зону інтенсивного електростатичного поля. Внаслідок дії поля на поверхні рідини змінюється розподіл тиску, що призводить до деформації струменя і його розпаду на краплі [40]. Основними недоліками електростатичного розпилення є висока вартість обладнання, значне енергоспоживання, низька продуктивність і складність технічного обслуговування. Попри це, спосіб знаходить застосування в окремих типах розпилювальних сушарок, а також у технологіях фарбування з використанням розпилення [42, 44].

При ультразвуковому розпиленні [39, 40] рідина подається на поверхню п'єзоелектричного або магнетострикційного генератора, який здійснює коливання на ультразвуковій частоті. У результаті цих коливань рідина відривається з поверхні у вигляді дрібнодисперсних крапель. Основними недоліками п'єзоелектричних і магнетострикційних розпилювачів є їхня низька продуктивність у межах 0,5-6 кг/год та потреба у складному й дороговартісному обладнанні [42, 44].

Спосіб розпилення з попереднім газонасиченням передбачає насичення рідини газом перед її подачею в розпилювальний пристрій або безпосередньо в його робочій камері. Газ, що розподіляється в рідині у формі бульбашок, стискається до рівня тиску рідини та частково в ній розчиняється. У результаті цього зростає поверхнева енергія потоку [40]. Підвищення енергії, а також швидке розширення бульбашок і десорбція газу при виході рідини з розпилювача спричиняють її інтенсивне дроблення на дрібні краплі, які є меншими за розміром порівняно з тими, що утворюються під час звичайного гідравлічного розпилення [39, 44].

Спосіб електрогідравлічного розпилення [42, 44] здійснюється шляхом передачі потоку рідини додаткової енергії за допомогою високовольтного

електричного розряду, що виникає під час пробою рідини в камері розпилювача. У результаті розряду формується плазмовий шнур, у якому температура миттєво зростає до кількох тисяч градусів, а тиск до кількох тисяч атмосфер. Це спричиняє викид високошвидкісного потоку крапель, які, переміщуючись із великою швидкістю, встигають наздоганяти та додатково подрібнювати частинки, що вийшли з розпилювача між імпульсами [40]. Окрім того, супутні розряду фізичні явища, зокрема ударна хвиля, тривають протягом усього інтервалу між імпульсами й продовжують процес диспергування рідини, яка залишає розпилювач у цей період [39, 44].

Застосування комбінованого способу розпилення [15, 44] передбачає поєднання декількох із наведених вище способів, що дозволяє досягати таких характеристик диспергування, які недосяжні при використанні кожного способу окремо. Наприклад, комбінація пневматичного та гідравлічного способів (пневмо-гідравлічне розпилення) дає змогу отримувати аерозоль з дисперсними властивостями, аналогічними тим, що досягаються при пневматичному розпиленні, але при суттєво нижчих енергетичних витратах [40]. Залежно від специфіки виробничого процесу, вимог до якості аерозолю та необхідного рівня дисперсності, будь-який із зазначених способів розпилення може виявитися найекономічнішим [15, 44].

1.3 Технічні засоби гасіння пожежі водяним струменем

На сьогодні існує велика кількість пожежних стволів для подачі вогнегасної речовини безпосередньо в осередок пожежі. Пожежні стволи призначені для формування та спрямування струменя вогнегасної речовини під час гасіння пожеж [1, 45]. Вони класифікуються за видом вогнегасної речовини – на водяні, порошкові та повітряно-пінні, а також за пропускною здатністю і розмірами – на ручні та лафетні (рис. 1.2) [1, 46].



Рис. 1.2. Класифікація пожежних стволів [1, 46]

За типом струменя, що одержується на виході, можна виділити стволи, що дозволяють отримати суцільний або розпилений струмінь, водяну захисну завісу або їх комбінації [47]. Велика різноманітність пожежних стволів пояснюється необхідністю підвищення ефективності пожежогасіння. При цьому необхідно, щоб вогнегасна речовина була недорогою, екологічно нешкідливою і ефективною [1].

На рисунку 1.3 наведено загальний вигляд найпоширеніших переносних пожежних стволів у підрозділах ОРС ЦЗ ДСНС [1, 48].

Для створення захисних водяних завіс під час оперативних дій особовим складом пожежно-рятувальних підрозділів [49] на технологічних об'єктах хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної галузей, а також на деяких інших підприємствах використовують турбінні та щілинні розпилювачі типів НРТ-5, НРТ-10, НРТ-20, РВ-12, а також пожежні стволи Protec 366. Тактичні можливості водяних стволів визначаються їхніми тактико-технічними характеристиками, робочими параметрами, витратами та інтенсивністю подачі води [1, 45].

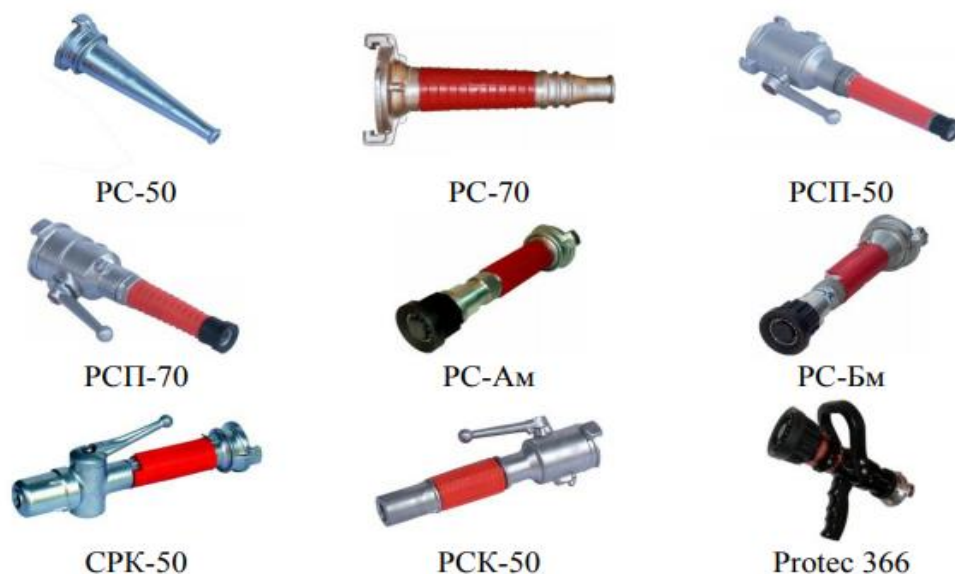


Рис. 1.3. Переносні пожежні стволи [1, 48]

Попри широке та ефективне використання стволів «А» і «Б» у практиці пожежогасіння, вони мають низку недоліків, що ускладнюють зручність та оперативність роботи пожежних підрозділів. Основною проблемою ручних стволів РС-70 (50), РСК-50 та подібних є відсутність ручки для утримання, що суттєво знижує маневреність оператора та точність подачі струменя в осередок пожежі. Крім того, до недоліків можна віднести неможливість швидкого перекриття води у стволах типу «А» та недостатньо якісне формування розпиленого струменя у стволах «Б». Всі ці недоліки повністю усунені в сучасних моделях пожежних стволів [1, 45]. Сучасні стволи поєднують у собі переваги стволів РС і РСК та за низкою параметрів значно їх перевершують [1, 45]. Одним із таких сучасних приладів є пожежний ствол Protec [48] або його аналоги (TFT [50], Handline [51], Rosenbauer [52]), які за тактико-технічними характеристиками та конструкцією практично ідентичні світовим і вітчизняним зразкам. Відмінною рисою цих стволів є можливість швидко та легко змінювати витрату води в діапазоні від 2,5 л/с до 13–15 л/с одним рухом руки, при цьому дальність подачі струменя зберігається на рівні 20–30 м [1, 48].

У конструкції таких стволів передбачена можливість подачі розпиленого струменя води з регульованим діаметром крапель під різними кутами нахилу від

30° до 180°, а також одночасно з подачею компактного струменя води [53, 54]. Різні модифікації та комплектації сучасних стволів, згаданих вище, можуть оснащуватися змінними насадками для подачі піни як низької, так і середньої кратності, а також повітряно-механічної піни за технологією CAFS [1, 55]. Основним недоліком цих пожежних стволів є складність обслуговування і ремонту, оскільки вони складаються з великої кількості дрібних деталей, які у разі пошкодження необхідно замінювати [1, 56]. Відповідно, ціна таких пристроїв варіюється залежно від виробника і комплектації в межах від 200 до 500 доларів. Проте, незважаючи на вартість, ручний пожежний ствол Protek або його аналоги мають певні переваги [1, 48].

Можна зазначити, що ефективною вогнегасною речовиною є дрібнодисперсний водяний струмінь [57, 58]. ДДВС може ефективно застосовуватися як засіб об'ємного пожежогасіння у приміщеннях [59, 60] так і під час гасіння легкозаймистих і горючих [61, 62] та інших небезпечних речовин [63]. Крім того, дрібнодисперсний водяний струмінь забезпечує осадження диму [64, 65] та токсичних газів [66], знижуючи їх концентрацію в повітрі, що покращує умови евакуації та роботу пожежних-рятувальників [67, 68]. При розвитку внутрішньої пожежі відбувається вплив температури та вогню на будівельний матеріал конструкції будівлі [69] у зв'язку з чим відбувається захист будівельного матеріалу із застосуванням газодетонаційної технології шляхом покриття його захисним шаром [70]. Окрім цього застосування ДДВС також дозволяє зменшувати теплове навантаження на будівельні конструкції, попереджаючи їх передчасне руйнування, та обмежити поширення вогню за межі осередку пожежі [2, 58].

1.4 Огляд розвитку технології пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем

Технологія гасіння пожеж дрібнодисперсним водяним струменем використовується понад 20 років [71, 72]. Ідея використання невеликих

крапельок води для боротьби з пожежами запропонована ще в 1880 р. Тоді американська компанія F.E. Myers розробила систему подачі крапель води для гасіння невеликих лісових пожеж, яка поміщалася в рюкзак. Однак цей винахід не знайшов широкого застосування. Тільки через десять років Гріннелл розробив насадку «*repper pot*» для боротьби з пожежами, використовуючи при цьому дрібні краплі води [72, 73].

До 1930 року вже було декілька компаній, які почали використовувати водяний туман. Серед них була німецька компанія Lechler [74], головним нововведенням якої була форсунка з декількома отворами, яку вони назвали соплом для водяного пилу. У 40-х роках інженерний підрозділ Factory Mutual почав проводити свої перші випробування щодо використання насадок з малими отворами. Незважаючи на ці перші зусилля, інтерес до ДДВС залишався незначним протягом наступних десятиліть. Лише наприкінці 1970-х двоє осіб, знову застосували ідею, яка полягала в тому, щоб: відкласти відро і взяти наперсток, повний води для гасіння пожежі. Імена цих людей є Kinster Giselsson and Mats Rosander, і в 1978 році вони опублікували книгу "Fundamentals of Fire". Вони вважали, що "в майбутньому рідина, наприклад, вода, що розпилюється на краплі менше, ніж зерна порошку, буде найефективнішими засобом гасіння пожежі в приміщенні, так званий – дрібнодисперсний водяний струмінь [71, 72].

Та лише в 90-х роках технологія застосування ДДВС для гасіння пожеж зробила значний стрибок у сфері пожежогасіння. В основному це було пов'язано з двома випадками. Перший – це виконання Монреальського протоколу про речовини, що руйнують озоновий шар, що вступив в силу з 1 січня 1989 року [75]. Внаслідок цього стало те, що галони (хладони), що широко використовувалися в системах протипожежного захисту, були заборонено. Другий випадок – пожежа, що сталася 7 квітня 1990 року на шведському поромі «Scandinavian Star» внаслідок, якої загинуло 159 осіб з 482 [76].

Незважаючи на ці перші зусилля, інтерес до ДДВС залишався низьким протягом наступних десятиліть. Вчені Європи та США проводили дослідженнями, але з комерційної точки зору технологія ДДВС спочатку не мала

великої зацікавленості оскільки не відповідала вимогам для стаціонарних установок, які тоді в основному використовували ручні засоби для боротьби з пожежами [73]. Відмовлення від галонів (хладонів), як вогнегасної речовини, стало важливим поштовхом для вивчення, проведення досліджень і розробки засобів застосування систем ДДВС. Заборона галону (хладону) створила прогалину, яку заповнила дрібнорозпилена вода або ДДВС. Пожежа на поромі «Scandinavian Star» призвела до вдосконалення вимог Міжнародної морської організації (International Maritime Organization, ІМО щодо пожежної безпеки та інструкцій щодо установки та експлуатації, а також щодо розробки процедур протипожежного випробування альтернативних спринклерних систем [77].

У Швеції за період з 1975 по 1990 роки вже було багато розробок щодо застосування ДДВС під високим тиском. Основними завданнями було захист готелів, пасажирів кабін та дослідження небезпеки горючих рідин. Таким чином після пожежі 20 червня 1990 року, ті, хто проводив дослідження в цьому напрямку, представили свої результати. Це було основою створення шведської компанії UltraFog. Після цього, вже через півроку інша компанія Marioff з Фінляндії також почала розробляти системи ДДВС високого тиску [71, 72].

Через вісім років, а саме 4 квітня 1998 року була заснована Міжнародна асоціація із застосування дрібнодисперсного водяного струменя (International Water Mist Association IWMA) [78]. Її намір був і досі є бути платформою для компаній, дослідницьких установ, інститутів, страхових компаній, організацій, що мають юрисдикцію, та осіб, які займаються технологією ДДВС.

Ідея дрібнодисперсного водяного струменя досить проста і заснована на трикутнику пожежі [1]. Відомо, що обов'язковим умовами протікання процесу горіння в приміщенні є горюча речовина, окисник та джерело запалювання [1, 2]. Ці три складові утворюють так званий трикутник горіння, що представлено на рисунку 1.4 [1, 2].



Рис. 1.4. Трикутник горіння [1, 17]

Компоненти трикутника вогню пов'язані між собою ланцюговою хімічною реакцією горіння, яка залежить від умов розвитку пожежі в будівлі [79]. Припинення горіння може бути досягнуто виключенням однієї з складових трикутника, або гальмуванням ланцюгової реакції горіння [1, 2]. Якщо відбувається пожежа, системи з ДДВС відводять тепло (джерело запалення) та кисень – тоді як традиційні спринклерні системи та технічні засоби пожежогасіння видаляють лише тепло [80]. При цьому саме розмір крапель є важливим [81, 82].

Широке застосування знайшли мобільні модульні установки пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем [83, 84]. Попит на обладнання ДДВС зростає з кожним роком і поступово починає перевищувати можливості існуючих виробників. Доступність води, екологічна чистота, безпека і висока вогнегасна ефективність в ДДВС – основна причина зростаючого на неї попиту в якості вогнегасної речовини.

1.5 Аналіз стану застосування засобів гасіння дрібнодисперсним водяним струменем в Україні

В Україні сучасні дослідження з метою розроблення та застосування технічних засобів пожежогасіння на основі тонкорозпилених водних вогнегасних речовин (ТРВВР) почали проводитись в рамках співробітництва УкрНДІПБ МНС України та ЗАТ «Інститут «Спецавтоматика», м. Луганськ [85, 86]. В результаті проведених науково-дослідних робіт були створені модулі

пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем, такі як МПГ ТВВР-0,05-1,6-00 та МПГ ТВВР-0,05-1,6-01, розроблено ряд рецептур водних вогнегасних речовин для застосування в якості заряду цих модулів та «Тимчасові рекомендації щодо проектування, монтування та експлуатації автоматичних систем комбінованого пожежогасіння модульного типу тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами (АСКПГМТРВВР) виробництва «ЗАТ «Інститут «Спецавтоматика» [87]. На ряді об'єктів громадського призначення в Україні реалізовано проекти протипожежного захисту із застосуванням систем пожежогасіння ДДВС на елементній базі світових лідерів індустрії ДДВС (Marioff Corporation [88], Kidde Deugra [89]. В Україні в [90] з 1 листопада 2019 року вступили в дію зміни щодо проектування систем протипожежного захисту. Зокрема, введено можливість при проектуванні систем протипожежного захисту передбачати сучасні системи пожежогасіння ДДВС, що може використовуватися при проектуванні систем протипожежного захисту в будівлях різного призначення – в житлових будинках, громадських закладах, соціальних об'єктах, таких як школи та дитячі садки тощо. Проектування, монтування та підтримання експлуатаційної придатності таких систем повинні здійснюватися згідно з вимогами ДСТУ CEN/TS 14972:2016 [91].

1.6 Технічні засоби пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем

Аналіз застосування сучасних технічних засобів розпилення рідин показує, що особливу увагу розробники приділяють проблемам підвищення якості й ефективності розпилення, а також підвищенню дисперсності. Упродовж тривалого часу в Європи та Америці для цих цілей пожежогасіння використовують насоси високого тиску виробництва компаній Fireco [92], Danfoss [93], Hi-Fog [94], Fogtec [95] та Aquasys Technik [96]. Удосконалення установок пожежогасіння відбувається шляхом підвищення тиску (до декількох сотень атмосфер) при порівняно невеликій витраті води (0,3-0,5 кг/с) [97]. До

технічних новинок такого типу відносяться пристрої пожежогасіння високого тиску HDL 250 німецької фірми MINIMAX [98], система КАМАТ GmbH [99]. Варто згадати і установки фірми IFEX [100], а також установку виробництва Україна "Тайфун 1-10" [15].

Так виробники компанії IFEX використовують різі імпульсні системи пожежогасіння такі, як насамперед мобільна версія IFEX 13 litre Backpack 3001/12 загальний об'єм води складає 13 л, а загальна маса приладу складає близько 25 кг (рис. 1.5) [97, 100].



Рис. 1.5. IFEX 13 litre Backpack 3001/12 [100]

Агрегат IFEX Fast Attack Unit 3072 загальний об'єм води складає 72 л, а загальна маса приладу складає близько 150 кг (рис. 1.6) [100].



Рис. 1.6. IFEX Fast Attack Unit 3072 [100]

Розглянемо продукцію Impulse Fire Extinguishing System, що встановлена на транспорті (рис. 1.7). Мотоцикл IFEX розроблено для великого руху міських

центрів з загальним об'єм води 50 л. Електромобіль IFEX з загальним об'єм води 50 л [100].



а



б

Рис. 1.7. IFEX: а – на мотоциклі; б – на електромобілі [100]

Квадроцикл IFEX розроблено для непрохідних районів і поганих доріг з загальним об'єм води 50 л (рис. 1.8) [100].



Рис. 1.8. IFEX на квадро циклі [100]

Загалом аналіз тенденцій розвитку техніки пожежогасіння дозволяє дійти висновку про перспективність використання мобільних установок пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем, особливо для боротьби з пожежами в житлових і адміністративних будівлях, де побічні збитки від пожежі часто перевищують прямі збитки.

1.7 Аналіз досліджень процесу розпилення води під дією ударної хвилі

Подрібнення води ударною хвилею відноситься до перспективних способів [101, 102]. У роботі [103] проведені експериментальні дослідження з вивчення взаємодії між горизонтальним шаром води та плоскою ударною хвилею, що проходить вздовж її поверхні. Дослідження проводилися в горизонтальній ударній трубці (Т200) з квадратним перетином ($200 \times 200 \text{ мм}^2$) та довжиною 8000 мм з висотою стовпа води 10, 20 і 30 мм. Застосовано спеціально обладнаний пристрій, що включає камеру високого тиску довжиною 1,5 м, до якої підключено камеру низького тиску довжиною 5,0 м та прозору експериментальну камеру довжиною 1,5 м. Довжина секції, заповненою водою, була 500 мм для експериментів, проведених з ударною хвилею з числом Маха 1,11. Для експериментів з більш інтенсивною ударною хвилею з числом Маха 1,43 використано коротшу секцію довжиною 130 мм. Схема проведення експериментальних досліджень представлена на рисунку 1.9 [103].

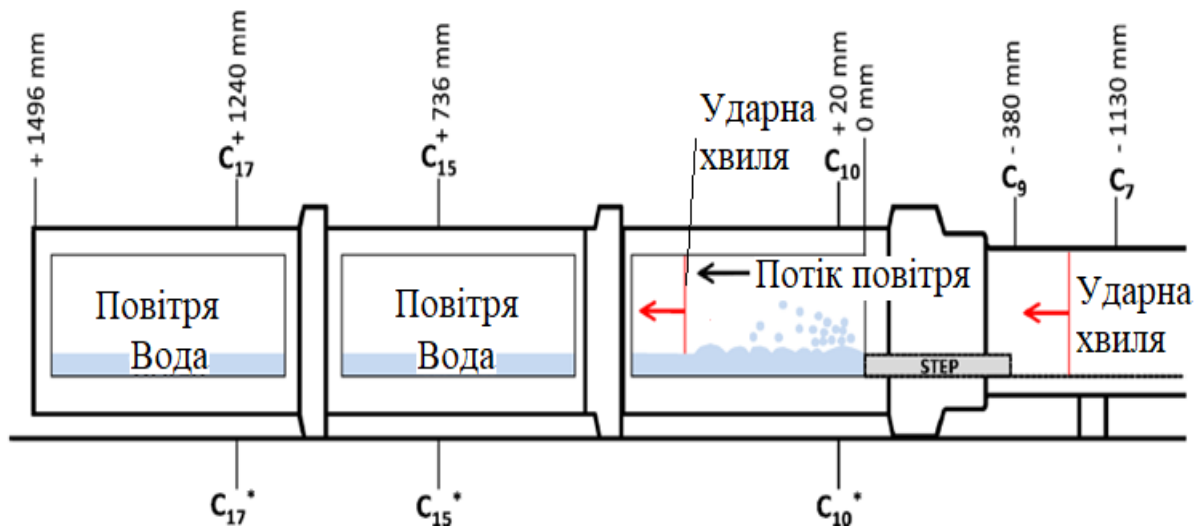


Рис. 1.9. Схема проведення експериментальних досліджень [103]

Результати проведених експериментальних досліджень [103] щодо подрібнення ударною хвилею води, представлені на рисунку 1.10.

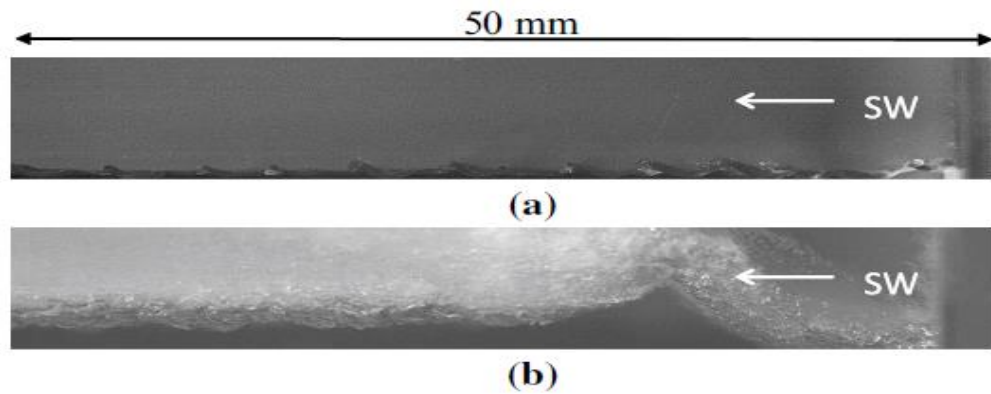


Рис. 1.10. Зображення, отримані з експериментів, проведених із шаром води глибиною 10 мм під впливом ударних хвиль з числами Маха 1,11 (а) та 1,43 (б): SW– представляє напрямок руху ударної хвилі [103]

Результати проведених досліджень [103] представлені в табл. 1.2 показують, що час t_i наявності надлишкового тиску у водяному шарі і затримка у часі між фронтом ударної хвилі у повітрі і фронтом хвилі стиснення у воді Δt_{exp} збільшуються зі збільшенням відстані, пройдені ударною хвилею уздовж розділу повітря-вода, і глибиною шару рідини, і зменшуються із збільшенням числа Маха ударної хвилі.

Таблиця 1.2.

Час t_i наявності надлишкового тиску у водяному шарі та експериментальний час затримки Δt_{exp} [103]

$M_{\text{SW}} = 1,11$ (мм)	$t_i(\mu\text{s})$	$\Delta t_{\text{exp}}(\mu\text{s})$
$e = 10$	86/96/127	28/31/38
$e = 20$	141/286/303	36/105/116
$e = 30$	321/338/336	84/131/164
$M_{\text{SW}} = 1,43$ (мм)	$t_i(\mu\text{s})$	$\Delta t_{\text{exp}}(\mu\text{s})$
$e = 10$	62/79/84	24/39/24
$e = 20$	111/196/156	21/90/97
$e = 30$	142/197/215	61/106/100

Примітка: Наведені дані для двох ударних хвиль з різними числами Маха ($M_{\text{sw}} = 1,11$ і $1,43$) і три глибини шару води ($e = 10, 20$ і 30 мм). Значення представлені для трьох місць розташування датчиків тиску.

Проведені експериментальні дослідження показали [103], що при ударній хвилі з числом Маха 1,11 на відображенні повітря-вода спостерігаються «бризки» з деякими макроскопічними крапельками води, при ударної хвилі з числом Маха 1,43 відбувається формування водяного туману з мікроскопічних крапель. Це свідчить про доцільність збільшення інтенсивності ударної хвилі для ефективного отримання водяного туману.

У роботі [104] представлені результати експериментальних досліджень, щодо подрібнення води за рахунок вибуху заряду, що знаходиться у ємності з водою. У дослідженнях об'єм ємностей складав від 600 до 1500 літрів. Схематичний вигляд вибухової системи для дисперсії води представлений на рисунку 1.11 [104].

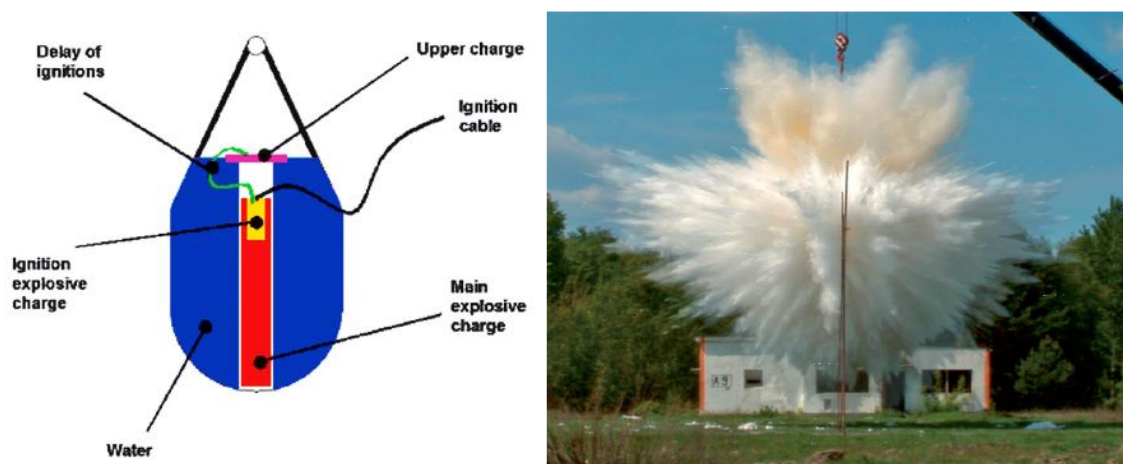


Рис. 1.11. Схематичний вигляд вибухової системи для дисперсії води та результати її дії [104]

За результатами досліджень визначено залежність розміру водяної хмари від енергії вибуху та початкового об'єму води (рис. 1.12) [104]. Також в роботі [104] встановлено, що діаметр водяної хмари становить близько 20 м у разі застосування ємності об'ємом 600 л і найменшої енергії вибуху 4384 кДж, а у випадку застосування ємності діаметром 1500 л та максимально використаної енергії вибуху 20092 кДж відбувається утворення водяної хмари діаметром близько 50 м. Запропонований спосіб розпилення води є ефективним, але

потребує застосування вибухових речовин, що є небезпечним при застосуванні.

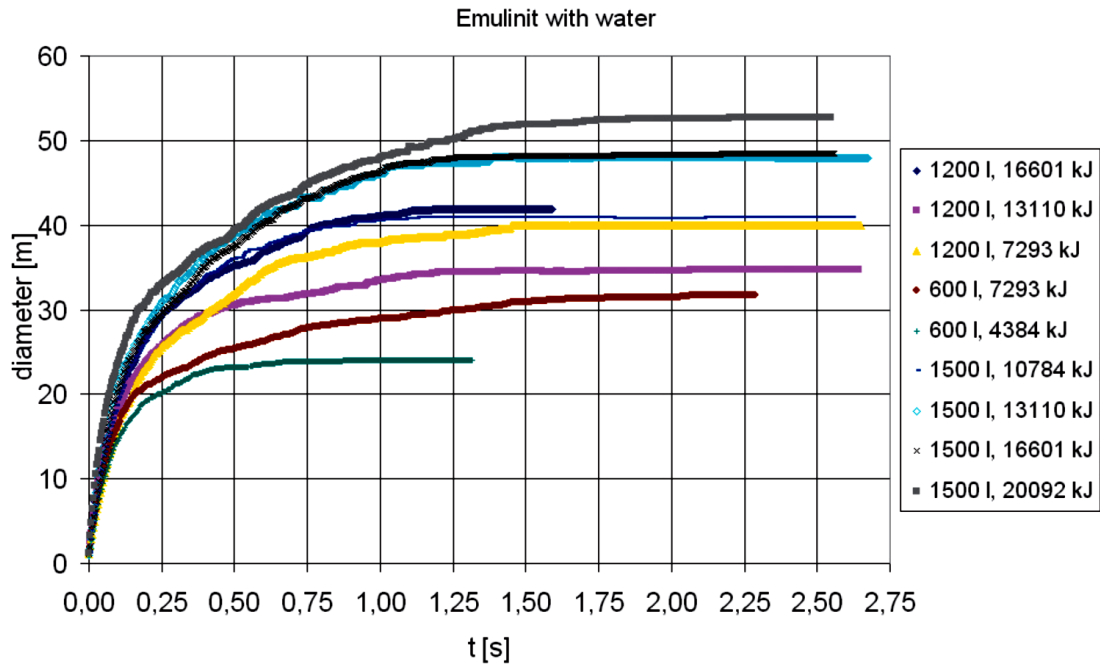


Рис. 1.12. Діаметр водяної хмари як функція часу для різних енергій вибуху і ємності для води різних розмірів [104]

В роботі [105] представлені технічні засоби отримання водяного туману за рахунок ультразвукової технології, що представлені на рисунку 1.13 [105].

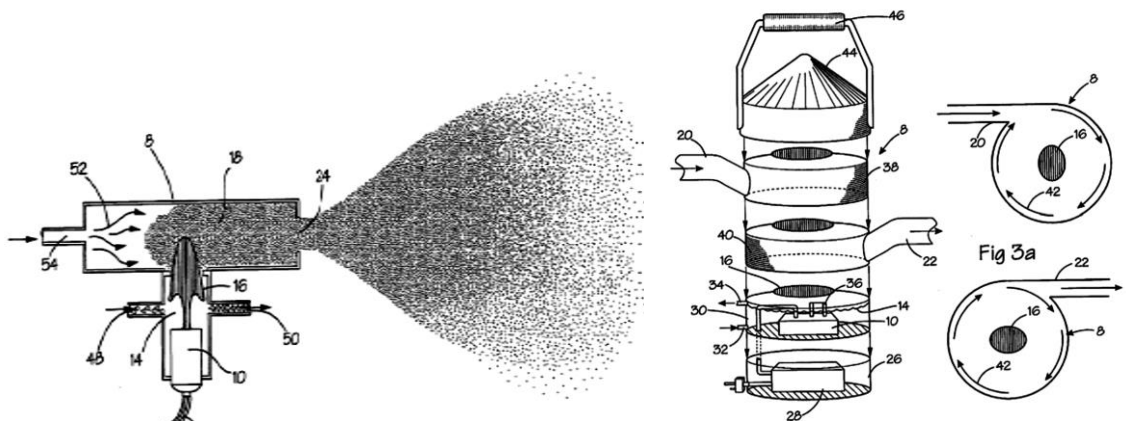
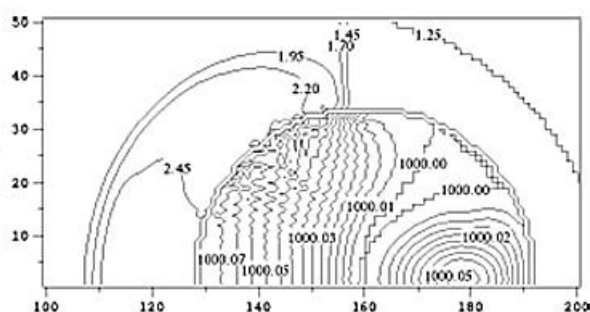


Рис. 1.13. Пристрої для створення водяного туману за рахунок ультразвукової технології [105]

При ультразвуковій технології водяний туман [105] утворюється при дуже високому тиску. Вода витікає зі спеціальної насадки з дуже високою швидкістю під тиском, велике тертя відбудеться між швидкісною водою та низькошвидкісним повітрям навколишнього середовища, а потім вода розбивається на дуже маленькі краплі води під великим тертям. При цьому способі розпилення отримується ДДВС з дисперсністю в межах 5-20 мкм за низької продуктивності [105].

В роботі [106] проведені експериментальні та теоретичні дослідження ударно-хвильової дії на циліндричну цівку води, що проводилися в ударній трубці 4 мм х 150 мм, обладнаній голографічною інтерферометрією. Циліндричний водяний стовп мав діаметр 6,4 мм і висоту 4 мм. На нього діяла ударна хвиля з числом Маха 1,3 в атмосферному повітрі. Відповідні числа Вебера та Рейнольдса за цих умов становили 3690 та 95300 відповідно. Результати дослідження представлені на рисунку 1.14 [106].



а)



б)

Рис. 1.14. Результати досліджень ударно-хвильового навантаження на циліндричний водний стовп на час дії 7 мкс [106]

За результатами досліджень встановлено [106], що на розглянутий час моделювання дії ударної хвилі на водяний стовп він не деформувався від початкової форми. Відбиття і проходження ударної хвилі в повітрі схожі на ті, що виникають при відбитті ударної хвилі від твердого циліндром. Тому можна зробити висновок, що на цій стадії взаємодії ударної хвилі з товщею води поле

поток нагадує поле відбиття ударної хвилі від твердого циліндру. Як тільки стовп води почне деформуватися, ці подібності припиняються. При цьому слід зазначити, що дослідження проводилися при застосуванні малогабаритного обладнання. Тому отриманні результати можуть бути застосовані для визначення лише принципу подрібнення крапель води [106].

В роботі [107] експериментально досліджено взаємодію ударної хвилі, що поширюється в повітрі, з поверхнею води, по якій ковзає хвиля, в ударній трубці з використанням тіньової та прямої іскрової фотографії. Дослідження проводилися при початковому тиску 0,25 атм на квадратній (89×89 мм²) випробувальній секції для шару води глибиною 8 мм та довжиною секції 130 мм. Число Маха коливалося від 1,4 до 2,4 [107]. Було показано, що після проходження ударного фронту над поверхнею рідини поверхня розділу рідина газ стає гідродинамічно нестійкою, а на поверхні з'являються випадкові поверхневі нестійкості (бризки) різної структури. При проходженні потоку над поверхнею утворюється одна поверхнева хвиля великої амплітуди, розмір і швидкість якої залежать від числа Маха. Так встановлено, що при низькому ударному числі Маха ($1,3 < M_s < 1,6$) розпилення в основному витісняється з рециркулюючої області, утвореної заднім боком у нижній стінці каналу. При більших числах Маха розбризкування утворюється з поверхневої хвилі та з усієї поверхні води. Отримані результати дослідження наведені на рис. 1.15 [107].

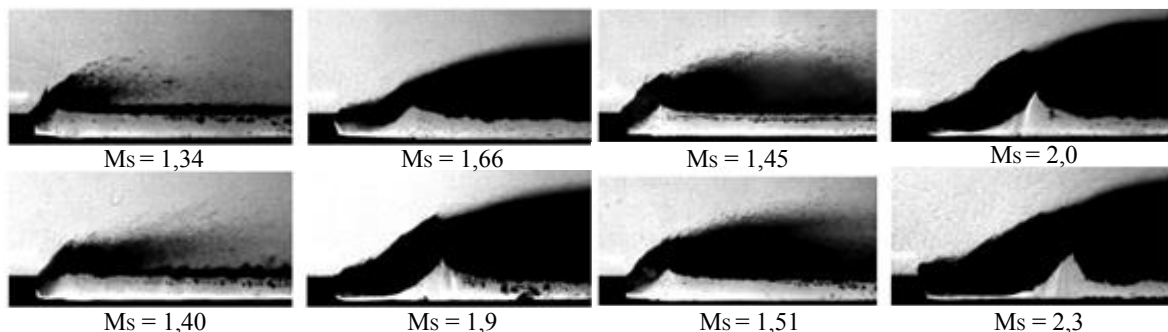


Рис. 1.15. Тіньові фотографії водяного розбризкування потоком повітря, що викликається ударної хвилею на час 3 мс для кількох значень числа Маха (поверхня спочатку нерухома) [107]

За результатами дослідження в роботі [107] розглянуто дисперсність 8-міліметрового шару води під дією газового потоку, викликаного ударною хвилею (число Маха від 1,4 до 2,4), що рухається перпендикулярно поверхні води. Встановлено, що кінцевий розмір порожнини відіграє ключову роль у режимі дисперсії. Косий вид поверхні показує, що в шарі туману видно поздовжні порушення. Вони можуть виникнути внаслідок поздовжньої нестабільності області рециркуляції між струменем, спрямованим назад, та ударною хвилею. Проведені дослідження підтвердили ефективність подрібнення води ударними хвилями високої інтенсивності.

1.8 Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз специфіки застосування дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожежі. На підставі аналізу фізико-хімічних властивостей води визначено, що широке застосування води, як вогнегасної речовини, зумовлено такими основними властивостями як висока теплоємність, висока теплота пароутворення, висока температура, за якої відбувається розкладання води на водень та кисень.

2. На підставі огляду способів розпилення води визначено, що імпульсний спосіб розпилення відноситься до енергоефективних способів, але для отримання високої продуктивності формування водяного туману потребує вирішення питання отримання високої періодичності розпилення водяного струменю.

3. Розвиток технічних засобів гасіння пожежі водяним струменем пов'язаний зі зростанням якості розпилення водяних струменів зі збереження високої продуктивності подавання вогнегасної речовини. Розвиток технології пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем пов'язаний зі створення крапель відповідного розміру.

4. Доступність води, екологічна чистота, безпека і висока вогнегасна

ефективність в ДДВС – основна причина зростаючого на неї попиту в якості вогнегасної речовини.

5. Дослідження систем пожежогасіння дрібнодисперсними (тонкорозпиленими) водяними струменями в Україні, здебільшого, спрямовані на впровадження стаціонарних систем пожежогасіння.

6. Сучасні технічні засоби гасіння дрібнодисперсним водяним струменем характеризуються обмеженою продуктивністю подавання дрібнодисперсного водяного струменя, що зумовлено низькою періодичністю пострілу.

7. Огляд літератури щодо процесу розпилення води під дією ударної хвилі показав доцільність підвищення інтенсивності ударної хвилі до числа Маха 2 та більше для ефективного розпилення рідини.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ВОДЯНИМ СТРУМЕНЕМ

Математичне моделювання технології гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем розбивалось на дві складові: дослідження процесу подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та дослідження процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем. Такий розподіл викликаний тим, що для дослідження процесу подрібнення води ударною хвилею в стволі установки достатньо дослідити дію одиночної ударної хвилі на цівку воду, яка подана до стволу установки. А дослідження процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем потребує безперервного нагнітання дрібнодисперсного водяного струменя у модельне приміщення.

2.1 Постановка задачі математичного моделювання процесу подрібнення води ударною хвилею у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії

Дослідження процесу формування ДДВС здійснювалось за умов, подібних до умов подрібнення вогнегасної речовини в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Відповідно, процес формування ДДВС відбувався у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії діаметром 20 мм (рис. 2.1) [108, 109].

Задача розбивалась на дві підзадачі – заповнення ствола пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою та дія ударної хвилі на цівку води у стволі. За першою підзадачею, до стволу через отвір діаметром 2 мм подавалась вода на протязі 60 мс. Ця тривалість подавання води відповідає різниці у часі між детонаційними імпульсами установки, що розроблена. Подавання води відбувалось на відстані 100 мм від закритого торця ствола установки (області

генерування ударної хвилі) та 300 мм від відкритого торця ствола. Відкритий торець ствола установки розміщувався у камері діаметром 150 мм та довжиною 250 мм. Ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії входив в камеру на глибину 60 мм. Після часткового заповнення ствола водою відбувалось генерування ударної хвилі в детонаційному стволу установки [108, 109]. Для створення ударної хвилі в області моделювання I задавалась наявність стисненого газу. Початковий тиск газу у області I дорівнював 1,9 МПа, а його температура дорівнювала 300 К. Довжина цієї області дорівнювала 600 мм. У області II газ мав тиск 101,3 кПа, та температуру 293 К за початкових умов другої стадії моделювання. Довжина цієї секції ствола дорівнювала 400 мм. За другою півзадачею, в результаті розвитку газодинамічних процесів відбувалось формування ударної хвилі. Цей процес відповідає виникненню ударної хвилі у стволі установки. Вихід зі ствола з'єднувався з камерою III. Це дозволило розглянути процес розповсюдження ДДВС у просторі під дією ударної хвилі. Розмір камери III дорівнював $250 \times 150 \times 150$ мм³ [108, 109]. Розмір камери визначався виходячи з дальності дії виходу струменю ДДВС зі ствола установки.

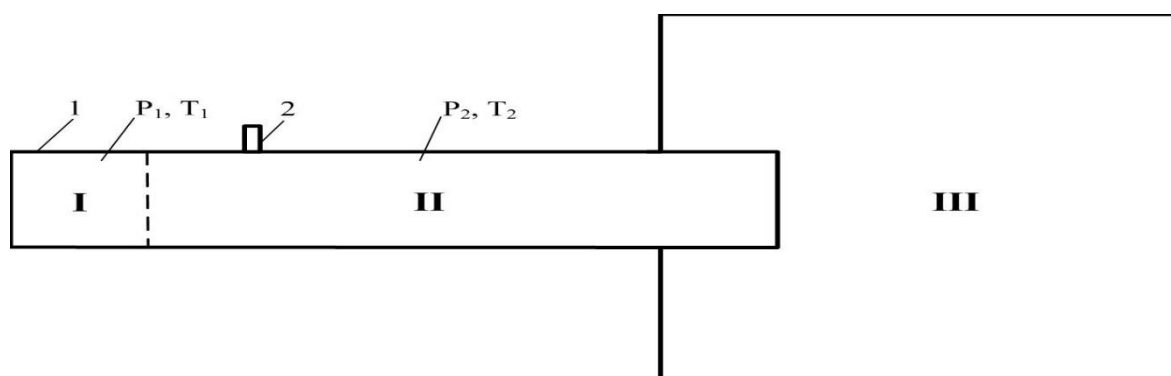


Рис. 2.1. Схема постановки задачі дослідження: 1 – ствол установки $d = 20$ мм; 2 – отвір для подачі води $d = 2$ мм; I – область газу високого тиску; II – область газу низького тиску; III – камера [107].

Визначення тиску та температури у області I (рис. 2.1) базувалось на стані продуктів детонації у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної

дії. Зокрема, у разі згорання стехіометричної суміші пропану з повітрі у закритому об'ємі за початкового атмосферного тиску газової суміші маємо зростання тиску газу у продуктах згорання до 0,9 МПа. При цьому, температура продуктів згорання досягає 2200 К [110]. Стиснення газу у стволі установки призводить до зростання початкової густини газу у 2–2,5 рази. Це призводить до зростання середнього тиску у продуктах детонації до 2 МПа [111].

Під час заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсною дією водою приймалось, що зовнішні збурення повітря у ствол відсутні (швидкість газового потоку на вході та виході ствола дорівнює нулю). Приймалось, що ствол розташовується паралельно земної поверхні, тобто сила тяжіння спрямована перпендикулярно до осі ствола. Подавання води відбувається з отвору, розташованого зверху ствола [108].

Вигляд об'єкту дослідження у розрахунковій області представлено на рисунку 2.2.

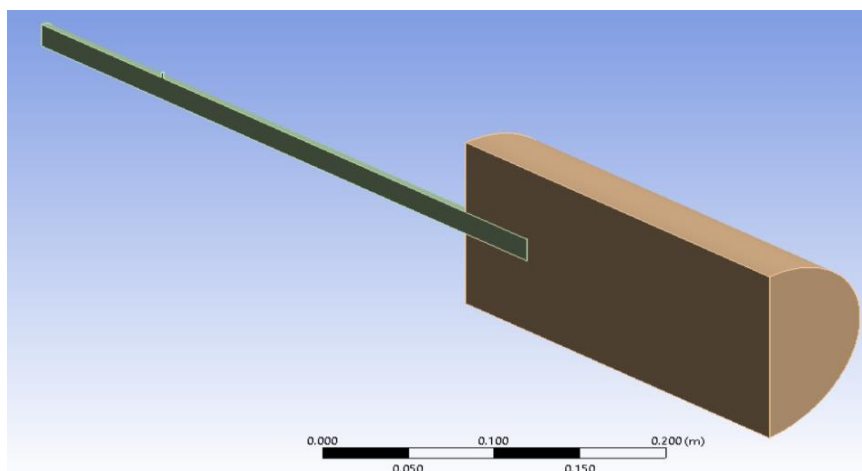


Рис. 2.2. Вигляд об'єкту дослідження у розрахунковій області

2.2 Постановка задачі математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем

Припинення горіння досягається за умови зменшення концентрації кисню до критичного значення. Заповнення об'єму приміщення ДДВС призводить до

зменшення концентрації кисню. Разом з тим, така зміна концентрації залежить від продуктивності нагнітання ДДВС у приміщення та дисперсності ДДВС. За великих розмірів крапель у ДДВС буде відбуватись їх швидке осадження на підлогу приміщення в результаті дії сили тяжіння. За низької продуктивності нагнітання ДДВС буде дуже тривалим у часі зниження концентрації кисню. Виходячи з цих міркувань, у роботі проведено дослідження впливу продуктивності нагнітання ДДВС та розміру крапель ДДВС на часово-просторові характеристики зміни концентрації крапель води у приміщенні.

Засоби створення ДДВС можуть забезпечувати середній розмір крапель води у діапазоні від 5 мкм до 200 мкм. Враховуючи те, що на поточний час визначено оптимальний діапазон крапель, які забезпечують ефективне гасіння з діапазоном розміру від 5 мкм до 50 мкм, дослідження проведено для часток з розміром 5 мкм. Математичне моделювання проведено стосовно модельного приміщення, яке заплановано для експериментальних досліджень, з метою подальшого порівняння результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень. Модельне приміщення з розмірами $12,0 \times 3,0 \times 2,5$ м представлено на рисунку 2.3.

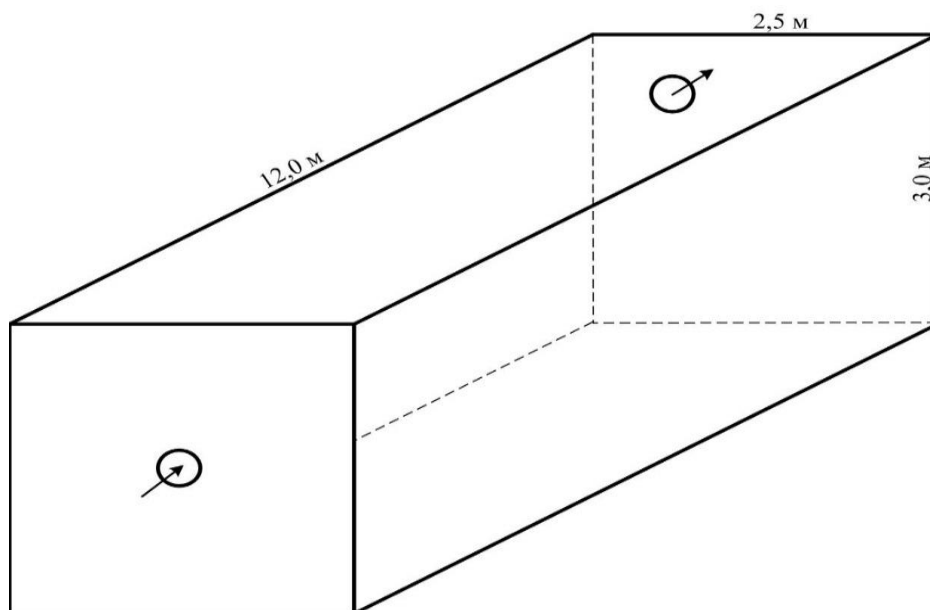


Рис. 2.3. Схема постановки задачі для проведення моделювання із заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем

Витрата ДДВС задавалась виходячи з продуктивності установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, що була експериментально розроблена. Нагнітання повітря з ДДВС здійснювалось за наступної продуктивності: за повітрям – 100 л/с та ДДВС – 0,7 л/с. Густина повітря дорівнювала $1,29 \text{ кг/м}^3$. Отвір для нагнітання ДДВС розташовувався по центру торцевої сторони модельного приміщення згідно рисунку 2.2. Діаметр отвору для нагнітання ДДВС дорівнював 25 см. Для уникнення підвищення тиску у модельному приміщенні з протилежної сторони модельного приміщення розміщувався отвір, через який відбувався вихід газу.

2.3 Розробка математичної моделі дослідження в програмному середовищі

2.3.1 Моделі подрібнення води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії

Розглянемо процеси, що відбуваються у задачі подрібнення води у стволі установки пожежогасіння. Під час подавання води через отвір до стволу установки, що заповнена повітрям, вода перебуває у зрідженому стані. Під дією ударної хвилі, що розповсюджується по стволу установки, відбувається подрібнення води. Таким чином, маємо справу з нестационарними газодинамічними процесами в двофазному середовищі (рідина/газ). При цьому, газ є середовищем, що стискається, а вода відноситься до середовища, що не стискається. Під час подавання води у ствол установки поверхня рідини має чітку межу фазового розділу з повітрям, а під час дії ударної хвилі на цівку води та воду, що розтікалась по поверхні стволу установки, виникають дискретні краплі води, що рухаються у потоці повітря. Звідси режим течії потоку з вільною поверхнею та режим течії дискретних крапель води у потоці газу [108, 109].

Програмне середовище дозволяє провести розрахунок течії у двофазних середовищах за розглянутих умов. Розрахунок окремо проводився стосовно

процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та стосовно подрібнення води ударною хвилею. Для дослідження цих процесів застосовано VOF-модель (модель об'єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє. Ця модель базується на методі відстежування поверхні, що застосовується до фіксованої ейлерової сітки. Згідно [112], у VOF моделі єдиний набір рівнянь імпульсу використовується для рідин, а об'ємна частка кожної рідини в кожній обчислювальній комірці відстежується по всій області. Область застосування моделі VOF включає, в тому числі, заповнення рідиною газового середовища та прогнозування розпаду струменя рідини у газовому середовищі.

Рівняння нерозривності для об'ємної фракції кожної фази (газ/рідина) набуває вигляд [108]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (2.1)$$

де $\dot{m}_{qp}$ – передача маси від фази q до фази p;

$\dot{m}_{pq}$ – передача маси від фази p до фази q;

α_q – об'ємна фракція q-ї фази;

ρ_q – густина q-ї фази;

t – час;

S_{α_q} – джерельний член маси;

$\vec{V}_q$ – швидкість q-ї фази.

Об'ємна частка первинної фази обчислювалась на основі наступного обмеження [108]:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1. \quad (2.2)$$

Об'ємна частка фази визначалась за неявною схемою дискретизації часу за рівнянням [108]:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V, \quad (2.3)$$

де n – індекс для попереднього кроку за часом;

$n + 1$ – індекс для наступного кроку за часом;

$\alpha_{q,f}$ – поверхнева величина об'ємної фракції q -ї фази;

V – об'єм розрахункової комірки;

U_f – об'ємний потік через поверхню за нормаллю швидкості.

Осереднена густина рідини визначалась за рівнянням [108]:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q. \quad (2.4)$$

Рівняння кількості руху має вигляд [108]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (2.5)$$

де p – тиск;

μ – молярна маса;

g – прискорення вільного падіння;

$\vec{F}$ – джерельний член імпульсу.

Рівняння енергії має вигляд [108]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h, \quad (2.6)$$

де E – осереднене значення енергії;

T – осереднена температура;

S_h – джерельний член енергії;

k_{eff} – коефіцієнт ефективною теплопровідності.

При цьому, осереднене значення енергії визначається рівнянням [108]:

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}. \quad (2.7)$$

В'язкість рідини враховувалась за моделлю турбулентності з перенесенням напруги здвигу (SST k - ω моделлю Ментера), яка дозволяє досліджувати, в тому числі, перехідну ударну хвилю, яка формується в даних умовах дослідження. В моделі має місце уточнення рівняння масопереносу (2.1), до якого додаються складові виникнення турбулентної кінетичної енергії та ефективної дифузії. Рівняння масопереносу за SST k - ω моделлю має вигляд, що подібний до стандартної k - ω моделі [108]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k, \quad (2.8)$$

та

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad (2.9)$$

де G_k – складова відтворення кінетичної енергії;

G_ω – складова ω генерування;

Γ_k та Γ_ω – складові ефективної k та ω дифузії;

Y_k та Y_ω – складові k та ω дисипації, що викликані турбулентністю;

D_ω – коефіцієнт перехресної дифузії;

S_k та S_ω – джерельні складові.

Ефективні коефіцієнти дифузії для моделі SST k - ω визначаються за рівняннями:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad (2.10)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}, \quad (2.11)$$

де σ_k та σ_ω – турбулентні числа Прандтля для k та ω відповідно.

Турбулентна в'язкість μ_t обчислюється наступним чином

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{a^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]}, \quad (2.12)$$

де S – величина швидкості деформації.

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}}, \quad (2.14)$$

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4), \quad (2.15)$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right], \quad (2.16)$$

$$D_{\omega}^{+} = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right], \quad (2.17)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2), \quad (2.18)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right]. \quad (2.19)$$

Розрахунок системи рівнянь здійснювався тиско-базисним методом у Лагранжевій системі координат.

2.3.2 Модель заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем

Для дослідження процесу заповнення модельного приміщення ДДВС застосовано модель дискретної фази в наближенні Ейлера – Лагранжа. За цією моделлю газове середовище, у якому знаходиться речовина у рідинному стані та у дискретному вигляді (в задачі, що розглядається такою речовиною є краплі води), розглядається як континуум. Дослідження руху такого суцільного середовища розглядається за рівняннями Нав'є-Стокса, тоді як рух дисперсної фази досліджується шляхом відстеження великої кількості крапель через розраховане поле потоку. Відстеження руху кожної окремої краплі у часі та просторі вирішують за рівняннями дискретної фази, число яких пропорційне числу часток. Дисперсна фаза може обмінюватися імпульсом, масою та енергією з фазою, що тече. Слід зазначити, що за методом Ейлера-Лагранжа дискретна фаза має становити малу об'ємну частину – менше 10 %, навіть за умови перевищення маси часток над масою газу. За умовами моделювання повітря нагнітається у модельне приміщення з продуктивністю 100 л/с, а вода – 0,7 л/с. Звідси, у 1 літрі повітря перебуває 0,007 л води, тобто відсоток води за об'ємом складає 0,7 %. В той же час, маса води перевищує масу повітря у одиниці об'єму

у 5,4 рази. Таким чином, умова застосування моделі дискретної фази в наближенні Ейлера – Лагранжа виконується. Програмне середовище дозволяє врахувати взаємодію частинок з частинками, такі як зіткнення, руйнування та злипання. Але це ускладнює процес відстеження руху часток та підвищує час розрахунку. Враховуючи низький об’ємний відсоток води у задачі, що моделювалась, процесом взаємодії крапель води нехтувалось.

Приймалось, що краплі води мають сферичну форму. Траєкторія руху крапель води розраховувалась за рівнянням балансу сил, що діють на краплю, у вигляді [112]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D (\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}, \quad (2.20)$$

де $\vec{u}_p$ – швидкість руху краплі води;

$\vec{u}$ – швидкість руху повітря;

ρ_p – густина води;

ρ – густина повітря;

$\vec{g}$ – прискорення вільного падіння;

$\vec{F}$ – сила додаткового прискорення краплі, що викликана градієнтом тиску, та іншими чинниками;

F_D – сила опору на одиницю маси краплі води, що розраховувалась за рівнянням:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (2.21)$$

де μ – коефіцієнт молекулярної в’язкості повітря;

Re – число Рейнольдса;

d_p – діаметр краплі води;

C_D – коефіцієнт опору.

Таким чином, рівняння балансу враховує інерцію краплі води та сили прискорення, що діють на краплю води.

2.4 Результати математичного моделювання процесів за технологією пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем

2.4.1 Результати математичного моделювання процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою

Відображення процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою відслідковуємо за зміною об'ємної частки води у двофазній газорідинній суміші. Результати розрахунку відображено у вигляді (рис. 2.4–2.9) [108, 109].

Кольорова шкала об'ємної частки води від 0 (0 %) до 1 (100 %) відображена з лівої сторони рисунків. Спостерігаємо початок впорскування води до ствола установки (рис. 2.4).

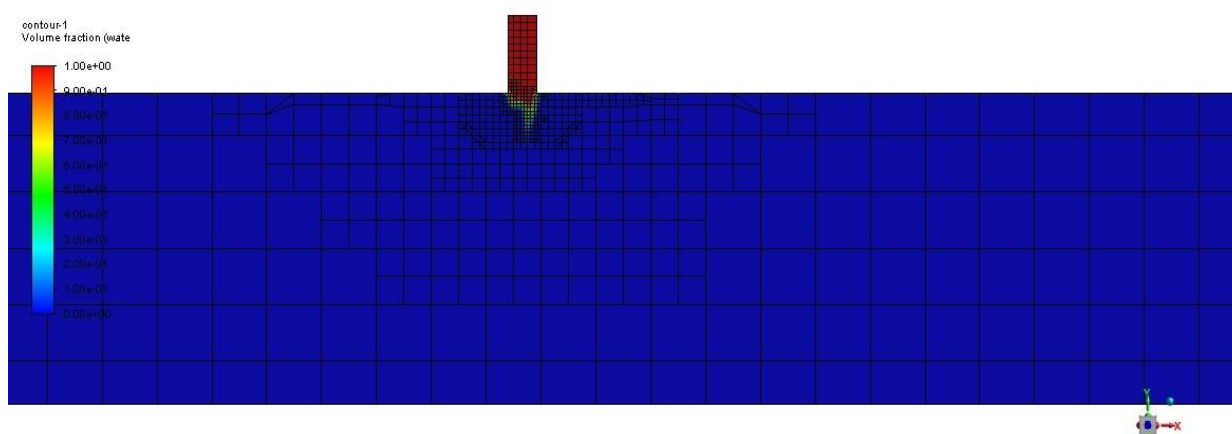


Рис. 2.4. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 1 мс

Спостерігаємо досягнення цівки води протилежної сторони ствола установки (рис. 2.5). При цьому, розпилення води практично не відбувається.

Виходячи з розрахункового інтервалу між початком впорскування води та досягненням протилежного торця ствола установки, що дорівнює 8 мс, та відстанню, що дорівнює діаметру ствола 20 мм, маємо швидкість розповсюдження цівки води, що дорівнює 2,5 м/с [108, 109].

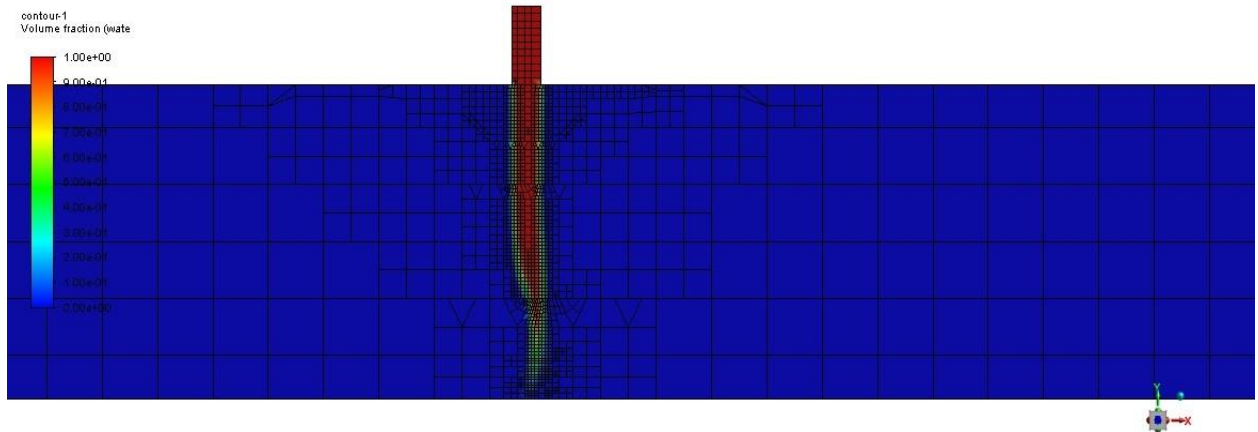


Рис. 2.5. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 9 мс

За результатами експериментальних досліджень роботи [113] отримано, що швидкість цівки води у соплі досягає близько 10 м/с за високого тиску нагнітання. Тобто, отримані результати співпадають за порядком величини, що підтверджує їх достовірність.

Після досягнення стінки ствола установки у подальшому відбувається розтікання води вздовж нижньої стінки ствола під дією сили тяжіння (рис. 2.6).

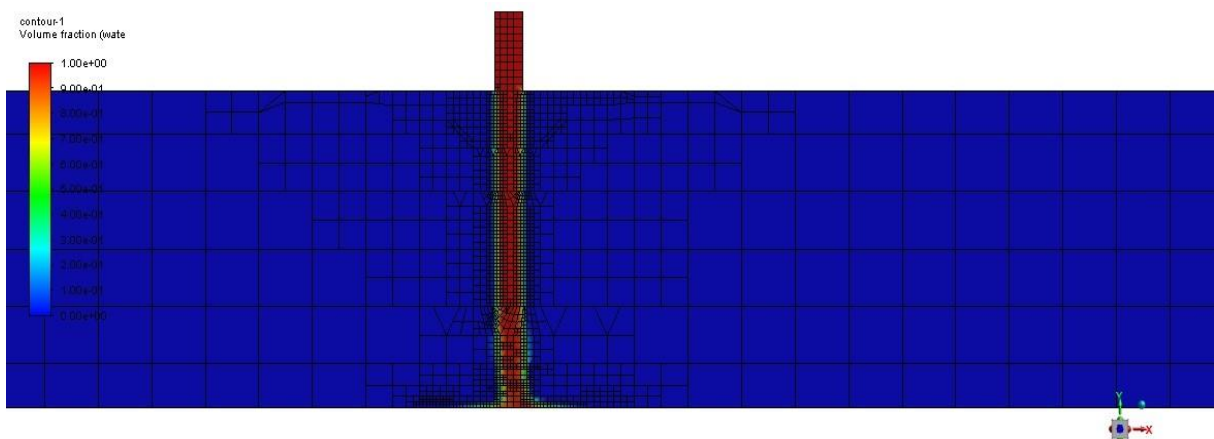


Рис. 2.6. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 15 мс

Припинення впорскування води у ствол установки, що відображається нульовою об'ємною концентрацією води у стволі впорскування (рис. 2.7). Також спостерігаємо, що вода розтіклася по нижній стінці ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

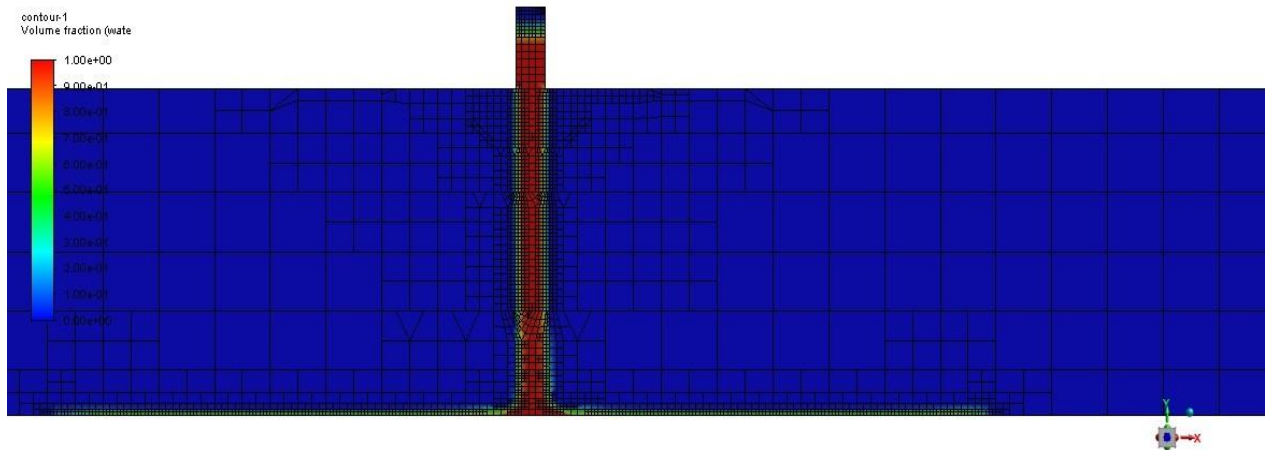


Рис. 2.7. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 60 мс

Спостерігаємо, що через 77 мс після припинення впорскування води, цівка води практично зникає (рис. 2.8).

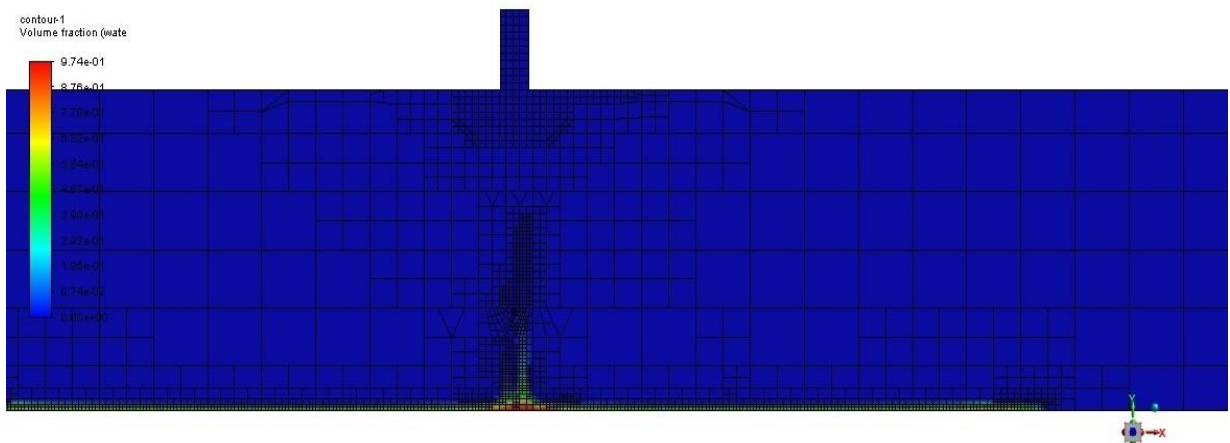


Рис. 2.8. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 77 мс

Спостерігаємо, що на протязі понад 60 мс після розпаду цівки води вода перебуває на нижній стінці ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дрібнодисперсним водяним струменем практично у незмінному

стані (рис. 2.9) [108, 109].

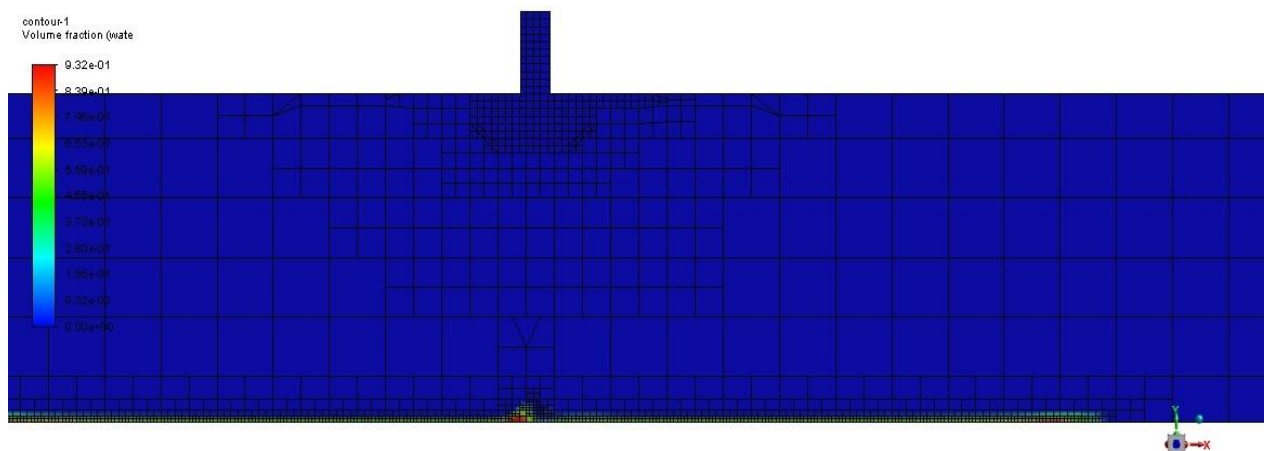


Рис. 2.9. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 140 мс

Наведені результати досліджень демонструють порівняно високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до газодетонаційних процесів, що відбуваються у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Зокрема, інтервал часу між циклами детонації у стволі установки, що працює на частоті 23 Гц, складає близько 43,5 мс [108, 109]. Якщо відкинути цикл продувки ствола установки, то маємо інтервал часу у 21 мс, за який необхідно вприснути воду у ствол установки. За результатами наведених досліджень маємо, що тільки час розповсюдження цівки води з однієї до іншої сторони ствола установки складає 8 мс. До цього слід додати технічні обмеження у швидкодії електромагнітних клапанів. Наприклад, швидкодіючий електромагнітний клапан фірми Festh типу VZWD, має час відкриття у 20 мс та час закриття, що дорівнює 18 мс [114]. Тобто, інерційність у часі цього клапану не відповідає потребам у забезпеченні імпульсного впорскування води у ствол. Таким чином, у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дрібнодисперсним водяним струменем не є доцільним застосовувати імпульсне впорскування води до ствола установки [108, 109].

За результатами розрахунків маємо розтікання води вздовж нижньої стінки ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Як показали

результати експериментальних досліджень інших дослідників [103–107], під час розповсюдження ударної хвилі вздовж поверхні води відбувається «захват» води з подальшим її подрібненням. Це дає підстави вважати, що процес розтікання води не призведе до погіршення якості розпилення води.

2.4.2 Результати математичного моделювання процесу подрібнення цівки води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії під дією ударної хвилі

Результати розрахунку дії ударної хвилі та супутнього газового потоку на цівку води в стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії на різний час (рис. 2.10–2.15) [108, 115].

Результати відображені у вигляді поверхні фазового переходу рідина/газ у полі статичного тиску газу. Кольорова шкала тиску представлена на рисунках з лівої сторони. На початок дії ударної хвилі на рідину спостерігаємо, що основна частина води розтіклася вздовж нижньої поверхні ствола установки, а частково розбризкана вода практично симетрично розосереджена вздовж осі цівки води.

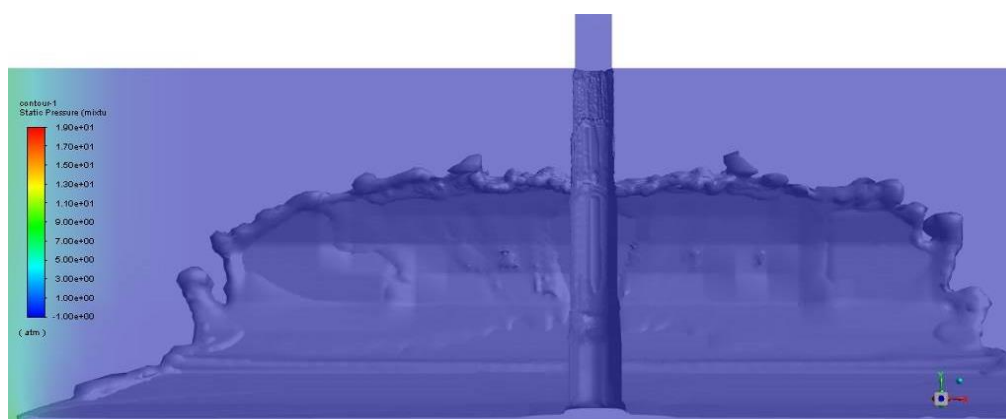


Рис. 2.10. Початковий розподіл рідини у стволі установки перед дією ударної хвилі на розрахунковий час 10 мкс

На час 5 мс від початку дії ударної хвилі (рис. 2.11) спостерігаємо перерозподіл тиску у частині розрахункового простору. На фронті ударної хвилі

переміщення води практично не відбувається. В той же час, у супутньому потоці за фронтом хвилі з'являється рух води [108, 115].

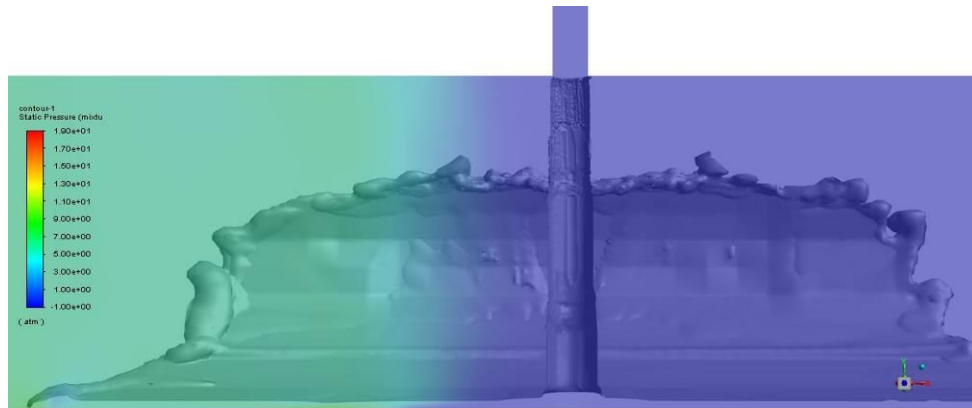


Рис. 2.11. Розподіл рідини у стволі на час 25 мкс від початку дії ударної хвилі

Спостерігаємо досягнення ударної хвилі цівки води (рис. 2.12). Підвищена густина середовища в області цівки води призводить до появи газодинамічного спротиву руху середовища, що відображається у зростанні тиску в цій області. Зокрема, тиск в області зіткнення ударної хвилі з цівкою води зростає до 1,9 МПа. Також спостерігаємо подальше переміщення рідини. Перед фронтом ударної хвилі, стан рідини практично не змінюється [108, 115].

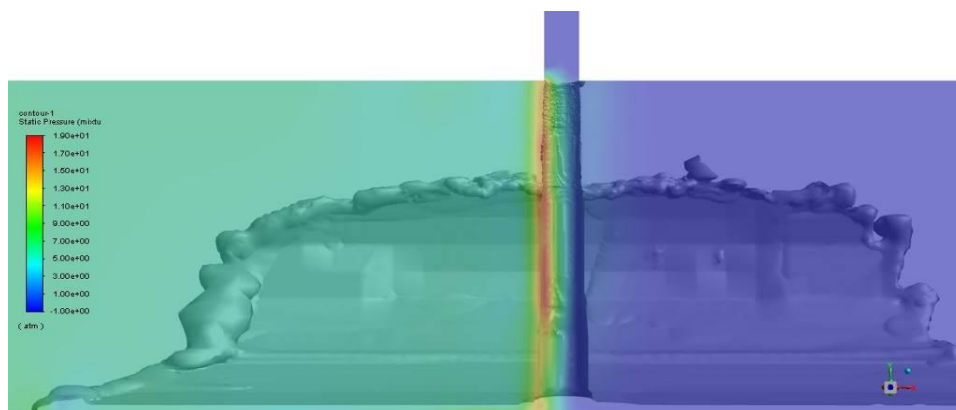


Рис. 2.12. Розподіл рідини у стволі на час 40 мкс від початку дії ударної хвилі

Також маємо, що процес подрібнення води відбувається більш повільно порівняно з процесом розповсюдження ударної хвилі по стволу установки.

Спостерігаємо зміщення рідини під дією газового потоку, що рухається за фронтом ударної хвилі (рис. 2.13). Крім того, великомасштабні вихорі у газовому потоці зумовлюють відривання води з поверхні ствола установки, що спостерігається у лівому нижньому куті [108, 115].

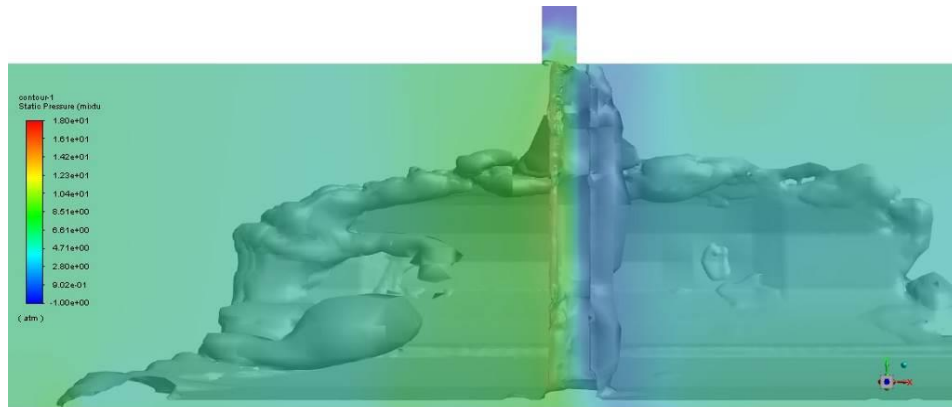


Рис. 2.13. Розподіл рідини у стволі на час 100 мкс від початку дії ударної хвилі

У подальшому маємо прискорення руху рідини під дією газового потоку (рис. 2.14). Також відбувається перерозподіл рідини з рухом по всьому перетину ствола установки. Відривання води від нижньої стінки ствола продовжується.

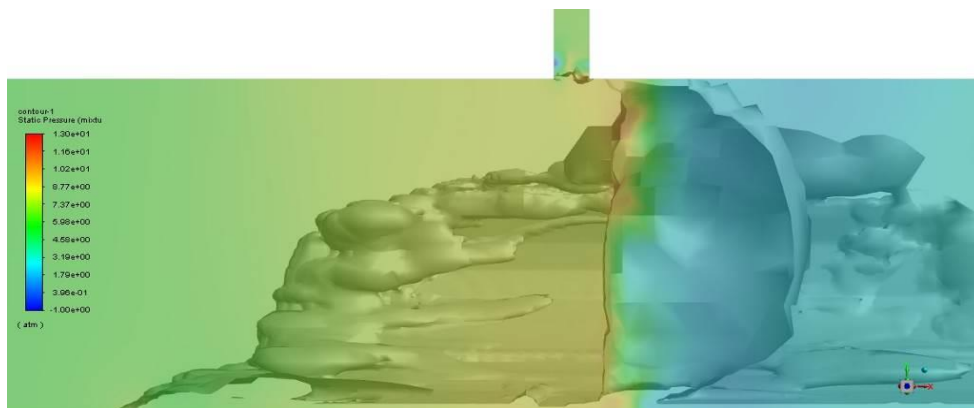


Рис. 2.14. Розподіл рідини у стволі на час 250 мкс від початку дії ударної хвилі

На час до 0,5 мс від початку дії ударної хвилі на воду у стволі установки маємо повне переміщення рідини у газовому потоці на праву сторону відносно точки подавання води до ствола. Також спостерігаємо розпилення води, що

продовжує подаватись до стволу установки. При цьому, вода не залишається на стінках ствола установки, що свідчить про високу якість розпилення води під дією високошвидкісного газового потоку (рис. 2.15) [108, 115].



Рис. 2.15. Розподіл рідини у стволі на час 700 мкс від початку дії ударної хвилі

Розглянемо більш детально зміну поля швидкості газового потоку в стволі установки. Розподіл швидкості газу у стволі в області впорскування води у різний час представлено (рис. 2.16–2.19) [108].

Поле швидкості газу у стволі установки на розрахунковий час 10 мкс (рис. 2.16).

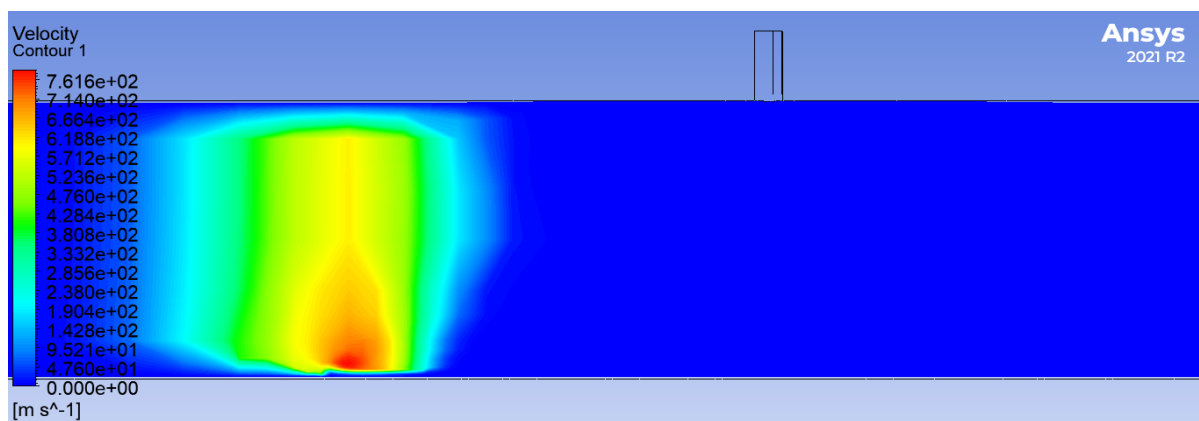


Рис. 2.16. Поле швидкості газу у стволі на розрахунковий час 10 мкс

Спостерігаємо, що до місця впорскування води підходить плоска ударна хвиля зі швидкістю 760 м/с, що в два рази перевищує швидкість звуку. За

фронтом хвилі газ рухається з дозвуковою швидкістю. Коли хвиля досягає цівки води, то в області цівки швидкість газового потоку стрімко зменшується (рис. 2.17). Це пов'язано зі зростанням маси речовини, що залучається до руху, та призводить до сповільнення газового потоку у цій області.

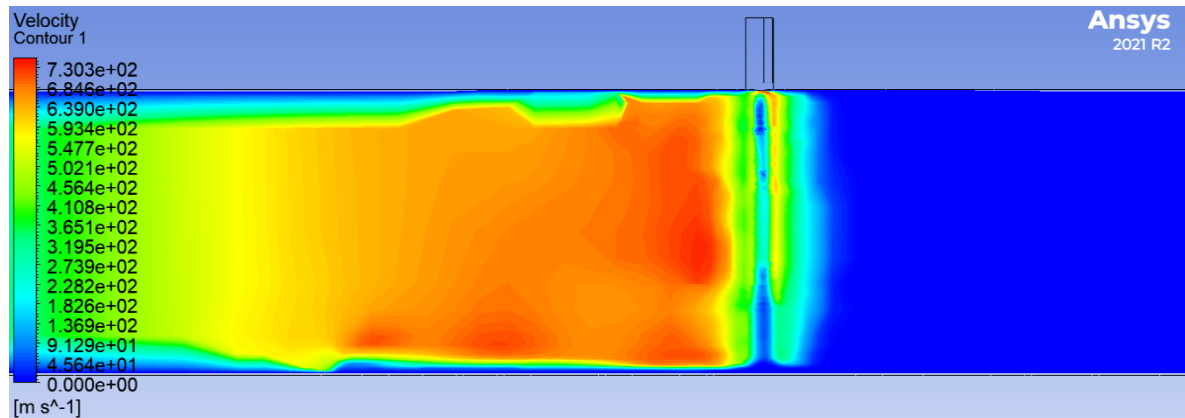


Рис. 2.17. Поле швидкості газу у стволі на розрахунковий час 40 мкс

Також спостерігаємо зниження швидкості навколо стінок ствола установки, де розтікалась вода. Зниження швидкості газового потоку перед цівкою води спостерігається і під час подальшого руху ударної хвилі у стволі установки (рис. 2.18).

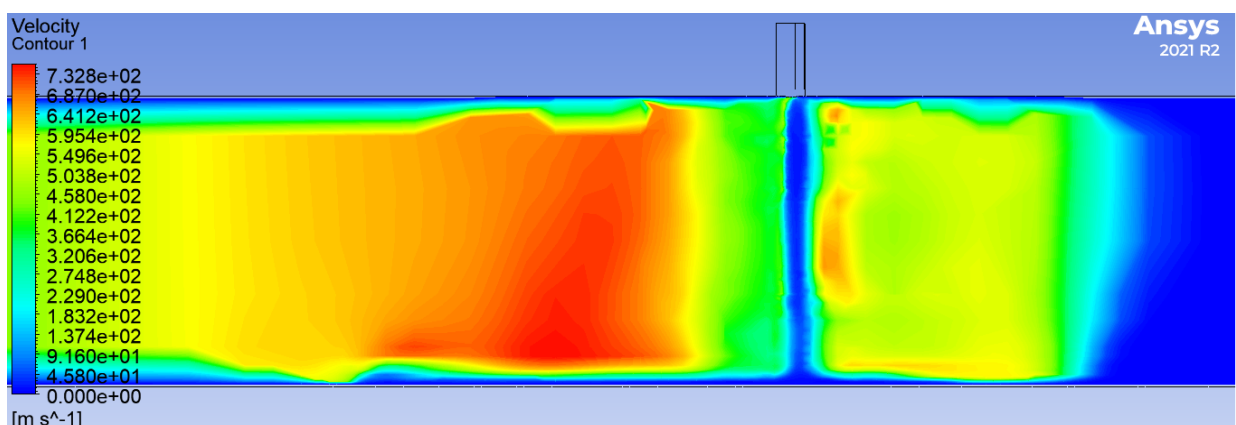


Рис. 2.18. Поле швидкості газу у стволі на розрахунковий час 60 мкс

Але коли подрібнення води під дією високошвидкісного газового потоку та винос води з області її нагнітання завершується, то зменшення швидкості газу

в області точки нагнітання води не відбувається.

Зокрема, на розрахунковий час 700 мкс спостерігаємо рух газового потоку зі швидкістю 380–400 м/с в області нагнітання води з практично не змінною швидкістю (рис. 2.19).

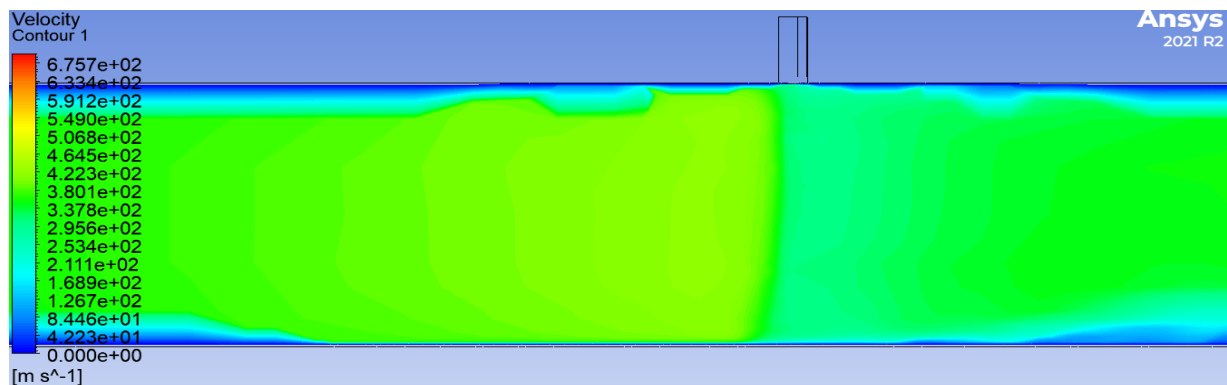


Рис. 2.19. Поле швидкості газу у стволі на розрахунковий час 700 мкс

Слід зазначити, що наведені швидкості газового потоку є характерними для ударної хвилі та супутного газового потоку, що формується після завершення детонації у стволі установки.

2.4.3 Результати математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем

Процес заповнення модельного приміщення ДДВС з розміром часток 5 мкм оцінимо за часом перебування часток. Такий підхід дозволяє виявити динаміку розповсюдження часток води в модельному приміщенні. Результати такого розподілу часток у модельному приміщенні у поперечному перерізі на різний час розрахунку (рис. 2.20–2.27).

Кожен з наведених результатів має власну кольорову шкалу часу перебування часток, що наведено з лівої сторони рисунків. За результатами розрахунку маємо, що нагнітання ДДВС за умовами моделювання починається через 30 с від початку розрахунку (рис. 2.20).



Рис. 2.20. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 30 с

Маємо, що частки води з найдовшим часом перебування у 1 с зосереджені за напрямком нагнітання. Спостерігаємо, що спочатку характер розповсюдження часток приймає форму, що відповідає затопленому струменю (рис. 2.21).

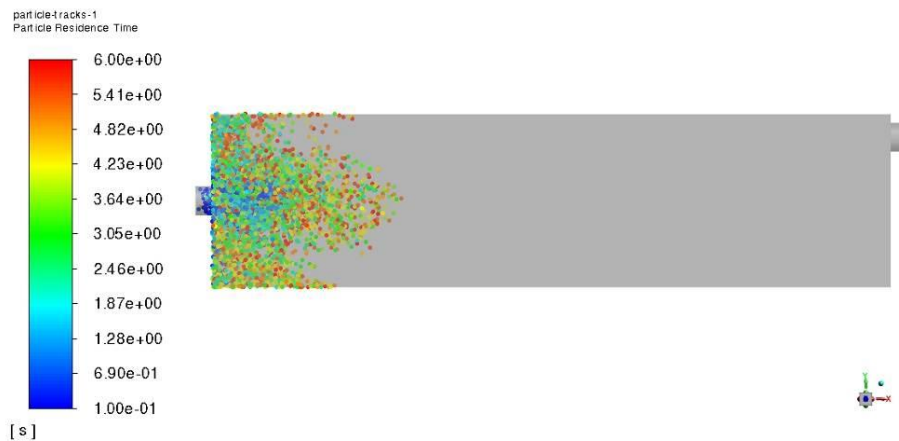


Рис. 2.21 – Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 35 с

Разом з тим, частина часток розповсюджується вздовж стінок модельного приміщення. Така форма може бути пояснена великомасштабними турбулентними вихорами, що виникають в результаті проникнення газового

струменю у простір такої форми.

На розрахунковий час 40 с маємо рух часток води по всьому перетину модельного приміщення (рис. 2.22).

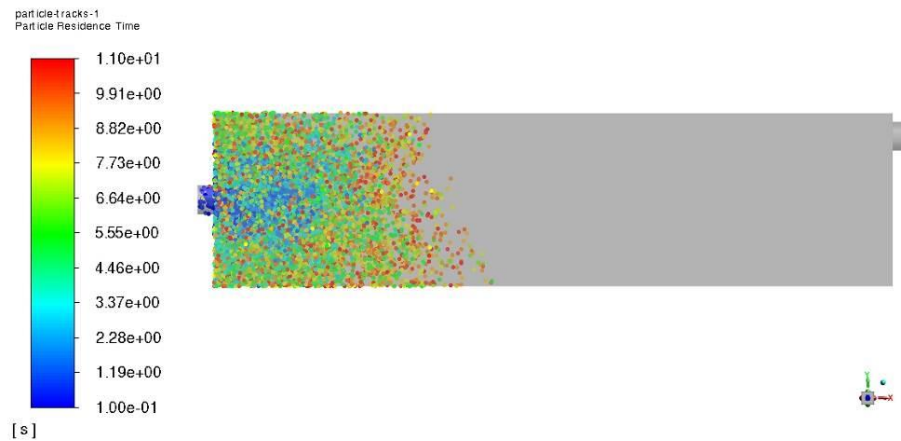


Рис. 2.22. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 40 с

При цьому, з більшим часом перебування частки води розосереджені навколо струменю, а у самому струмені зосереджені частки з меншим часом перебування. На розрахунковий час 50 с спостерігаємо зростання кількості часток води, що стеляться вздовж нижньої поверхні модельного приміщення (рис. 2.23).

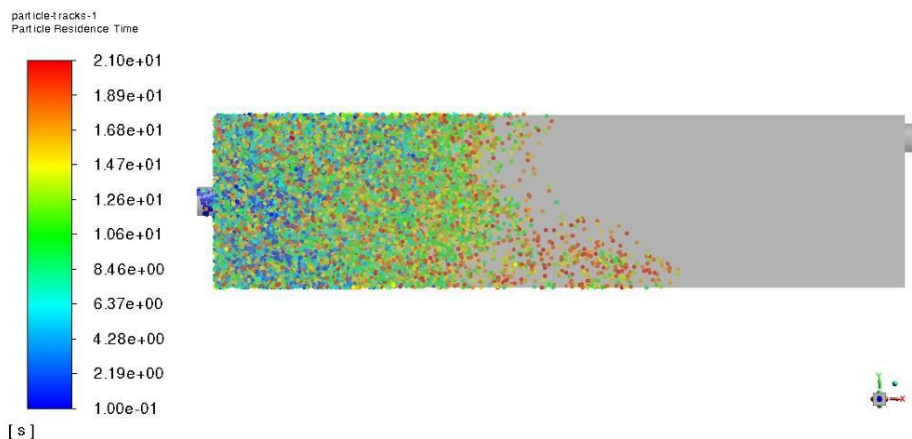


Рис. 2.23. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 50 с

Такий перерозподіл пояснюється зростанням впливу сили тяжіння по відношенню до сил, що викликані дією на частки вихровими потоками. На розрахунковий час 65 с форма розповсюдження часток води по модельному приміщенні зберігається (рис. 2.24).

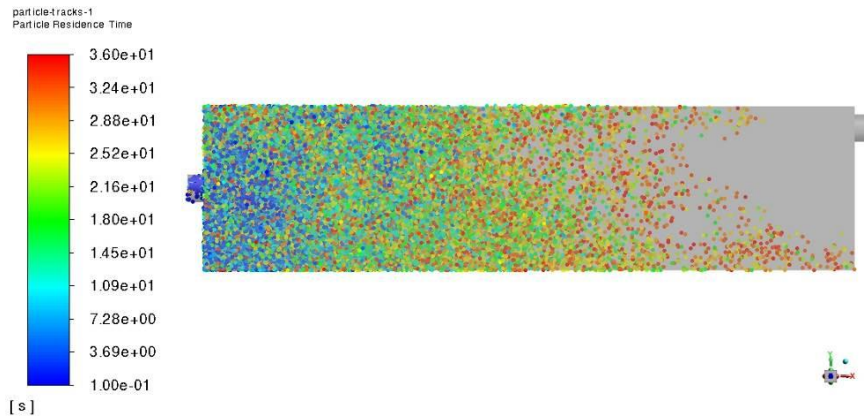


Рис. 2.24. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 65 с

Але за часом перебування відбувається перерозподіл у вигляді зростання часу перебування зі сторони нагнітання дрібнодисперсного водяного струменя до вихідного отвору модельного приміщення. На час 85 с модельне приміщення заповнюється частками води повністю (рис. 2.25).

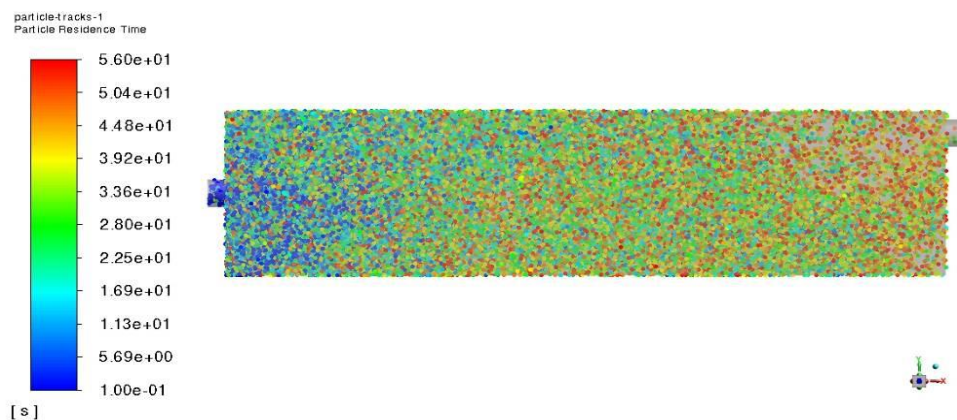


Рис. 2.25. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 85 с

При цьому, максимальний час перебування часток води досягає 56 с. Характер розподілу часток за часом перебування не змінюється. Тобто, частки води з меншим часом перебування знаходяться в області нагнітання, а частки з більшим часом перебування розташовані зі сторони вихідного отвору модельного приміщення (рис. 2.26).

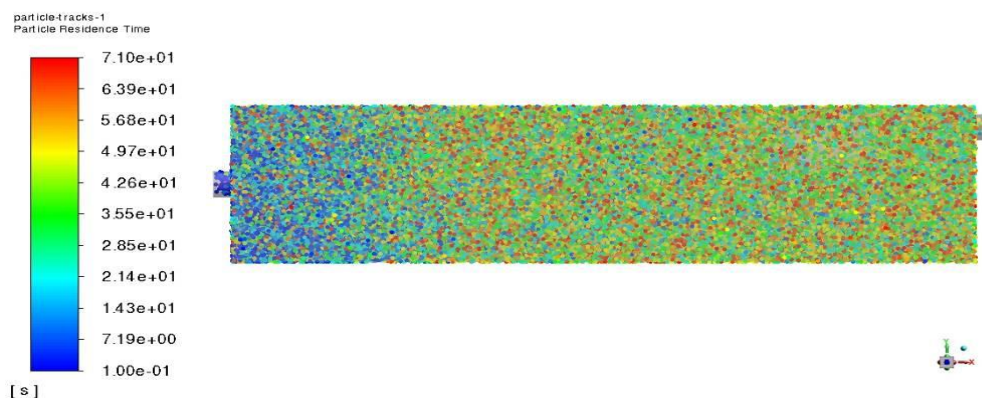


Рис. 2.26. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 100 с

Під час подальшого нагнітання ДДВС на розрахунковий час 100 с відбувається зростання максимального часу перебування часток до 71 с. Продовження нагнітання ДДВС у модельне приміщення у подальшому призводить до рівномірного розподілу часток за часом їх перебування (рис. 2.27). Це може бути пояснено інтенсивним перемішуванням часток води. При цьому, найбільший час перебування часток досягає 110 с.

Для оцінки ефективності гасіння пожежі ДДВС, що нагнітається у модельне приміщення, здійснимо дослідження зміни концентрації води у модельному приміщенні. Мінімальну концентрацію води у повітрі, за якої досягається гасіння пожежі, визначимо з наступних міркувань. Відомо [116], що умовою припинення горіння є створення концентрації пари води у повітрі, що дорівнює 30–35 % за об'ємом. Приймаємо, що в результаті теплового впливу від пожежі краплі ДДВС перетворюються у водяний пар.

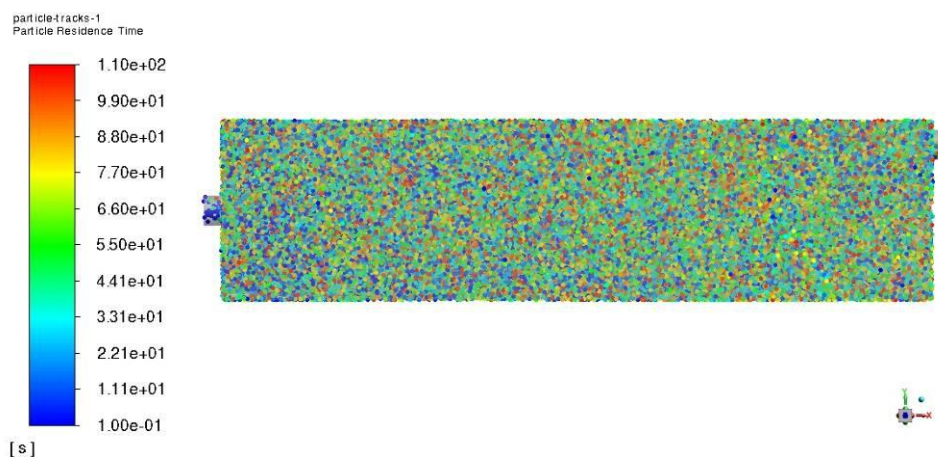


Рис. 2.27. Розподіл часток у модельному приміщенні за часом їх перебування у поперечному розрізі модельного приміщення на розрахунковий час 139 с

Процес випаровування крапель води, що супроводжується зміною фазового стану, супроводжується зміною об'єму, яку займає речовина, з відповідним розширенням пари. Ступінь розширення об'єму залежить від масової долі крапель води у повітрі. Молярна маса пари води дорівнює 18 г/моль, а молярна маса повітря приблизно дорівнює 29 г/моль. Тому, якщо у об'ємі повітря з масою 29 г знаходиться краплі води з загальною масою 18 г, то в результаті їх випаровування відбудеться двократне зростання об'єму цієї речовини. Для урахування процесу розширення пари води запишемо рівняння суміші повітря з паром води, де об'ємна концентрація пари води складає 35 %, у вигляді:



З аналізу рівняння маємо, що перед початком випаровування крапель води у 5 молів повітря необхідно вприснути 2,7 молі води. За нормальних умов 1 моль газу дорівнює 22,4 л. Маса 2,7 молів води дорівнює 48,6 г. Звідси, мінімальна густина крапель води у повітрі, за якої досягається гасіння пожежі, складе $48,6 / (22,4 \cdot 5) = 0,44 \text{ кг/м}^3$.

Зміна масової концентрації ДДВС у модельному приміщенні у часі (рис. 2.28–2.33). Кольорова шкала масової концентрації пари води наведено ліворуч. За цією шкалою, концентрація пари води, за якої забезпечується вогнегасна дія, відповідає зеленому, жовтому та красному кольорам.



Рис. 2.28. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 35 с

Спостерігаємо, що на час 35 с (рис. 2.28) розподіл ДДВС відбувається по всьому перетину модельного приміщення. Разом з тим, такий розподіл не є рівномірним. Тобто, формуються певні області у просторі, де концентрація пари води має вогнегасну дію.

Під час подальшого нагнітання ДДВС на час 50 с біля точки нагнітання формується практично суцільна область, де концентрація пари води забезпечує вогнегасну дію (рис. 2.29).

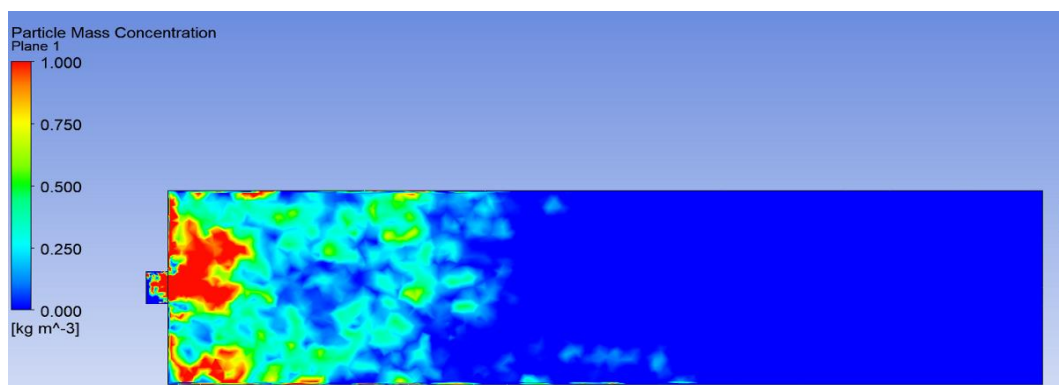


Рис. 2.29. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 50 с

На розрахунковий час 65 с спостерігаємо подальше розширення області з вогнегасними властивостями (рис. 2.30).

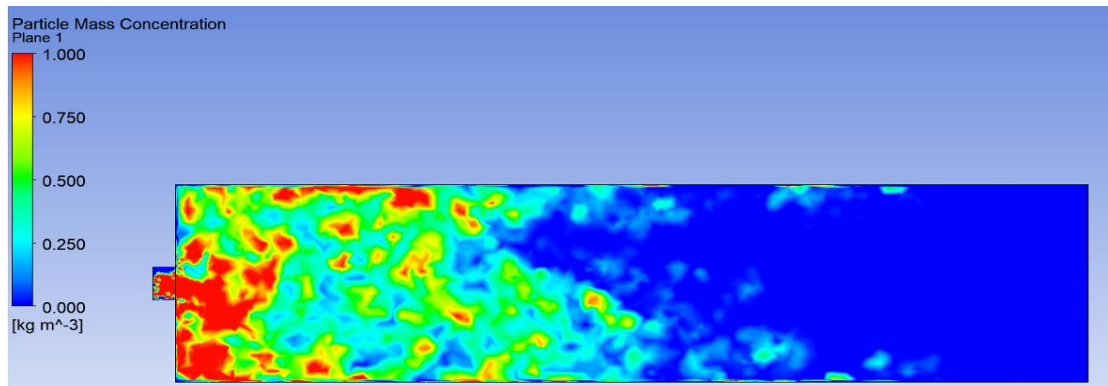


Рис. 2.30. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 65 с

При цьому, залишається «плямистим» розподіл концентрації ДДВС. На час 85 с концентрації ДДВС не досягає вогнегасних властивостей у всьому об'ємі (рис. 2.31).

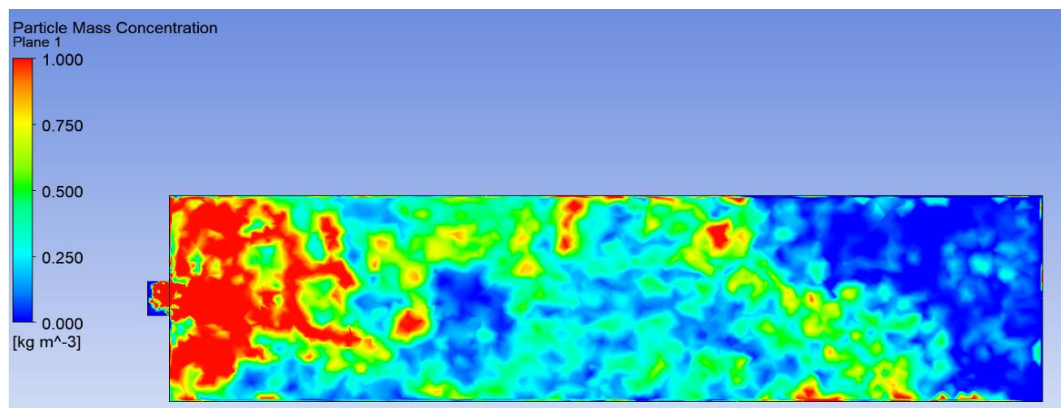


Рис. 2.31. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 85 с

В той же час, на цей час частки води наявні у всьому об'ємі модельного приміщення (рис. 2.32). З цього слідує, що для оцінки вогнегасних властивостей є доцільним оцінювати розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя.

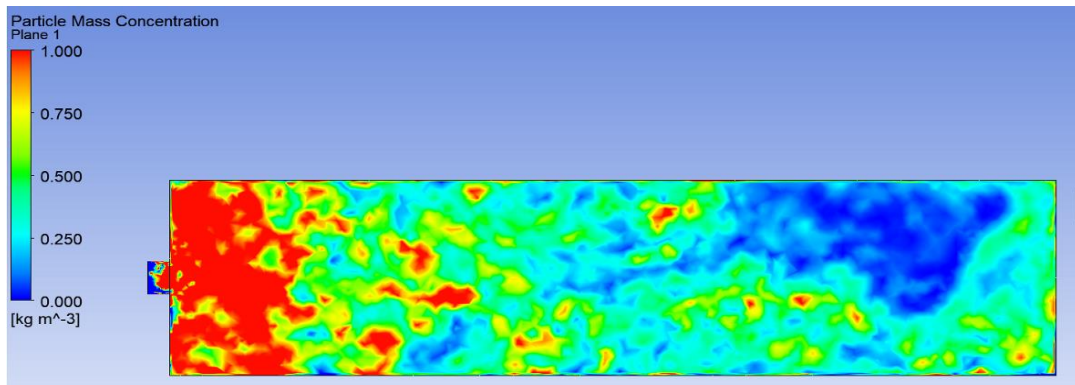


Рис. 2.32. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 100 с

На розрахунковий час 100 с спостерігаємо формування вогнегасної концентрації ДДВС з протилежної сторони модельного приміщення. Таким чином маємо, що за визначених розрахункових умов час розповсюдження ДДВС по модельному приміщенні довжиною 10 м з досягненням вогнегасної концентрації води склав $100 - 30 = 70$ с (на протязі 30 с здійснювалась продувка модельного приміщення повітрям). Звідси, маємо швидкість розширення вогнегасної здатності ДДВС у модельному приміщенні $10/70 = 0,14$ м/с.

Слід зазначити, що навіть після формування вогнегасної концентрації ДДВС з протилежної сторони модельного приміщення у об'ємі модельного приміщення залишаються області, де концентрація ДДВС не набуває вогнегасних властивостей. Під час подальшого нагнітання ДДВС у модельне приміщення відбувається переміщення таких областей (рис. 2.33, 2.34).

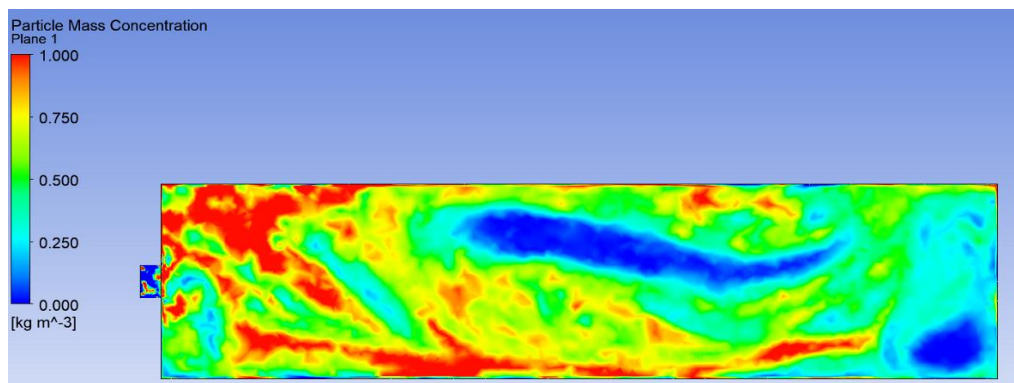


Рис. 2.33. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 140 с

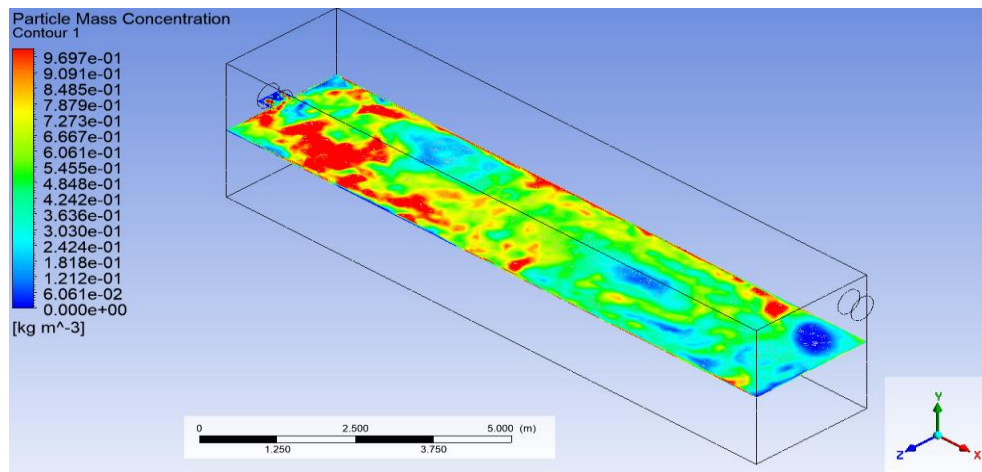


Рис. 2.34. Розподіл масової концентрації дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні на час 140 с у поздовжньо-горизонтальному перетині

Саме наявність таких областей та їх переміщення може пояснити той експериментальний результат [117, 118], що застосування дрібнодисперсного водяного струменя призводить не до припинення пожежі, а до її контролю та стабілізації розвитку. Переміщення подрібнених крапель води відбувається під дією динамічного тиску газового потоку. Тому розглянемо зміну швидкості газового потоку у модельному приміщенні під час нагнітання дрібнодисперсного водяного струменя.

Результати розрахунку швидкості газового потоку у поперечному перетині модельного приміщення на час 85 с (рис. 2.35).

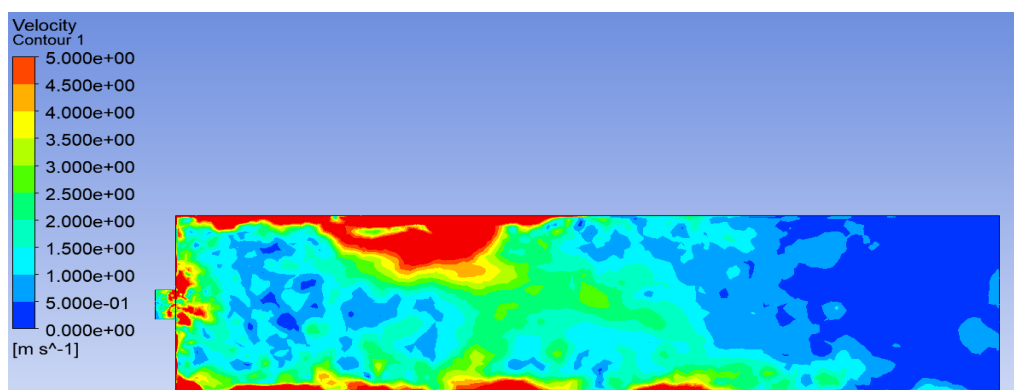


Рисунок 2.35 – Розподіл швидкості газового потоку у модельному приміщенні на час 85 с

Кольорова шкала швидкості газової течії наведено з лівої сторони рисунка. Спостерігаємо, що в локальних областях виникають швидкості газового потоку, що досягають 5 м/с. Але по більшості перетину модельного приміщення швидкість газового потоку не перевищує 0,5–2 м/с. Але у будь якого випадку, швидкість газового потоку є у декілька разів вищою за швидкість розширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя.

Слід зазначити, що на розрахункових кроках виявлено наявність локальних зон з високою швидкістю газового потоку (рис. 2.36).



Рис. 2.36. Розподіл швидкості газового потоку у модельному приміщенні на час 140 с

Такий розподіл швидкості відповідає появі вихрових зон у модельному приміщенні. Звідси витікає, що у разі наявності перешкод у модельному приміщенні виникаючи вихори будуть впливати на створення вогнегасної концентрації дрібнодисперсного водяного струменя.

2.5 Розрахунок витрат енергії на подрібнення води

Проведемо оцінку максимальної продуктивності генератора дрібнодисперсного водяного струменя. За вище наведеними результатами досліджень встановлено, що розпилення води відбувається під дією високошвидкісного газового потоку. Здійснимо оцінку повної хімічної енергії,

що виділяється у стволі діаметром 20 мм та довжиною 1 м в результаті детонації пропано-повітряної суміші. Приймаємо, що суміш є стехіометричною. Також врахуємо, що суміш є стисненою, де середня густина суміші перевищує густину суміші за атмосферним тиском у 1,5 рази. За визначених розмірів маємо об'єм суміші у стисненому стані, що дорівнює 0,31 л. З приведенням суміші до нормального тиску маємо об'єм близько 0,5 л. Об'ємна частка пропану у стехіометричній суміші з повітрям складає 1/26. Звідси, частка пропану у заряді об'ємом 0,5 л дорівнює 19,2 мл. За густини пропану 2,019 кг/м³ маємо масу пропану у заряді, що дорівнює 39 мг. Питома теплота згорання пропану дорівнює 48 МДж/кг. Таким чином, під час одного детонаційного циклу виділяється 1,86 кДж хімічної енергії.

Необхідні мінімальні витрати енергії на формування ДДВС оцінимо за зміною поверхневої енергії рідини за допомогою виразу:

$$E_{\min} = \sigma_{\text{пов}} \cdot S = N \cdot \sigma_{\text{пов}} \cdot S_{\text{кр}}, \quad (2.23)$$

де N – кількість крапель;

S – площа вільної поверхні рідини;

$\sigma_{\text{пов}}$ – коефіцієнт поверхневого натягу;

$S_{\text{кр}}$ – площа поверхні краплі.

Кількість крапель, що формується в результаті подрібнення початкового об'єму рідини V_0 , та які набувають сферичну форму, визначимо за виразом:

$$N = \frac{V_0}{\frac{4}{3}\pi R_{\text{кр}}^3}, \quad (2.24)$$

де $R_{\text{кр}}$ – радіус краплі води.

За довідниковими даними коефіцієнт поверхневого натягу води дорівнює 73 мН/м. На підставі виразів 2.23 та 2.24 маємо, що на подрібнення 1 л води на

краплі розміром 5 мкм необхідно витратити енергію, що дорівнює приблизно 11 Дж. Враховуючи чинник низької ефективності перетворення енергії ударної хвилі на процес подрібнення води та не високий коефіцієнт перетворення хімічної енергії, що виділяється в результаті детонації, в ударну хвилю, можливо припустити забезпечення подрібнення декількох десятків грамів води за один детонаційний цикл.

2.6 Висновки до розділу 2

1. З метою якісного дослідження процесу формування дрібнодисперсного водяного струменя у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії було поставлено до розгляду дві підзадачі – заповнення водою ствола установки та дії ударної хвилі на цівку води у стволі.

2. Дослідження процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем проводилось виходячи з продуктивності розробленої установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

3. Розроблені математичні моделі та проведено математичне моделювання у програмному середовищі процесів нагнітання води у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з подальшим подрібненням води ударною хвилею та для моделювання заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем. Для моделювання процесів нагнітання води та подрібненням води у стволі установки застосовано VOF-модель (модель об'єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє, та яка базується на методі відстежування поверхні, що застосовується до фіксованої ейлерової сітки. Для дослідження процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем застосовано модель дискретної фази в наближенні Ейлера – Лагранжа.

4. За результатами математичного моделювання процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою виявлено порівняно високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до

газодетонаційних процесів у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, що вказує на недоцільність застосування імпульсного впорскування води у ствол установки. Результати математичного моделювання процесу подрібнення цівки води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії під дією ударної хвилі виявили високу якість розпилення води під дією високошвидкісного газового потоку та показали, що основний процес подрібнення води відбувається не під дією ударної хвилі, а під дією високошвидкісного газового потоку, що рухається за ударною хвилею. В умовах проведеного моделювання час заповнення всього модельного приміщення дрібнодисперсного водяного струменя склав 85 секунд а густина крапель води у повітрі, за якої досягається гасіння пожежі, була досягнута через 100 с. При цьому, швидкість поширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні склала 0,14 м/с.

5. За розрахунками витрат енергії на подрібнення води та оцінки повної хімічної енергії, що виділяється у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії діаметром 20 мм та довжиною 1 м в результаті детонації пропано-повітряної суміші з урахування ефективності подрібнення води передбачено подрібнення декількох десятків грамів води за один детонаційний цикл.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ СИСТЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ З МЕТАННЯ ГАЗОДЕТОНАЦІЙНИМ ЗАРЯДОМ

В розділі проведено дослідження імпульсної системи пожежогасіння подібним до технології IFEX, що заснована на імпульсному розпилюванні води у стволі під дією високошвидкісного газового струму. Періодичність таких імпульсів за технологією IFEX складає приблизно 1 постріл за 5 секунд. Але на відміну від технології IFEX, де такий потік газу утворюється в результаті розширення попередньо стисненого газу, в установці, що пропонується, такий потік утворюється в результаті детонації горючої газової суміші з подальшим розширення продуктів газової детонації. Із-за відмінностей типів зарядів, що формують струм газу, виникає необхідність у дослідженні таких систем.

3.1 Будова та принцип дії імпульсних систем гасіння пожеж з метання газодетонаційним зарядом

Будова установки імпульсного пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини представлено на рисунку 3.1 [119]. В зарядній секції 3 формується газодетонаційний металевий заряд за рахунок заповнення його сумішшю пропану-бутану технічного з киснем у стехіометричному співвідношенні. Вода подається в секцію прискорення 5 через отвір 4. Ініціювання газодетонаційного металевих заряду в зарядній секції 3 здійснюється за допомогою свічки запалювання 7 [119].

Установка пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини працює наступним чином. Спочатку в секцію 5 прискорення здійснюється подача вогнегасної речовини (води) через шланг 4. Далі відкривається клапан 2 і здійснюється подача суміші пропану-бутану технічного з киснем (або повітрям). Під дією стисненої газової суміші відбувається витіснення води з зарядної секції 3. Після заповнення установки горючою

сумішшю, клапан 2 закривається. У подальшому відбувається запалювання суміші від свічки запалювання 7. Розповсюдження полум'я у стволі призводить до переходу горіння у детонацію. З результаті згорання суміші відбувається зростання температури та тиску газу. Під дією високого тиску газу здійснюється прискорення води у секції прискорення з подальшим її розпилювання під дією високо-швидкісного струменю продуктів детонації [119].

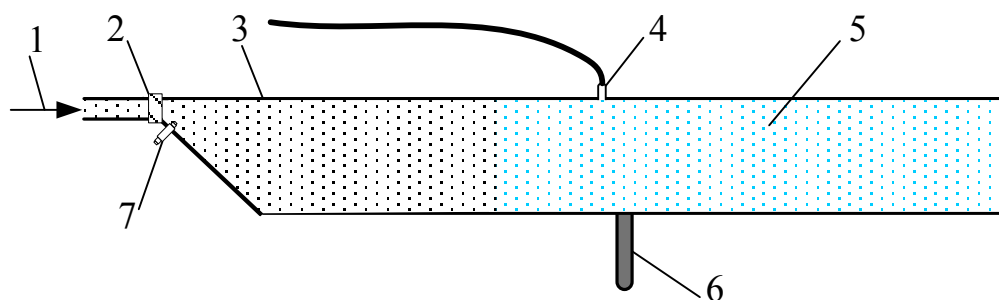


Рис. 3.1. Установка пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини: 1 – подача суміші пропану-бутану технічного з киснем (або повітрям); 2 – клапан; 3 – зарядна секція; 4 – шланг для подачі вогнегасної речовини (води), 5 – прискорювальна секція з вогнегасною речовиною (водою), 6 – рукоятка, 7 – свічка запалювання [119]

На відміну від установки IFEX, в установці пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення виключається необхідність використання швидкодіючого клапану на контактній поверхні рідина-газ. Достатньо застосування клапану значно меншого перетину для подавання горючої суміші під меншим тиском. Це знижує технічні вимоги до клапану, з відповідним зниженням вартості установки.

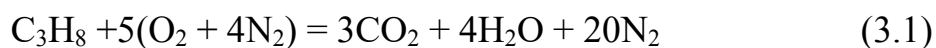
Використання в якості метального заряду горючого газу дозволяє досягти більш високої швидкості при подачі дрібнодисперсного водяного струменя. А детонаційне згорання таких зарядів створює умови для отримання стабільних параметрів імпульсних струменів.

Підвищення температури і тиску в метальному заряді призводить не тільки

до збільшення дисперсності крапель водяного струменя, але і до підвищення далекобійності та ефективності гасіння. Використання хімічної енергії згорання пального газу замість потенційної енергії стисненого газу призводить до багаторазового зниження витрат газу на постріл [119].

Розглянемо можливість покращення параметрів цієї установки за рахунок використання горючих газових сумішей замість стисненого повітря. Наприклад, згорання суміші пропану з повітрям у замкненому об'ємі забезпечує зростання тиску у 7–8 разів. Таким чином, для отримання тиску 2,5 МПа початковий тиск суміші складе біля 0,35 МПа. Відповідно, ще зменшує витрату повітря у 7–8 разів, що обґрунтовано нижче [119, 120].

Розрахуємо витрату повітря для проведення пострілу за допомогою суміші пропану з повітрям. Рівняння згорання пропану набуває вигляд:



Звідси, у стехіометричній суміші об'ємна частка пропану у повітрі складає 3,85 %. Тому в оціночному розрахунку нехтуємо складовою пропану. Приймаємо, що об'єм зарядної секції дорівнює 1 л з ізотермічним нагнітанням газу у цю секцію під тиском 0,35 МПа [119, 120]. Таким чином, з проведенням до нормальних умов газу, об'ємна витрата повітря складе 3,5 л/постріл, а масова витрата повітря дорівнює 4,5 г/постріл. Масова частка пропану у стехіометричній суміші пропану з повітрям складає 5,8 %. Звідси, витрата пропану на постріл буде дорівнювати 0,26 г/постр. Маємо, що для здійснення 100 пострілів цією установкою необхідно лише 26 г пропану.

3.2 Дослідження установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини

Передбачалося проведення дослідження тиску, що виникає у газодетонаційному заряді під час метання води, та дослідження далекобійності

дрібнодисперсного водяного струменя.

Для дослідження тиску продуктів детонації було створено експериментальну установку згідно схеми (рис. 3.2).

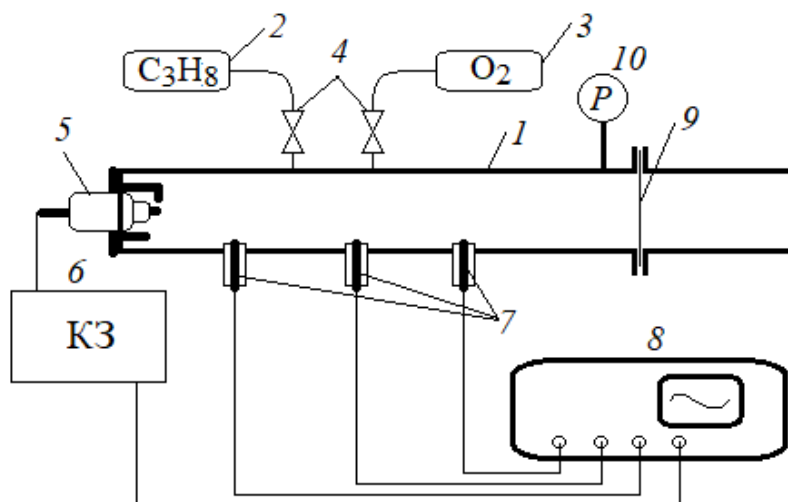


Рис. 3.2. Схема установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини: 1 – зарядна секція; 2 – балон пропановий; 3 – балон кисневий; 4 – клапани; 5 – свічка запалювання; 6 – котушка запалювання; 7 – датчики тиску; 8 – осцилограф; 9 – розривна мембрана; 10 – манометр

Дослідження проводилось наступним чином. Спочатку зарядна секція 1 продувалась киснем (рис. 3.2). Далі в зарядну секцію 1 по черговому з балонів 2 та 3 подавались пропан та кисень. Управління подаванням газів здійснювалось за допомогою клапанів 4. Розривна мембрана 9 обмежувала вихід газової суміші назовні. Склад горючої суміші задався по об'ємній долі компонентів суміші, де об'ємна доля визначалась по парціальному тиску цих компонентів. Вимірювання парціального тиску здійснювалось манометром 10 під час по чергового подавання кисню та пропану. Після формування суміші ініціювання запалення суміші здійснювалось за допомогою свічки запалювання 5. Сигнал з котушки запалювання 6 одночасно подавався як на свічку запалювання 5, так і на осцилограф 8. Сигнал від котушки 6 слугував сигналом запуску вимірювання. Запалювання горючої суміші та її розповсюдження по зарядній секції призводить

до зростання тиску у продуктах детонації, що фіксувалось датчиками тиску 7.

Для проведення досліджень використано суміш СПБТ, де співвідношення пропану до бутану складає близько 50/50. Для цього складу горючого газу у стехіометричному складі з киснем доля СПБТ складає 1/7. Відповідно, доля кисню у горючій суміші дорівнює 6/7. Тому, наприклад, для утворення горючої суміші з початковим абсолютним тиском 0,2 МПа, після продувки зарядної секції киснем далі додатково нагнітався кисень до відносного тиску 0,071 МПа. Після цього в зарядну секцію подався СПБТ газ до досягнення тиску 0,2 МПа. Дослідження проведено для значень початкового тиску газу у 0,1 МПа та 0,15 МПа.

Дослідження далекобійності дрібнодисперсного водяного струменя здійснювалось за наступною схемою (рис. 3.3).

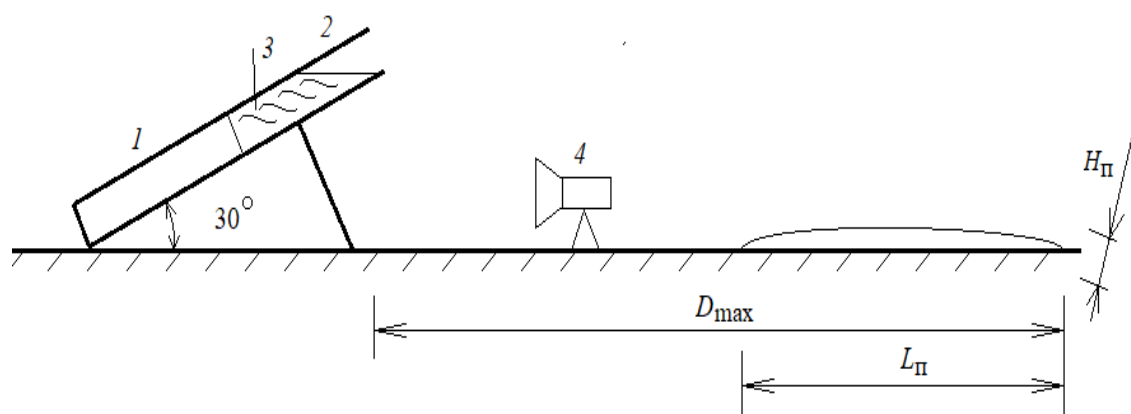


Рис. 3.3. Схема дослідження далекобійності дрібнодисперсного водяного струменя в установці пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини: 1 - зарядна секція, 2 – прискорювальна секція, 3 – вода, 4 – відеокамера

Установка пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини встановлювалась на земну поверхню під кутом 30 °. Далі відбувалось заповнення зарядної секції 1 згідно вище описаного алгоритму. Після цього заповнювалась водою 3 прискорювальна секція 2. Далі включалась камера 4 на

відеозапис та здійснювався постріл. Після осадження дрібнодисперсного водяного струменя на земну поверхню вимірювались далекобійності $D_{\max}$ ДДВС, довжина $L_{\text{п}}$ та ширина $H_{\text{п}}$ дрібнодисперсного водяної плями [118].

Постріл здійснювався за початкового тиску газу, що дорівнював 0,1 МПа, 0,15 МПа та 0,2 МПа. Довжина прискорювальна секція склала 0,6 м. Об'єм водяного пострілу дорівнював близько 1,7 л.

3.3 Результати експериментального дослідження установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини

Результати вимірювання тиску, що виникає у зарядній секції під час детонації пропано-кисневого заряду представлено на рисунках 3.4 та 3.5. На рисунку 3.4 результати вимірювання відносяться до початкового тиску заряду, що дорівнює атмосферному.

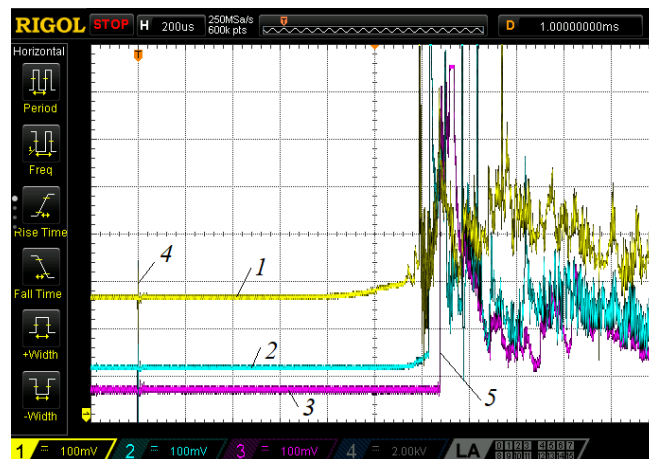


Рис. 3.4. Результати вимірювання тиску, що виникає у зарядній секції, з початковим тиском заряду 0,1 МПа: 1, 2, 3 – сигнали з датчиків тиску; 4 – імпульс запалювання; 5 – момент виникнення детонації (масштаб: 200 мкс/поділ.)

За результатами вимірювань спостерігаємо, що на першому датчику (сигнал № 1) відбувається поступове зростання тиску. На другому датчику (сигнал № 2) спостерігаємо перед початком вибухового згорання палива

поступове зростання тиску на протязі 100 мкс. На третьому датчику (сигнал № 3) маємо різке зростання тиску з початкового значення до максимального. При цьому, фронт зростання тиску складає мікросекунди. Таке зростання тиску є характерним для детонаційного згорання палива. Це дає підстави про виникнення детонації у зарядній секції [118].

Стиснення заряду перед вибуховим згоранням суміші, що фіксується на другому датчику, відповідає процесу переходу горіння в детонацію, якій відображається в формуванні хвилі стиснення перед трансформацією згорання у детонаційне. Спостерігаємо, що між часом запалювання суміші та початком її детонаційного згорання виникає затримка у часі, що дорівнює 1200-1300 мкс. Враховуючи, що час метання води в установці пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини може складати декілька мілісекунд, така затримка не буде впливати на параметри пострілу. Чутливість датчиків, що застосовані, дорівнює 146 мВ/МПа. Маємо, що амплітуда тиску на другому датчику досягає понад 700 мВ, а на третьому – близько 600 мВ. Звідси, маємо відносний тиск на другому датчику у 4,798 МПа, а на третьому – 4,1 МПа. Відомо, що під час переходу горіння у детонацію у стволі виникає перестиснення детонаційної хвилі, що спостерігається по результатах вимірювання. Тому будемо враховувати значення тиску на третьому датчику. За результатами математичного моделювання визначено, що розпилювання води переважно відбувається під дією газового потоку. Тому тиск потрібно враховувати не на фронті ударної хвилі, а у потоці за фронтом хвилі. Відомо, що цей тиск є приблизно у два рази нижчий, ніж тиск на фронті детонаційної хвилі. Це дає підстави прийняти, що метання води у розробленій установці за атмосферного початкового тиску заряду відбудеться під тиском продуктів детонації понад 2 МПа. На рисунку 3.4 спостерігається прискорене падіння тиску після детонації у зв'язку з розширення газу у повітрі. Слід зазначити, що під час прискорення води падіння тиску у часі є довшим.

На рисунку 3.5 результати вимірювання відносяться до початкового тиску заряду, що перевищує атмосферний тиск у 1,5 рази.

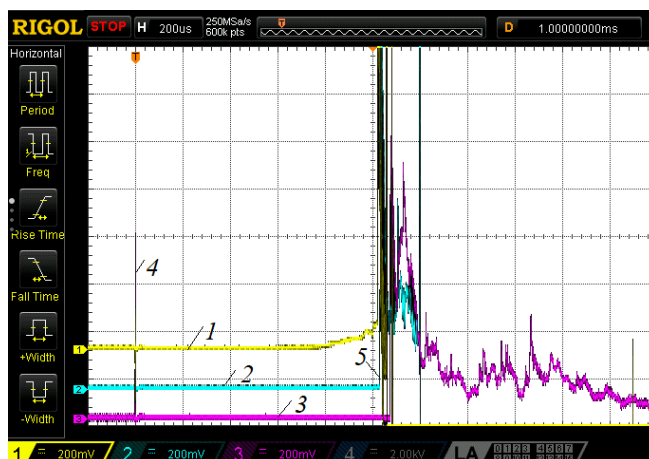


Рис. 3.5. Результати вимірювання тиску, що виникає у зарядній секції, з початковим тиском заряду 0,15 МПа: 1, 2, 3 – сигнали з датчиків тиску; 4 – імпульс запалювання, 5 – момент виникнення детонації (масштаб: 200 мкс/поділ.)

За результатами вимірювань маємо, що підвищення тиску призвело до скорочення часу та довжини переходу горіння у детонацію. Спостерігаємо (рис. 3.5), що детонаційна хвиля вже сформована в точці розміщення другого датчика тиску. А процес стиснення горючого заряду з подальшим його вибуховим згорання має місце в точці розміщення першого датчику. З порівняння рисунків 3.4 та 3.5 маємо, що час переходу горіння у детонацію скоротився з 1300 мкс при початковому тиску заряду, що дорівнює атмосферному, до 1030 мкс при зростанні початково тиску у 1,5 рази.

Наявність детонаційного згорання також підтверджується за оцінкою швидкості розповсюдження ударної хвилі. Для цього отримано більш детальну розгортку зміни тиску у часі (рис. 3.6.).

Зокрема, інтервал часу між різким зростанням тиску на другому та третьому датчиках приблизно дорівнює 42 мкс. Відстань між датчиками дорівнює 114 мм. Звідси, маємо швидкість розповсюдження ударної хвилі, що дорівнює 2714 м/с. Зазначена швидкість відповідає швидкості розповсюдження детонаційної хвилі у пропано-кисневій суміші.

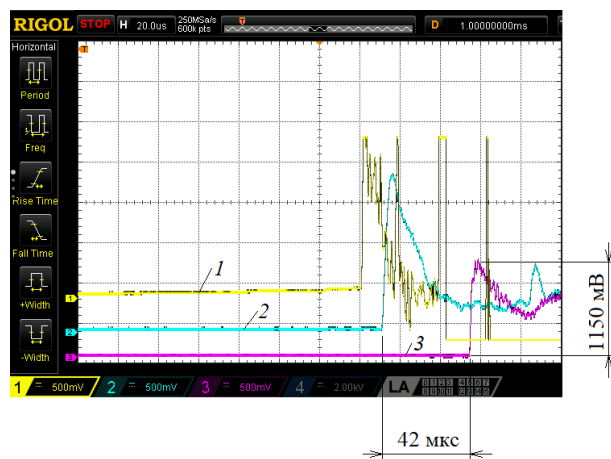


Рис. 3.6. Результати вимірювання тиску, що виникає у зарядній секції, з початковим тиском заряду 0,15 МПа: 1, 2, 3 – сигнали з датчиків тиску (масштаб: 20 мкс/поділ.)

Враховуючи особливості протікання процесу переходу горіння в детонацію, необхідно знехтувати амплітудою тиску, що виникає на другому датчику, бо вона відноситься до перестисненої детонації. На третьому датчику маємо амплітуду тиску у 1150 мВ, що відповідає відносному тиску у 7,87 МПа. Маємо, що співвідношення амплітудних значень абсолютних тисків на третьому датчику під час детонації за початкових тисків заряду 0,15 МПа та 0,1 МПа дорівнює $8,87/5,8 = 1,53$ рази. У зв'язку з тим, що формування зарядів у цих варіантах досліджень здійснювалось за однакової температури, то зростання початкового тиску газу досягалось за рахунок зростання густини газового заряду, яке відбулося у 1,5 рази. Наявна пропорційність між кратністю зростання густини заряду та співвідношенням абсолютних тисків підтверджує достовірність вимірювань. Також отримуємо висновок, що для підвищення потужності пострілу є доцільним підвищення густини пропано-кисневого заряду [118].

Результати фотографічного дослідження формування дрібнодисперсного водяного струменя у дослідній установці імпульсного пожежогасіння представлено на рисунку 3.7 [117].



Рис. 3.7. Результати по-кадрового дослідження розпилювання води під час пострілу з дослідної установки імпульсного пожежогасіння за абсолютного початково тиску заряду 0,1 МПа

Відеозйомка пострілу водою здійснювалась з частотою 25 Гц, що дорівнює інтервалу часу між відеокадрами у 40 мс. Спостерігаємо, що передній фронт дрібнодисперсного водяного струменя через 40 мс від початку ініціювання детонації досягає близько 2 м. Звідси, на цій ділянці маємо середню швидкість розповсюдження дрібнодисперсного водяного струменя у 50 м/с. Враховуючи інтенсивне затухання швидкості дрібнодисперсного водяного струменя під час його розповсюдження у повітрі, початкова швидкість виходу струменя зі ствола перевищує 50 м/с. Густина води у струмені по осі пострілу перевищує відповідну густину на периферії струменю.

Також спостерігаємо, що через 160 мс від початку пострілу вихід дрібнодисперсного водяного струменя з установки завершується. Огляд установки після пострілу показав відсутність води у секціях установки. При цьому, маємо якісне розпилювання води на протязі всього пострілу. Це свідчить про

ефективне розпилювання води в розробленій установці імпульсного пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини.

Результати дослідження залежності характеристик пострілу в дослідній установці від початкового тиску пропано-кисневого заряду при куті нахилу ствола 30 градусів представлено в таблиці 3.1. Обробка результатів дослідження здійснювалась методом найменших квадратів. Приймалось, що довірча ймовірність дорівнює 90 % [118].

Таблиця 3.1.

Залежність характеристик пострілу в дослідній установці

№ дослідів	Початковий тиск заряду, МПа	Далекобійність ДДВС, м		Ширина струменю, м	
1	0,1	15	$15 \pm 1,67_{0,9}$	3	$2,8 \pm 0,49_{0,9}$
2		14		2,5	
3		16		3	
4	0,15	20	$19,8 \pm 0,5_{0,9}$	3,5	$4 \pm 0,59_{0,9}$
5		20,5		4	
6		19		4,5	
7	0,2	23	$23,3 \pm 1,0_{0,9}$	4,5	$4,8 \pm 0,49_{0,9}$
8		24		5	
9		23		5	

З отриманих результатів спостерігаємо, що далекобійність дрібнодисперсного водяного струменя не є прямо пропорційною ступеню зростання початкового тиску заряду. Це пояснюється аеродинамічним спротивом розповсюдження струменю, що викликає його нелінійне затухання. Спостерігаємо, що зі зростанням далекобійності відбувається зростання ширини струменю.

На підставі проведених досліджень отримані наступні характеристики

установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини (табл. 3.2) [118].

Таблиця 3.2.

Характеристика установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини

Параметри	Од.вим.	Характеристика
Тип заряду	—	Пропано-повітряний / пропано-кисневий
Діаметр ствола	мм	71
Об'єм вогнегасного заряду в стволі	л	1-2
Об'єм горючого газового заряду за н.у.	л	1,7
Надлишковий тиск заряду	МПа	0,16-0,3
Довжина зарядної секції	м	0,38
Довжина прискорювальної секції	м	0,6

З отриманих результатів маємо, що на 1 л водяного пострілу витрачається 1,7 л горючого газового заряду, приведенного до нормальних умов. В результаті детонації цього заряду тиск продуктів детонації зростає у 16 разів. Тому, для здійснення пострілу з подібними параметрами за допомогою повітря необхідно його подавати під тиском 0,16 МПа. Звідси маємо, що витрати горючого газового заряду з розробленій установці пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини є в 16 разів меншими, ніж в імпульсних установках на стисненому повітрі.

3.4 Висновки до розділу 3

1. На відміну від установки IFEX, в установці пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення виключається необхідність використання швидкодіючого клапану на контактній поверхні рідина-газ.

Стрибкоподібне зростання тиску при детонації паливно-кисневих сумішей в 15-20 разів дозволяє в системі подачі газу знизити робочий тиск, при цьому зменшується вартість установки.

2. Обґрунтовано та досліджено імпульсну систему гасіння пожежі з метання газодетонаційним зарядом, що дозволила провести вимірювання тиску, що виникає у газодетонаційному заряді під час метання води, та дослідження далекобійності дрібнодисперсного водяного струменя. Дослідження проведено для значень початкового тиску газу у 0,1 МПа та 0,15 МПа. Довжина прискорювальної секції склала 0,6 м. Об'єм водяного пострілу дорівнював близько 1,7 л.

3. Проведені експериментальні дослідження, щодо встановлення параметрів роботи установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини. Встановлено, що при застосуванні заряду об'ємом 2 л при початковому тиску 0,2 МПа далекобійність струменя перевищила 23,3 м з максимальним радіусом розкриття струменя до 4,8 м. За встановленими параметрами роботи установки визначено сферу її застосування, а саме для створення протипожежних бар'єрів, захисних екранів, для гасіння пожеж на далеких відстанях та на важкодоступній місцевості.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ВОДЯНИМ СТРУМЕНЕМ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПЕРІОДИЧНО-ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ

В розділі проведено дослідження установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дрібнодисперсним водяним струменем заснований на розпиленні води продуктами детонації у стволі установки. В установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії подавання води у ствол здійснюється безперервно, а імпульсне розпилювання води продуктами детонації відбувається з частотою 23–24 Гц.

4.1 Будова установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та принцип формування дрібнодисперсного водяного струменя

В основу побудови установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії було покладено детонаційний ствол установки, до якого додавався спеціальний насадок для подавання води. Передбачалося застосування двох варіантів будови насадку. За першим варіантом струмінь води подавався безпосередньо у ствол установки (рис. 4.1) [117, 121].

За цим варіантом струмінь води формувався поперек осі ствола. За другим варіантом впорскування води відбувалось поблизу вихідного торця ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії (рис. 4.2) [117, 121]. Спеціальний насадок за другим варіантом встановлюється на виході зі ствола установки.

Насадок складався з множини форсунок, що розміщувались по колу торця ствола установки, та ствол для спрямування потоку дрібнодисперсного водяного струменя.

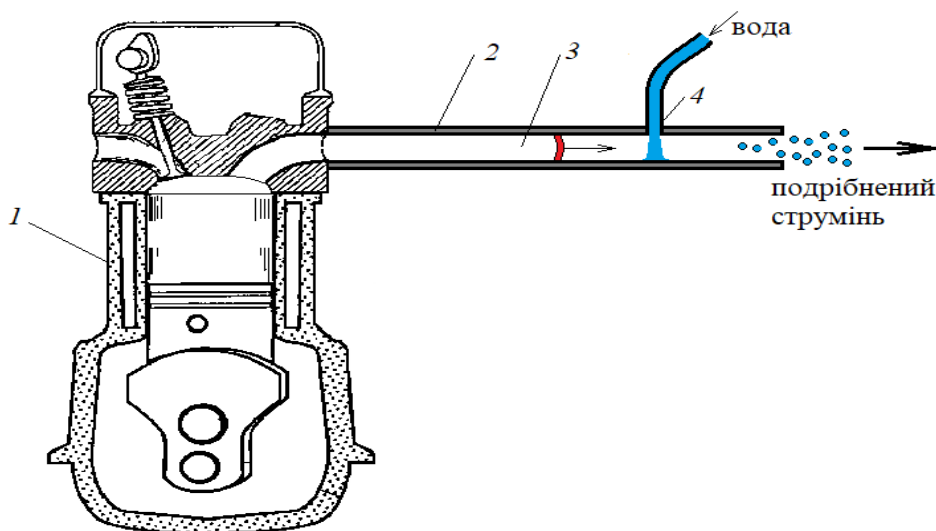


Рис. 4.1. Будова установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії:
1 – компресор установки; 2 – ствол установки; 3 – продукти детонації;
4 – спеціальний насадок для подавання води

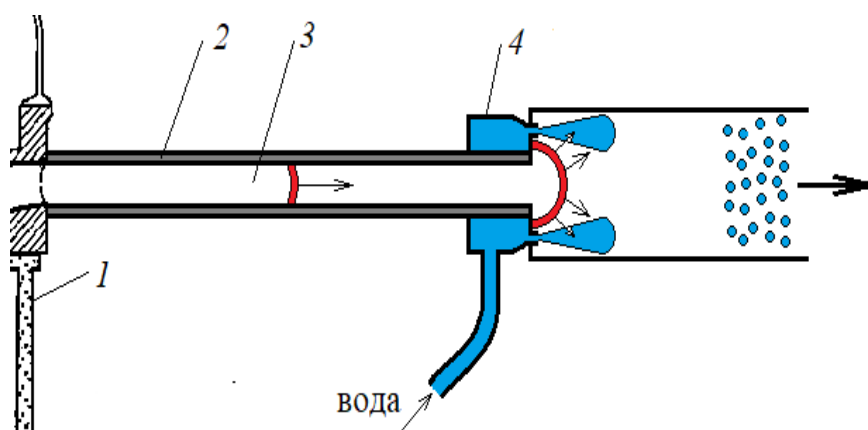


Рис. 4.2. Будова насадка до установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – компресор установки; 2 – ствол установки; 3 – продукти детонації, 4 – спеціальний насадок для подавання води

Принцип формування дрібнодисперсного водяного струменя установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії полягає у безперервному подаванні води через форсунки та періодичної дії на цівки води ударних хвиль, що призводить до їх дрібнодисперсного розпилення. УПГПД створює ударні хвилі з частотою 23-24 Гц. Звідси, інтервал часу між ударною дією складає $1/23 = 0,043$ с. Вільне переміщення тіла під дією сили тяжіння визначається за

рівнянням $gt^2/2$, що стосовно інтервалу часу, що розглядається, складе $9,8 \times (0,043)^2 / 2 = 0,009$ м. За такого переміщення можна припустити, що цівки води «зависають» у просторі перед стволом [117, 121]. В результаті, ударна хвиля переважно діє на цівки води, чим досягається ефективне розпилення. Також, під час виходу зі ствола геометрія розповсюдження ударної хвилі перетворюється з плоскої у напівсферичну форму. Таке розширення сприяє розпилюванню води завдяки розширенню перетину потоку, за яким розповсюджуються продукти детонації. Після розпилення води дуже важливо здійснити ймовірність протікання процесу з'єднання крапель в результаті їх зіткнення. Такому переміщенню сприяє режим продування ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії свіжим повітрям [117, 121].

Подавання води здійснювалось через 8 розпилювачів, які розташовувались по колу та мали наступну будову (рис. 4.3).

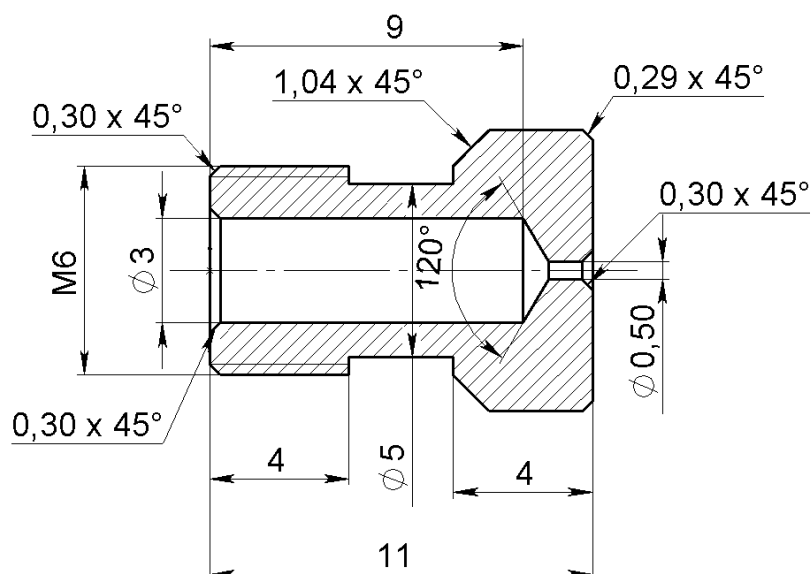


Рис. 4.3. Будова розпилювача, що встановлювався в насадку до системи пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем

Важливим показником системи пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем є витрата води на розпилення. Відповідно, під час досліджень виникла потреба у зміні продуктивності подачі води. Відомо, що

об'ємна витрата води через отвір визначається за рівнянням:

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_0)}{\rho}} \quad (4.1)$$

де α – витратний коефіцієнт;

F_0 – площа поперечного перетину отвору розпилювача;

P_1, P_0 – абсолютний тиск нагнітання води та зовнішній тиск, відповідно;

ρ – густина води.

З виразу (4.1) маємо, що об'ємна витрата води, що подається до системи пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем, визначається тиском, який створюється насосом живлення, та загальною площею поперечного перетину отворів розпилювачів. Тиск насоса визначається його технічними характеристиками, що ускладнює можливість його регулювання. Тому в даній роботі витрата води змінювалась шляхом застосування розпилювачів з різними отворами. Зокрема, отвори розпилювачів змінювались в діапазоні від 0,5 мм до 1,5 мм.

Передбачається, що система пожежогасіння ДДВС може житися від системи холодного водопостачання. Згідно [122], мінімальне значення тиску на вводі в будинок при висоті забудови в 1 поверх дорівнює 0,1 МПа. За мінімальний тиск для самопливного водопроводу з подачею води з встановленої на горіщі або іншому підвищенні накопичувальної ємності прийнято 0,03 МПа. Тому для нагнітання води за тиском, що відповідає мініимальному тиску у системі холодного водопостачання, застосовано мембранний насос високого тиску 0142УВ-12-80 з характеристиками, що наведено у таблиці 4.1.

Для визначення фактичної витрати води на розпилення проводилось вимірювання продуктивності за наступною схемою (рис. 4.4). Визначення витрат води на УПГПД було здійснено шляхом підключення шлангу подачі води з насоса до ствола з розпилювачами (рис. 4.4).

Таблиця 4.1.

Характеристики насосу 0142УВ-12-80, що застосовано у дослідженнях

№ з/п	Параметр	Значення
1	Номінальний тиск, МПа	0,9
2	Продуктивність, л/хв.	5,5
3	Потужність, Вт	80
4	Робоча напруга, В	12
5	Безперервний термін служби, год.	10000

Відбір води здійснювався з мірної ємності об'ємом 1 л. Далі включався мембранний насос високого тиску та здійснювалося вимірювання часу перекачування води за допомогою секундоміру. Визначення витрат здійснювалося по результатам п'яти вимірювань за однакових умов досліджень (фіксованого діаметру отвору розпилювачів) з метою отримання достовірного результату.

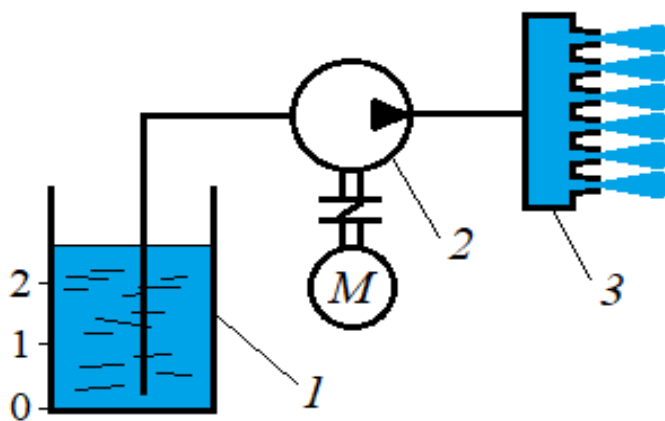


Рис. 4.4. Схема вимірювання витрати води: 1 – мірна ємність; 2 – насос; 3 – ствол з розпилювачами

Отримані результати досліджень оброблялись за методом найменших квадратів і наведені в таблиці 4.2 [123]. Приймалось, що довірна ймовірність дорівнює 90 %.

Таблиця 4.2.

Результати досліджень витрат води за діаметру отвору розпилювачів 1,5 мм.

№ з/п	Час наповнення, с	Витрата води, л/хв.	Середньоквадратична витрата води, л/хв.
1	11,0	5,45	5,51±1,91 _{0,9}
2	13,0	4,61	
3	9,8	6,6	
4	10,1	6,0	
5	12,2	4,9	

Отвори розпилювачів розташовувались під кутом до осі ствола. Таке розташування зроблене для збільшення площі взаємодії ударної хвилі з цівками води. Креслення ствола установки відображено на рисунку 4.5 [121].

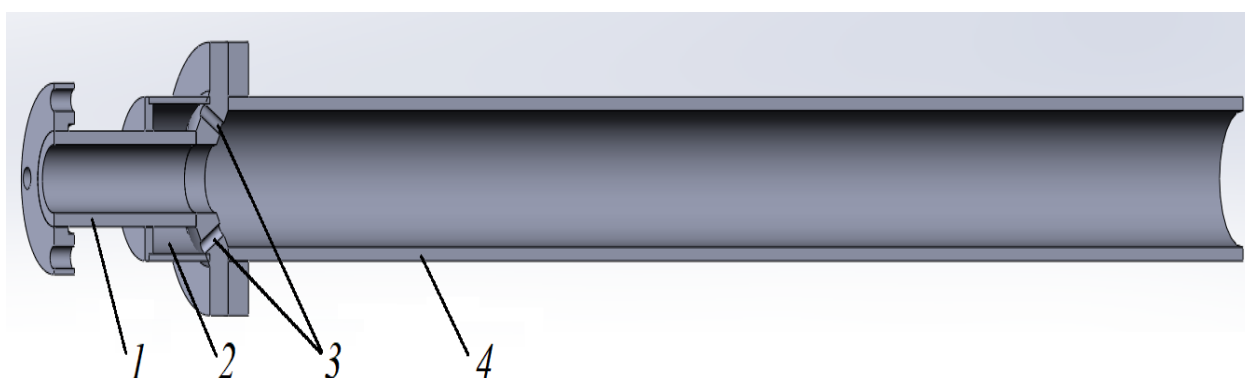


Рис. 4.5. Будова ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – частина ствола установки; 2 – канал нагнітання води; 3 – посадкові гнізда під розпилювачі; 4 – спрямляючий канал

Кут між віссю отвору розпилювача та віссю ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дорівнював 30°. Внутрішній діаметр спрямляючого каналу дорівнював 60 мм, а його довжина склала 500 мм. Вигляд ствола установки без спрямляючого каналу під час роботи представлено на рисунку 4.6. Спостерігаємо, що цівки палива, що виходять з розпилювачів,

перетинаються на певній відстані. Практично розпилювання води не відбувається. Тому формування дрібнодисперсного водяного струменя можливе в стволі лише за рахунок ударної дії детонаційної хвилі на цівки води [121].



Рис. 4.6. Вигляд ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії без спрямляючого каналу під час роботи

Практично відсутність попереднього розпилення води у розпилювачі викликана як низьким тиском нагнітання води, так і відносно великим діаметром отвору розпилювачів. Але в цій установці це є не недоліком, а перевагою. За рахунок відносно великого діаметру отворів практично унеможлиблюється забиття такого отвору твердими частками забруднень, що можуть бути у водопровідній системі. Можливість підключення системи пожежогасіння, що розробляється, до системи холодного водопостачання дозволяє забезпечити тривалий час роботи такої системи. Для порівняння, компанія Minimax (Німеччина) [98] пропонує систему пожежогасіння дрібнодисперсним водяним струменем з найменшим тиском, який досягає 1,6 МПа. Відповідно, така система потребує застосування водяного насосу, що створює такий тиск.

Коли вода безпосередньо подавалась у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, то застосовувалась система нагнітання з балона під тиском. Гідравлічна схема нагнітання води у ствол набувала вигляд (рис. 4.7).

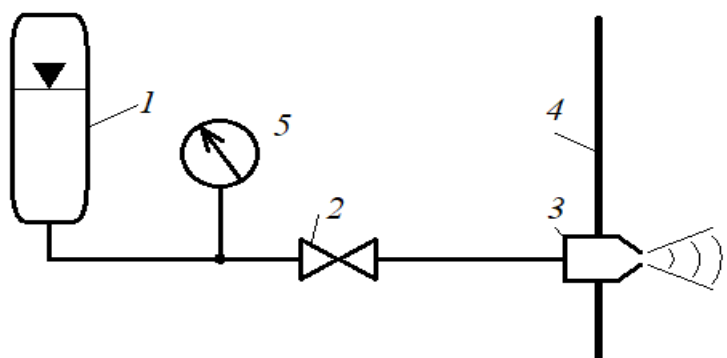


Рис. 4.7. Схема нагнітання води у ствол установки: 1 – балон з водою, 2 – кран, 3 – форсунка, 4 – ствол; 5 – манометр

Така схема є розповсюдженою у системах пожежогасіння. Керування подачею води в цьому випадку здійснюється за допомогою крану. Тиск нагнітання вимірювався за допомогою манометру. Площа внутрішнього перетину крану значно перевищувала площу отвору форсунки. Тому витрата води в цьому випадку залежить від тиском нагнітання води та діаметру отвору форсунки. У дослідженнях подача води відбувалась через форсунку, що мала один отвір.

Вимірювання фактичної витрати води, що подається до УПГПД здійснювалось за результатами вимірювання швидкості наповнення вимірювальної ємності. Вигляд цівки води, що подається через форсунку у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії (рис. 4.8).

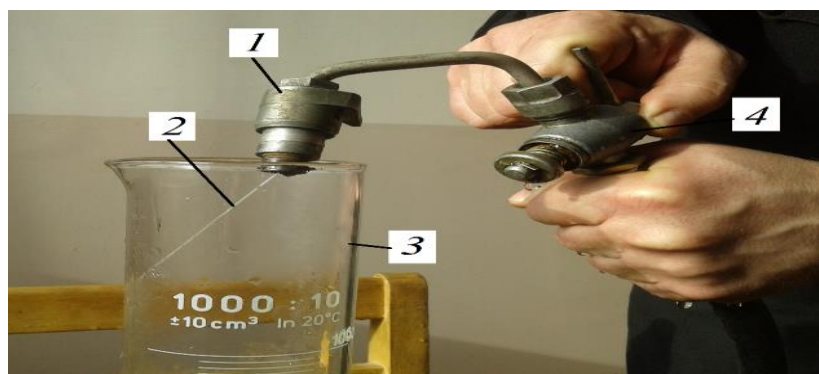


Рис. 4.8. Вигляд цівки води, що подається через форсунку у ствол установки: 1 – форсунка; 2 – цівка води; 3 – мірна ємність; 4 – кран

Спостерігаємо, що розпилення води під час подавання через форсунку не відбувається. Це свідчить про те, що формування дрібнодисперсного водяного струменя можливе лише під подальшою дією на цівку води ударної хвилі. Загальний вигляд розробленої установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії представлено на рисунку 4.9 [121, 124].

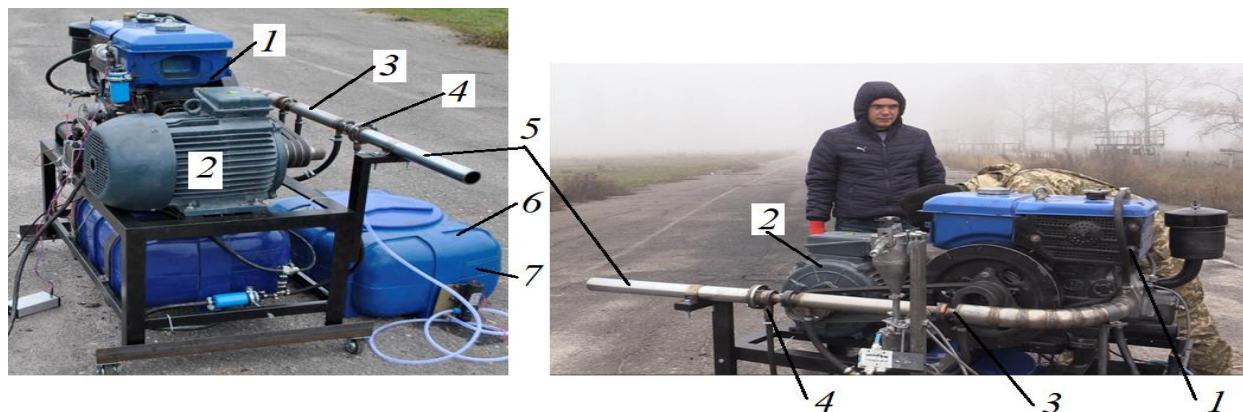


Рис. 4.9. Загальний вид установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – компресор установки; 2 – електричний привод; 3 – ствол установки; 4 – розпилювач ствола; 5 – спрямляючий канал; 6 – ємність; 7 – насос

Пуск установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії відбувається шляхом подавання електроживлення на електричний привод, систему управління установкою та насос живлення водою. Включення електричного приводу призводить до періодичного нагнітання газового заряду у стволі установки. Система управління установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії забезпечує дозоване нагнітання пропану у необхідний період часу у стволі та періодичне запалювання горючої суміші у стволі. Електричне живлення насоса призводить до безперебійного нагнітання води до ствола установки. Для виключення потрапляння води у компресор установки, що може призвести до виходу його з ладу, спочатку здійснюється включення електричного приводу та системи управління установкою, а потім включається живлення насоса. В цьому випадку за рахунок потоку газу виключається потрапляння води у компресор установки [121, 124].

4.2 Експериментальне дослідження параметрів ударної хвилі, що діє на цівку води

Ефективність подрібнення води визначається параметрами ударної хвилі, яка діє на цівку води. Для відтворення режиму формування дрібнодисперсного водяного струменя, що є подібним до розробленої системи пожежогасіння, виникає потреба у визначення цих параметрів. Таке дослідження проведено шляхом вимірювання тиску та швидкості розповсюдження ударної хвилі у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Вимірювання тиску здійснювалось прямим методом за допомогою датчику тиску. Враховувалось, що ударна хвиля створює тиск у газовому середовищі, що швидко змінюється у часі. Тому для вимірювань необхідно застосовувати датчик динамічного тиску. Датчики тиску відрізняються часом відгуку. Для визначення вимог до часу відгук датчику врахуємо, що ударна хвиля у газі має швидкість порядку 10^3 м/с. За розміру чутливого елементу датчику порядку 10^{-3} м маємо, що час відгуку в цьому випадку повинен мати порядок $10^{-3}/10^3 = 10^{-6}$ с. На підставі огляду датчиків динамічного тиску виявлено, що переважно вони є тензорезистивного або п'єзоелектричного типів. Типові датчики тензорезистивного типу мають час відгуку не менше, ніж 1 мс. Тому вони не задовольняють вище зазначеної вимоги. П'єзоелектричні датчики тиску мають час відгуку порядку 1 мкс, що є задовільним. Для вимірювань тиску застосовано датчик РСВ 113В22 фірми Piezotronics (табл. 4.3) [125].

Таблиця 4.3

Характеристики п'єзодатчику динамічного тиску 113В22

№ з/п	Показники	Значення
1	Час відгуку, мкс	до 1
2	Максимальний тиск, кПа	34475
3	Чутливість, мВ/МПа	146,1

Датчик має вбудований електронний підсилювач. Тому він потребує обмеженої температури експлуатації, яка не повинна перевищувати 135 °С. Під час детонаційного згорання палива температура продуктів детонації досягає 2000 °С і вище (в залежності від типу паливної суміші).

Враховуючи умови вимірювання, кожен з датчиків мав індивідуальне водяне охолодження. Два датчики встановлювались в ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії на відстані 300 мм один від одного (рис. 4.10) [117, 126].

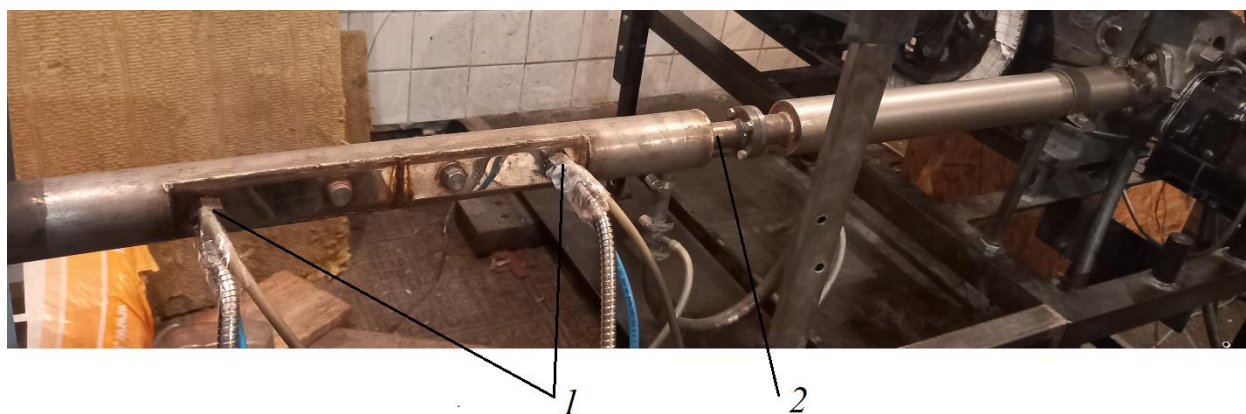


Рис. 4.10. Розташування датчиків тиску на стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – датчики тиску; 2 – ствол установки

Місце встановлення датчика, що ближче розташований до компресора, відповідає точці подавання води. Тому отримані значення тиску та швидкості детонаційної хвилі в цій точці визначають умови, за яких відбувається формування дрібнодисперсного водяного струменя.

Сигнали з датчиків тиску поступали на цифровий осцилограф Rigol DS1102E. Вигляд сигналів, що було отримано під час роботи установки, представлено на рисунку 4.11.

Спостерігаємо, що на сигнали з датчиків накладаються шумові сигнали, хоча сигнальний кабель екранувався. Наявність шумів викликана як високою чутливістю датчиків, так електромагнітним випромінюванням від асинхронного двигуна та іншого електрообладнання. Разом з тим, рівень шуму є значно

нижчим, ніж сигнал, що вимірювався.

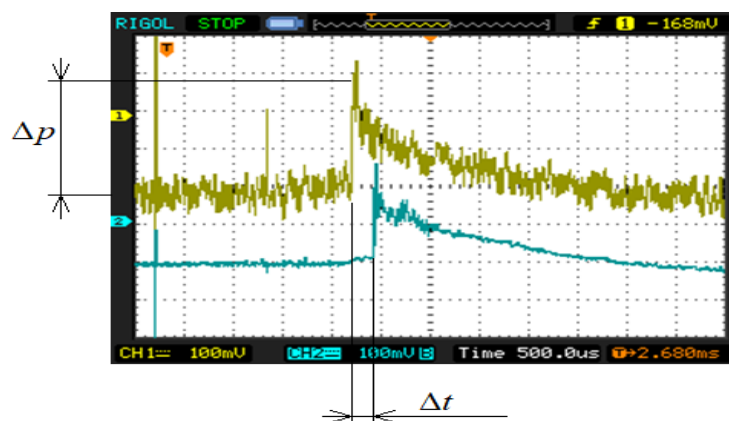


Рис. 4.11. Результати вимірювання тиску у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії (в області подавання води)

Відомо, що на фронті ударної хвилі відбувається різке зростання тиску по відношенню до початкового тиску газу. Тому область різкого зростання тиску на осцилограмі відображає час досягнення ударної хвилі даного датчику. Відповідно, інтервал часу між різкими зростаннями тиску відповідає різниці у часі проходження ударної хвилі повз датчиків, що дорівнює $\Delta t = 190\text{--}200$ мкс. Звідси, отримуємо швидкість ударної хвилі $1500\text{--}1579$ м/с. За результатами експериментальних досліджень швидкість детонаційної хвилі у суміші пропану з повітрям дорівнює близько 1800 м/с. З урахуванням похибки вимірювань, отриманий результат дає підстави вважати про наявність детонаційного згорання палива. Якщо усереднити шумовий сигнал, то на першому датчику тиску маємо зміну напруги на 300 мВ, що відповідає зростанню тиску на $\Delta p = 300/146,1 = 2,05$ МПа. За результатами експериментальних досліджень тиск газу на фронті детонаційної хвилі дорівнює $1,8$ МПа. Слід додати, що у даній установці має місце додаткове стиснення пропано-повітряної суміші. Це призводить до зростання тиску у продуктах детонації. Тому отримані результати також підтверджують наявність детонації хвилі, чим підтверджується достовірність отриманих результатів вимірювань [117, 126].

Також вимірювалась швидкість ударної хвилі на виході зі ствола установки

пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Вимірювання здійснювалось базисним методом з реєстрацією сигналів з п'єзодатчиків тиску. Ці умови відповідають умовам розпилювання води у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Розташування датчиків біля вихідного торця ствола відображено на рисунку 4.12.

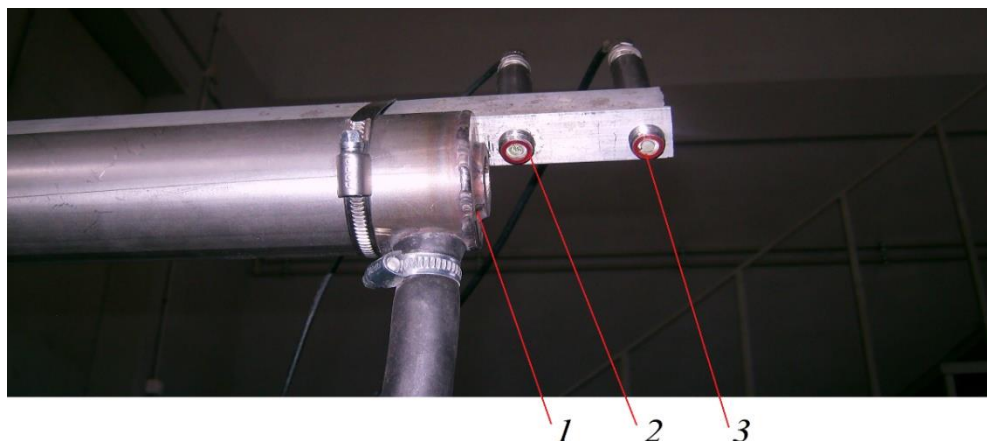


Рис. 4.12. Розміщення датчиків тиску біля виходу ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – вихідний торець ствола; 2, 3 – датчики тиску

Датчики розміщувалися таким чином, щоб мінімально впливати на вихід продуктів згорання. Відстань між датчиками тиску дорівнювала 5 см. Результати вимірювання сигналів з датчиків представлено на рисунку 4.13.

З наведених результатів маємо різницю у часі зростання тисків, що дорівнює $\Delta t = 28$ мкс. На відстані 5 см отримуємо швидкість $D = 0,05/0,000028 = 1785$ м/с. Таким чином, за різними способами тестування отримуємо наявність детонації у пропано-повітряній суміші.

З отриманих результатів маємо, що як у разі подавання води безпосередньо у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, так і у разі подавання води через насадок, на цівки води буде діяти ударна хвиля з параметрами, що наближається до параметрів детонаційної хвилі.

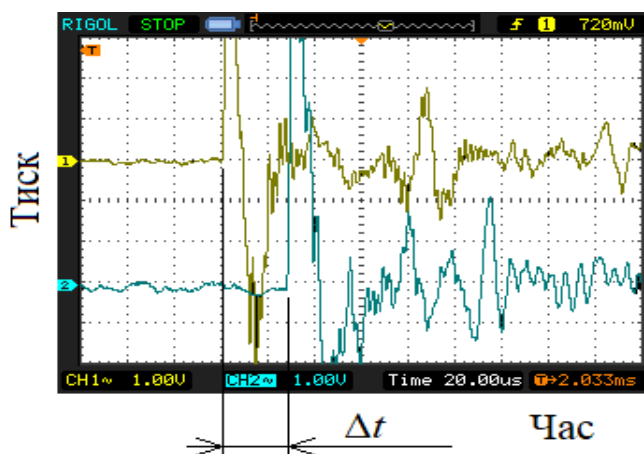


Рис. 4.13. Результати вимірювання тиску на виході з установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії

Окремо проведено вимірювання частоти генерування ударних хвиль в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Вимірювання здійснювалось за імпульсами тиску, що виникають у стволі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії у фіксованій точці. Результати вимірювання тиску відображено на рисунку 4.14.

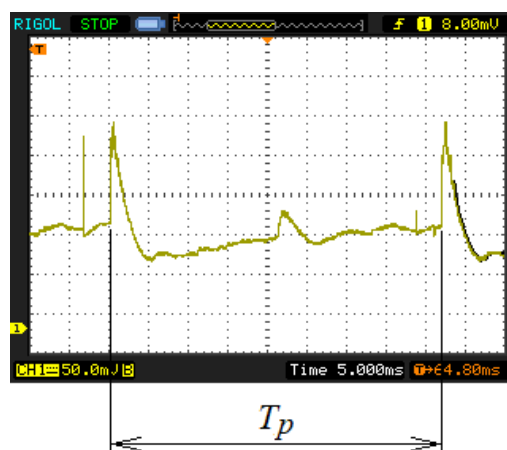


Рис. 4.14. Сигнал з датчику тиску під час роботи установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: час по горизонталі – 5 мс/кліт.

На наведеній осцилограмі тиску спостерігаємо періодичні стрибки тиску, де різниця у часі між цими стрибками (8,4 клітини) дорівнює $T_p = 42$ мс. Таким чином, частота генерування детонаційних хвиль дорівнює $1/0,042 \approx 24$ Гц. Між

стрибками тиску, викликаними детонацією палива спостерігаємо сплеск тиску значно меншої амплітуди. Цей тиск виникає під час продування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії свіжим повітрям. Таке продування сприяє розповсюдженню дрібнодисперсного водяного струменя у зовнішньому середовищі [117, 126].

Також проведено дослідження форми, що набувають продукти детонації під час виходу із ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Таке дослідження проведено шляхом фотографування швидкісною камерою у режимі зйомки з частотою 960 кадр/с. Для цього було застосовано фотоапарат SONY RX100V Exmor R5 4K Cyber-shot. Результати по-кадрового дослідження представлено на рисунку 4.15 [121].



Рис. 4.15. Фотографії струменю продуктів детонації на виході зі ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Час між кадрами дорівнює 1 мс

На рисунку 4.15 (ліворуч) спостерігаємо три відокремлені області з підвищеною яскравістю. На цьому ж рисунку (праворуч) маємо дві відокремлені області світіння. Відомо, що під час стаціонарного витікання надзвукового газового потоку відбувається формування стаціонарних хвильових утворень. Такі утворення прийнято називати ударними діамантами, або дисками Маха. Таким чином, наведені результати якісно підтверджують результати вимірювань швидкості ударної хвилі, за якими рух газу відбувається з надзвуковою швидкістю.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Запропоновано установку пожежогасіння періодично-імпульсної дії для гасіння розвинених пожеж в будівлях. Принцип формування дрібнодисперсного водяного струменя в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії полягає у безперервному подаванні води через форсунки та періодичної дії на цівку води ударних хвиль з частотою 23-24 Гц, що призводить до їх дрібнодисперсного розпилення.

2. Обґрунтовано та досліджено установку пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Дослідження параметрів ударної хвилі, що діє на цівку води, проведено шляхом вимірювання тиску та швидкості розповсюдження ударної хвилі у стволі установки. Вимірювання тиску здійснювалось прямим методом за допомогою датчику тиску. Вимірювання швидкості ударної хвилі на виході із ствола установки здійснювалось базисним методом з реєстрацією сигналів з п'єзодатчиків тиску. Вимірювання частоти генерування ударних хвиль в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії здійснювалось за імпульсами тиску, що виникають у стволі у фіксованій точці. Дослідження форми, що набувають продукти детонації під час виходу із ствола установки, проведено шляхом фотографування швидкісною камерою у режимі зйомки з частотою 960 кадр/с.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ І ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПЕРІОДИЧНО- ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ ПРИ ПОДАЧІ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ

Основним завданням оцінки ефективності установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії було визначення сфери її застосування та розбивалось на декілька етапів. Таким чином були проведені експериментальні дослідження процесу формування дрібнодисперсного водяного струменя, його подавання через трубопровід складної конфігурації та ефективності використання для гасіння пожеж в приміщеннях складної конфігурації.

Рекомендації щодо застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при подачі дрібнодисперсного водяного струменя були сформовані з урахуванням реалій сьогодення та спрямовані на забезпечення життя та здоров'я рятувальників зі збереженням ефективності дій направлених на локалізацію та ліквідацію пожежі.

5.1. Експериментальне дослідження формування дрібнодисперсного водяного струменя під дією ударної хвилі

Дослідження процесу формування дрібнодисперсного водяного струменя під дією ударної хвилі в розробленій установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії здійснювалось шляхом фотографічного дослідження. Фотографічне дослідження проводилось за двох варіантів подавання води в УПГПД: безпосередньо в ствол та через ствол. Результати швидкісного фотографування у разі подачі води в ствол УПГПД (рис. 5.1) [121, 127].

За продуктивністю нагнітання води, що дорівнювала 0,5 л/хв, на покадрових зображеннях дрібнодисперсний водяний струмінь практично не видно (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Формування дрібнодисперсного водяного струменя за умови подачі води в ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з продуктивністю 0,5 л/хв. Різниця у часі між кадрами ліворуч та праворуч дорівнює 1 мс

Це може бути пояснено тим, що вода під дією високої температури продуктів детонації переважно випаровується в цьому випадку. Відомо, що вода у вигляді газу є оптично прозорою у видимому спектрі випромінювання. Лише вода у вигляді пару є видимою. Як результат, вихід основної частки води у вигляді газу не спостерігається. Такий дрібнодисперсний водяний струмінь з газоподібною водою має низьку гасильну дію, бо в такому процесі вже відбувся відбір тепла на випаровування води. Тому охолоджувальний ефект такого струменю практично відсутній [121, 127].

Враховуючи те, що вигляд ДДВС в цьому випадку є подібним до туману, то можна припустити, що розмір крапель складає в цьому випадку від 0,01 мкм до 1 мкм. На наступному етапі досліджень подавання води з продуктивністю 2 л/хв здійснювалось через ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Результати фотографічного дослідження для цього випадку представлено на рисунку 5.2. На першому кадрі (рисунок 5.2, ліворуч зверху) показано стан розподілу дрібнодисперсного водяного струменя у повітрі після попереднього пострілу. На краях ствола спостерігається формування цівки води. Наявність крупних крапель води на фотографічних зображеннях не спостерігається. Це свідчить про якісне розпилення води під дією ударної хвилі. На другому та послідуючих кадрах показано вихід дрібнодисперсного водяного

струменя під час послідуєчого пострілу. На цих кадрах будь яких треків крупних крапель води також не спостерігається. Також бачимо, що цівки води, які дули на першому кадрі, зникли [121, 127].

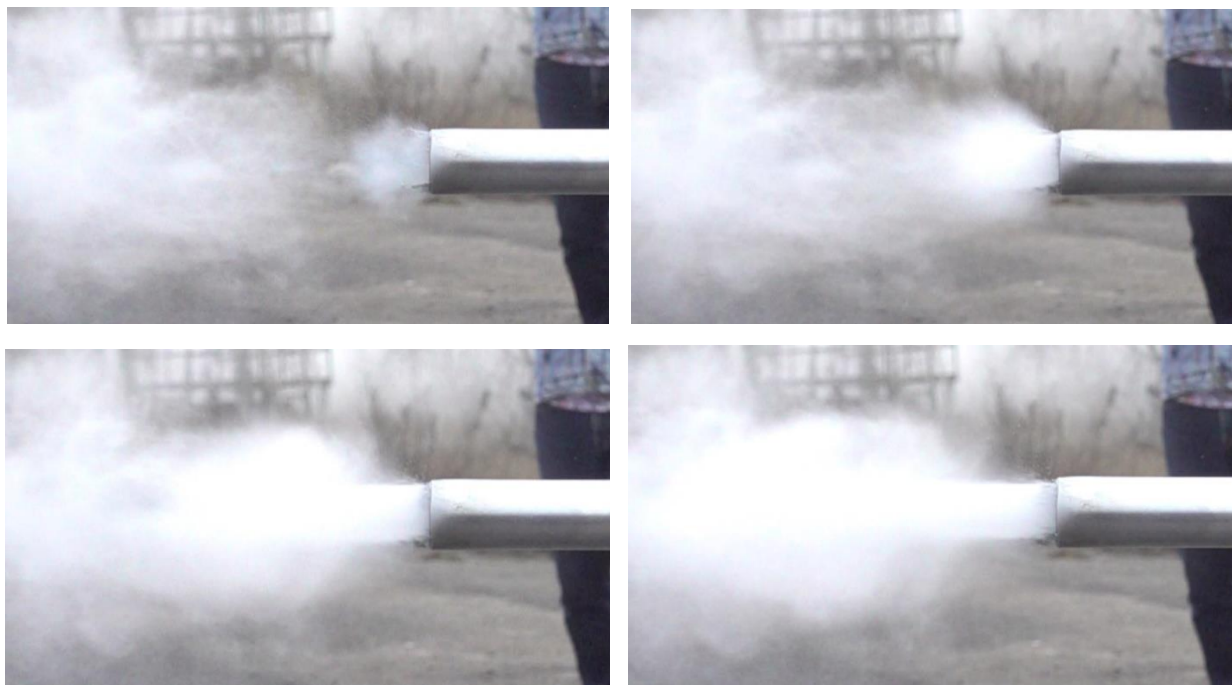


Рис. 5.2. Формування дрібнодисперсного водяного струменя за умови подачі води через ствол з продуктивністю 2 л/хв. Різниця у часі між кадрами дорівнює 1 мс

Таким чином, подрібнення відбувається не тільки цівок води, що зависають всередині ствола перед початком дії ударної хвилі, але й води, яка розтікалась вздовж стінок ствола. Слід зазначити, що ефект захоплення та подрібнення води вздовж поверхні ствола також спостерігався за результатами математичного моделювання. Таким чином, за продуктивності 2 л/хв досягається якісне формування дрібнодисперсного водяного струменя у розробленій установці пожежогасіння періодично імпульсної дії [121, 127].

Відсутність потоку крапель, що осаджуються зразу після виходу зі ствола, свідчить про те, що дрібнодисперсний водяний струмінь не має у складі краплі, розмір яких перевищує 100 мкм. За наявності таких крапель має місце їх осадження зі швидкістю у декілька десятків сантиметрів за секунду. Зокрема,

швидкість осадження краплі радіусом 10 мкм у повітрі за нормальних умов складає 1 см/с, а для краплі радіусом 1 мм – 7 м/с. За даними [128], у атмосферних умовах крапля діаметром 100 мкм осаджується зі швидкістю 0,4 м/с. Даний результат свідчить про якісне формування дрібнодисперсного водяного струменя у розробленій установці пожежогасіння періодично імпульсної дії.

Проведення експериментальних досліджень із визначення показників ефективності дрібнодисперсного водяного струменя проходили в наступній послідовності. В якості показників визначалося довжина та висота розповсюдження дрібнодисперсного водяного струменя, витрата води з установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при її формуванні, а також осідання крапель води на земну поверхню. Дослідження проводилися на відкритому майданчику навчального полігону за відсутності опадів і швидкості вітру, що не перевищує 2 м/с та при температурі навколишнього середовища 16 °C [121].

Подача дрібнодисперсного водяного струменя проводилася безперервно при максимальній витраті вогнегасної речовини. Як вогнегасна речовина використовувалася вода, що заливалася в пластикову квадратну ємність об'ємом 100 л. Витрата води в установці пожежогасіння періодично імпульсної дії склала $5,51 \pm 1,914_{0,9}$ л/хв [121, 127].

Вимірювання довжини та висоти струменя дрібнодисперсного водяного струменя здійснювалося за допомогою мірної стрічки (рулетки) довжиною 20 м. Вимірювання проводилося від початку виходу дрібнодисперсного водяного струменя зі ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії до кінцевої точки його розповсюдження. Так за результатами вимірювання довжина розповсюдження дрібнодисперсного водяного струменя склала 34 м, а висота відповідно 2,1 м. Поширення дрібнодисперсного водяного струменя зображено на рисунку 5.3 [121, 127].

Дослідження стану дрібнодисперсного водяного струменя та осідання крапель води на земну поверхню представлено на рис. 5.4.



Рис. 5.3. Результати проведення експериментальних досліджень щодо визначення довжини та висоти розповсюдження дрібнодисперсного водяного струменя

З фото представлених на рис. 5.4 видно, що на земній поверхні зображено форму осідання крапель води під час подачі дрібнодисперсного водяного струменя. Встановлено, що найбільш інтенсивне осідання крапель води відбувається на довжині 3 метра від ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. За допомогою мірної стрічки здійснено вимірювання цієї форми, так довжина склала 8 м, а ширина – 1,9 м [121, 127].



Рис. 5.4. Результати проведення експериментальних досліджень щодо осідання крапель води на земну поверхню

Отримані результати проведених експериментальних досліджень подачі дрібнодисперсного водяного струменя дозволяють визначити сферу

застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Вони полягають у застосуванні дрібнодисперсного водяного струменя при гасінні внутрішніх пожеж в різноманітних будівлях та спорудах (житлові, громадські тощо) [129, 130]. Крім цього, можна використовувати при ліквідації горіння електроустановок під напругою [21] та протидії вибуху газу [131], також під час гасіння пожеж у відсіках на судах [63], у залізничних тунелях [132], для гасіння пожеж з ЛЗР та ГР [7, 8] та при гасінні літій-іонних акумуляторних батарей [133].

5.2 Експериментальне дослідження подавання дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації

Метою даного дослідження є оцінювання можливості подачі дрібнодисперсного водяного струменя через трубопровід складної конфігурації з установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Експериментальні дослідження проводилися за схемою, що наведена на рисунку 5.5 [134, 135].

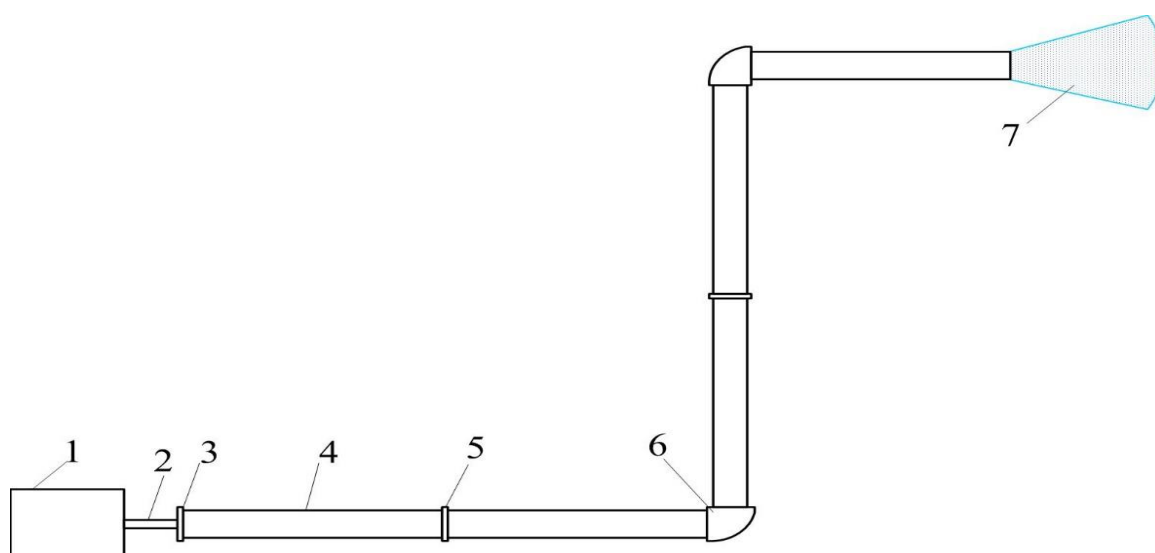


Рис. 5.5. Схема проведення експериментального дослідження установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: 1 – установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії; 2 – ствол установки; 3 – місце з'єднання ствола установки з трубою ПВХ; 4 – труба ПВХ діаметром 160 мм; 5 – місце з'єднання труб ПВХ; 6 – кутове коліно зовнішнє; 7 – струмінь рідини

Експериментальні дослідження проводилися у приміщенні за відсутності опадів і швидкості вітру та при температурі навколишнього середовища 14 °С. За допомогою труб ПВХ діаметром 160 мм було зібрано трубопровід складної конфігурації з поворотами, що відтворює канал системи вентиляції в житловому приміщенні. Довжина однієї труби ПВХ складала 2,0 м, а загальна довжина конструкції складала 10 м. В один кінець конструкції було вставлено ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, а інший кінець трубопроводу сполучався з атмосферою [134, 135].

Подавання води до установки здійснювалося за допомогою мембранного насосу високого тиску з витратою рідини 5,5 л/хв. При цьому, експериментальні дослідження проводилися за двох умов, а саме труба ПВХ на кінці складної конструкції розташовувалася у горизонтальному положенні рис. 5.6 а та у вертикальному положенні рис. 5.6 б [134, 135].



а



б

Рис. 5.6. Загальний вид схеми проведення експериментального дослідження з подавання вогнегасної речовини з установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії: а) труба ПВХ у горизонтальному положенні; б) труба ПВХ у вертикальному положенні

Під час проведення експериментальних досліджень відбувалось вимірювання часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя із трубопроводу складної конфігурації в залежності від загальної його довжини та маси пари води, що конденсувалась в середині труб. За допомогою методу найменших квадратів проведено опрацювання експериментальних даних [134].

Дослідження з визначення часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя із складної конструкції з труб ПВХ в залежності від її довжини здійснювалося за допомогою електронного секундоміру Flott F018. Вимірювання часу затримки відбувалось під час пуску установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з послідуною подачею дрібнодисперсного водяного струменя та виходу його з труби ПВХ. Фіксування часу затримки відбувалось у 4-и етапи в залежності від якості дрібнодисперсного водяного струменя, що виходив з труби ПВХ [134, 135].

Вимірювання часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя здійснювалося спочатку при загальній довжині складної конструкції з труб ПВХ, що складала 10 м з послідуном зменшенням кількості труб на одну (зменшення загальної довжино складної конструкції на 2 м) при проведенні наступних досліджень. На рисунку 5.7 представлено вигляд кінця труби в умовах вимірювання часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя зі складної конструкції довжиною 10 м.

Встановлено, що вихід дрібнодисперсного водяного струменя з труби ПВХ починає відбуватися через 22 с (рис. 5.7 а) від початку включення установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та зі зростанням часу відбувалось формування дрібнодисперсної водяного струменя (рис. 5.7 б, в, г) [134, 135].

Отримані результати досліджень з визначення часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя з труб ПВХ в залежності від її довжини наведені в таблиці 5.1.



Рис. 5.7 Результати дослідження з визначення часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя при загальній довжині труб ПВХ 10 м: а) час 22 с; б) час 47 с; в) час 101 с; г) час 112 с [134, 135].

Таблиця 5.1.

Результати дослідження з визначення часу затримки виходу дрібнодисперсного водяного струменя [134, 135]

№ з/п	Загальна довжина труб, м	Кількість вигинів, од.	Час затримки, с			
			1-етап	2-етап	3-етап	4-етап
1	2	0	4	9	17	21
2	4	1	9	20	37	49
3	6	1	13	29	60	68
4	8	2	17	38	81	87
5	10	2	22	47	101	112

Подавання дрібнодисперсного водяного струменя із труби складної конструкції за допомогою установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії представлено на рис. 5.8 [134, 135].



Рис. 5.8. Загальний вид подавання вогнегасної речовини із складної конструкції: а) труба ПВХ у горизонтальному положенні; б) труба ПВХ у вертикальному положенні

Наступним етапом дослідження було визначення кількості води, що конденсувалась в трубопроводі складної конфігурації в залежності від його загальної довжини. Визначення кількості дрібнодисперсного водяного струменя, що конденсувався, здійснювалося спочатку при загальній довжині трубопроводу складної конструкції, що складала 10 м з послідовним зменшенням кількості труб на одну тобто на 2 м. Дослідження конденсації дрібнодисперсного водяного струменя здійснювалося за результатами вимірювання витікання води з трубопроводу. Результати досліджень з визначення витрати води, що конденсувалась у трубопроводі, в залежності від його загальної довжини наведені в таблиці 5.2 [134, 135].

Отримані результати проведених експериментальних досліджень подачі дрібнодисперсного водяного струменя в трубопровід складної конфігурації дозволяють застосовувати установку пожежогасіння періодично-імпульсної дії для подавання дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння пожеж в житлових будівлях.

Таблиця 5.2.

Результати досліджень з визначення витрати води, що конденсувалась у трубопроводі [134, 135]

№ з/п	Загальна довжина труб, м	Масовий відсоток пари води, що конденсувався у трубопроводі, %	Витрата води, яка конденсувалась у трубопроводі, л/хв.	Відсоток конденсації, %
1	2	1,7	0,0935	$0,0935 \pm 0,221_{0,9}$
2	4	3,9	0,2145	$0,2145 \pm 0,508_{0,9}$
3	6	6,8	0,374	$0,374 \pm 0,886_{0,9}$
4	8	8,1	0,4455	$0,4455 \pm 1,055_{0,9}$
5	10	9,4	0,517	$0,517 \pm 1,224_{0,9}$

При цьому тактичні можливості установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дозволяють здійснювати подачу дрібнодисперсного водяного струменя на різну відстань через системи механічної вентиляції до осередку горіння з подальшим його гасінням.

5.3 Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем у приміщеннях складної конфігурації

За наявності людей в приміщеннях будівлі, де виникла пожежа, виникає суперечлива задача. З одного боку, необхідно забезпечити доступ свіжого повітря до приміщень для створення умов для дихання людей, які потенційно могли там залишитись у зв'язку зі втратою свідомості, або люди опинились у заблокованих приміщеннях внаслідок руйнування будівлі, тощо. Зокрема, загибель людей на пожежах, в основному, відбувається переважно від отруєння продуктами неповного згорання внаслідок горіння та піролізу (термічного

розкладання) твердих горючих матеріалів [136]. З другого боку, нагнітання свіжого повітря сприяє поширенню пожежі. В результаті, пожежі, які виникають усередині будівель, розповсюджуються назовні через 20-30 хвилин за зачинених вікнах та дверях, а за відчинених – протягом декількох хвилин [1].

В умовах сильної задимленості виникають труднощі з евакуації людей з приміщень, у визначенні осередку пожежі, в орієнтуванні рятувальників під час переміщення та доставки пожежно-технічного обладнання [49]. Вище наведене свідчить щодо наявності специфічних вимог до технічних засобів пожежогасіння які застосовують у громадських, житлових будівлях, а також у адміністративно-офісних приміщеннях. Таким чином, удосконалення технічних засобів пожежогасіння для отримання нових вогнегасних речовин є проблемою.

Метою даного експериментального дослідження є перевірка ефективності методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем. Метод гасіння пожежі засновано на подвійній дії дрібнодисперсного водяного струменя, що полягає у наступному: за умови формування дрібнодисперсного водяного струменя у частині приміщень, де не відбулося значного зростання температури, цей дрібнодисперсний водяний струмінь підтримує умови для нормального дихання людини та забезпечує осадження диму. Зміна дії дрібнодисперсного водяного струменя відбувається у разі його потрапляння у частину приміщень, де відбулося значне зростання температури. В цій області відбувається інтенсивне охолодження зони горіння в результаті випаровування крапель дрібнодисперсного водяного струменя та зменшення концентрації кисню за рахунок його витіснення парами води. Таким чином відбувається інтенсивне гасіння пожежі.

Приклад застосування методу гасіння пожежі у приміщеннях складної конфігурації дрібнодисперсним водяним струменем схематично відображено на рисунку 5.9 [126]. З установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з високою продуктивністю забезпечується подача дрібнодисперсного водяного струменя. Цей струмінь просувається по приміщенню, не усуваючи умови для дихання людини.

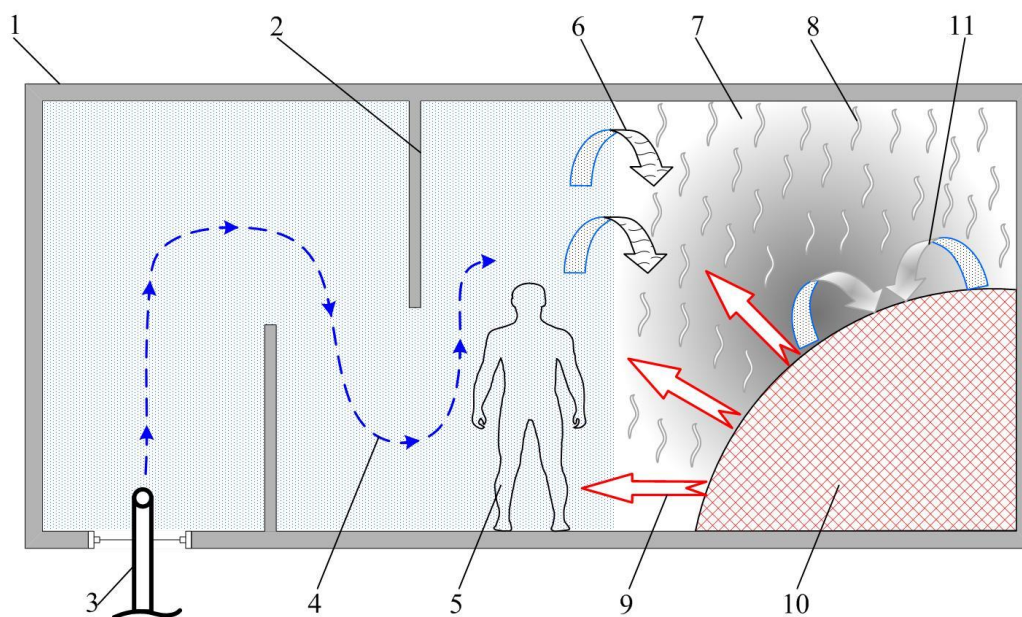


Рис. 5.9. Схема гасіння пожежі в приміщенні дрібнодисперсним водяним струменем: 1 – приміщення; 2 – перегородки; 3 – подача дрібнодисперсного водяного струменя зі ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії; 4 – рух дрібнодисперсного водяного струменя; 5 – постраждалий, який потребує допомоги; 6 – процес осадження частинок диму; 7 – дим; 8 – випаровування води; 9 – теплове випромінювання під час пожежі; 10 – пожежа (відкрите полум'я); 11 – випаровування води при потраплянні її на полум'я

Осадження часток диму на краплях води призводить до зростання маси крапель та осадження важких крапель. В результаті видалення диму покращуються умови для дихання та зростає видимість у приміщенні, що сприяє ефективному проведенню оперативних дій. З подальшим рухом дрібнодисперсного водяного струменя по приміщенню та його потраплянні у високотемпературну зону відбувається інтенсивне охолодження зони горіння за рахунок випаровування крапель води. Пароутворення призводить до різкого зменшення концентрації кисню. Це в комплексі зумовлює стрімке гасіння пожежі [126].

Для проведення експериментальних досліджень щодо гасіння осередку пожежі з непрямою подачею дрібнодисперсного водяного струменя застосовувалась установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Загальний

вид ствола установки та формування дрібнодисперсного водяного струменя показана на рис. 5.10 [126].



Рис. 5.10. Загальний вид установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії

Під час направлення дрібнодисперсного водяного струменя у тунель складної конфігурації відбувалось його заповнення. Час початку виходу дрібнодисперсного водяного струменя з тунелю довжиною 2 м склав до 3 с (рис. 5.11). Після досягнення осередку пожежі відбулося загасання пожежі. Припинення інтенсивного горіння відбулося через 9 с. Повне загасання полум'я відбулося через 25 с від початку включення установки. Цим підтверджено можливість застосування методу гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем на основі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії для гасіння пожежі у тунелях складної конфігурації. Це дає підстави для подальшого дослідження цього методу у задачах гасіння пожеж у приміщеннях складної конфігурації [126].

Вогнегасну здатність методу гасіння оцінимо за охолоджувальним ефектом та ефектом зменшення концентрації кисню. Отже, під час нагрівання 1 л води з температури 20 °С до 100 °С, від осередку пожежі буде відібрано енергії у 335 кДж. Тому випаровування 1 л води відніме ще 2260 кДж від осередку пожежі. Таким чином, охолоджувальний ефект складає 2595 кДж/кг [126]. Застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дозволить підвищити ефективність гасіння пожеж в будівлях дрібнодисперсним водяним

струменем. Так, при роботі установки під час гасіння пожежі витрата води складе 30 л/хв, що забезпечить відбір тепла із зони пожежі біля 4 ГДж/год [126].



Рис. 5.11. Результати проведення експериментальних досліджень щодо гасіння осередку пожежі в приміщенні складної конфігурації

Ефект зменшення концентрації кисню розраховується за парціальним тиском. Приймаємо, що пари води витісняють повітря та газоподібні продукти згорання з приміщення. Розрахунок проведемо на прикладі приміщення з розмірами $5 \times 3 \times 3$ м, загальним об'ємом 45 м^3 . Визначимо який об'єм займає $m = 1$ кг води при випаровуванні за рівнянням [126]:

$$V = \frac{m}{M} \cdot V_m \quad (5.1)$$

де V_m – молярним об'єм газу за нормальних умов $22,4 \text{ л/моль}$ [137];

M – молярна маса води, 18 г/моль [137].

За рівнянням (5.1) з 1 кг води утворюється біля $1,2 \text{ м}^3$ пари води. Таким чином, для витіснення повітря та газоподібних продуктів згорання з приміщення, що розглядається, необхідно 36 л води.

Наведені результати досліджень свідчать про високу ефективність методу гасіння дрібнодисперсним водяним струменем, що пропонується.

5.4 Рекомендації щодо застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при подачі дрібнодисперсного водяного струменя

В умовах постійної загрози ураження пожежних-рятувальників рятувальників внаслідок ракетно-артилерійських обстрілів [138, 139] та за умов складності чи небезпеки проведення робіт з гасіння пожеж на об'єктах промисловості [140, 141] традиційними способами стає актуальною можливість використання різноманітної роботизованої техніки та пристроїв дистанційного гасіння, в тому числі установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії (рис. 5.12) [142, 143].



Рис. 5.12. Установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії [121].

Використання розробленої установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дозволяє досягнути таких переваг як:

- зменшення часу перебування особового складу в небезпечній зоні;

- обмеження впливу небезпечних факторів пожежі (непридатне для дихання середовище, висока температура, загроза руйнування елементів конструкцій, перебування в умовах обмеженого простору тощо) на рятувальників;

- зменшення збитків від надлишкового використання вогнегасної речовини (води);

- створення більш прийнятних умов проведення робіт за рахунок більш ефективного витіснення та осадження продуктів горіння дрібнодисперсним водяним струменем.

Застосування розробленої установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії вимагає виконання основних етапів в наступній послідовності:

- транспортування установки і особового складу до місця локалізації пожежі;

- визначення місць розташування особового складу та визначення місць, на які відводиться особовий склад у разі виникнення небезпеки у тому числі внаслідок повторного обстрілу в умовах ведення бойових дій [139, 144];

- інструктаж з безпеки праці і порядку виконання робіт спрямованих на гасіння пожежі;

- визначення необхідного запасу вогнегасної речовини (води);

- за необхідності розгортання розбірної проміжної ємності;

- визначення місця розташування установки та способу подачі дрібнодисперсного водяного струменя;

- розгортання установки на місці проведення робіт та підготовка до запуску;

- наповнення ємності для вогнегасної речовини водою;

- запуск установки та подача дрібнодисперсного водяного струменя до осередку пожежі.

Керівник робіт прибувши на місце проведення робіт встановлює зв'язок з керівником гасіння пожежі [49] та визначає:

- напрямок та спосіб подачі дрібнодисперсного водяного струменя до осередку пожежі;
- місце встановлення установки;
- місця розташування особового складу;
- способи та засоби подачі сигналів, команд («початок роботи», «небезпека», «кінець роботи» тощо);
- наявність потенційних загроз, шляхи та способи виведення сил;
- необхідність створення запасу розхідних матеріалів.

Під час гасіння пожежі на відкритій місцевості УПГПД розташовується максимально близько до осередку пожежі (рис. 5.13). При цьому місце розташування обирається з урахуванням можливості здійснення маневру на випадок необхідності зміни напрямку подачі дрібнодисперсного водяного струменя, раптових змін в оперативній обстановці, загрози самій УПГПД чи виникненні інших чинників.

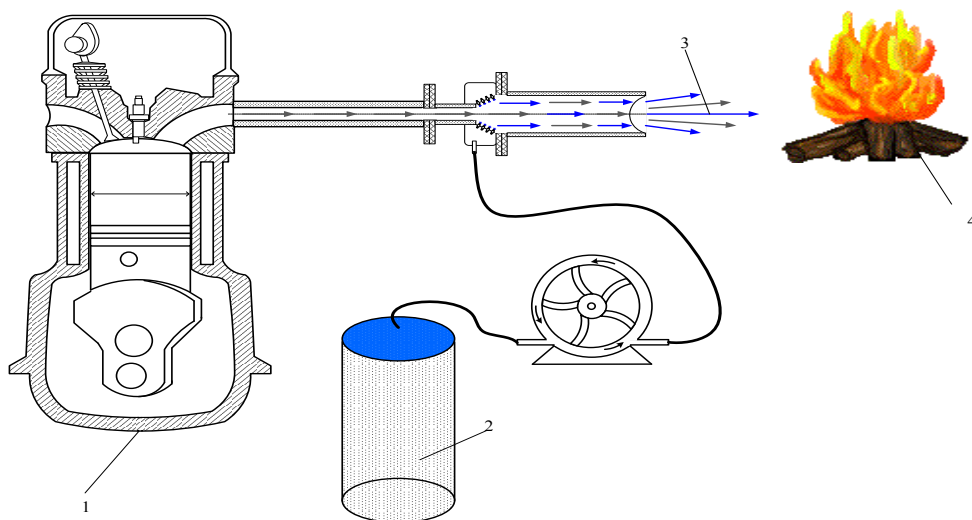


Рис. 5.13. Схема гасіння пожежі на відкритій місцевості: 1 – установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії; 2 – вогнегасна речовина (вода); 3 – дрібнодисперсний водяний струмінь; 4 – джерело горіння.

Розташування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії не повинно заважати здійсненню керування нею, проведенню заходів з евакуації

потерпілих тощо. Таким способом установка пожежогасіння може бути використана для захисту поряд розташованого технологічного обладнання, споруд та інших об'єктів, що не охоплені вогнем та потребують захисту.

При необхідності використання установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії для гасіння пожеж в приміщеннях складної конфігурації, керівник підрозділу, у взаємодії з керівником гасіння пожежі, визначає спосіб подачі ДДВС до приміщення. В першу чергу використовуються двері, вікна та інші конструктивні отвори. За умов відсутності такої можливості, такі отвори можуть бути пророблені з використанням аварійно-рятувального інструменту, з урахуванням конструктивних особливостей будівлі. При цьому такі дії не повинні призвести до ускладнення оперативної обстановки чи руйнування споруди. Під час пророблення таких отворів слід дотримуватись правил безпеки праці при роботі з аварійно-рятувальним обладнанням [145, 146].

Використання установки пожежогасіння за схемою може бути направлене, в тому числі, на димовидалення, захист суміжних приміщень, створення прийнятних умов для проведення оперативних дій в приміщеннях (рис. 5.14) [126].

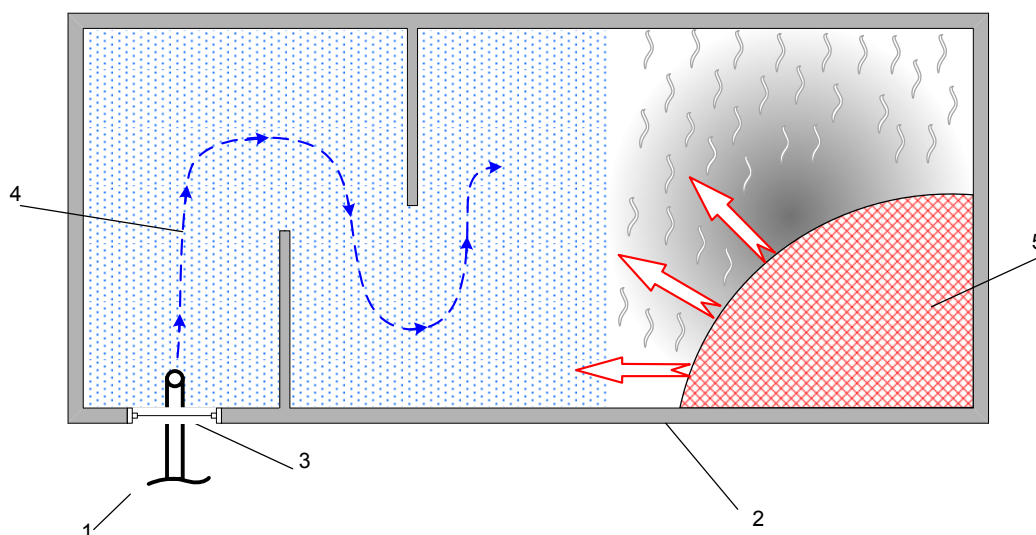


Рис. 5.14. Схема гасіння пожежі в приміщенні: 1 – ствол установки подачі ДДВС; 2 – приміщення; 3 – дверний отвір (вікно); 4 – рух ДДВС; 5 – пожежа (відкрите полум'я).

При неможливості направлення дрібнодисперсного водяного струменя до осередку пожежі безпосередньо зі ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії можливе використання подовжуючих трубопроводів чи використання існуючих каналів (вентиляція тощо). В таких випадках ствол установки направляється до вхідного отвору таких комунікацій (рис. 5.15) [126].

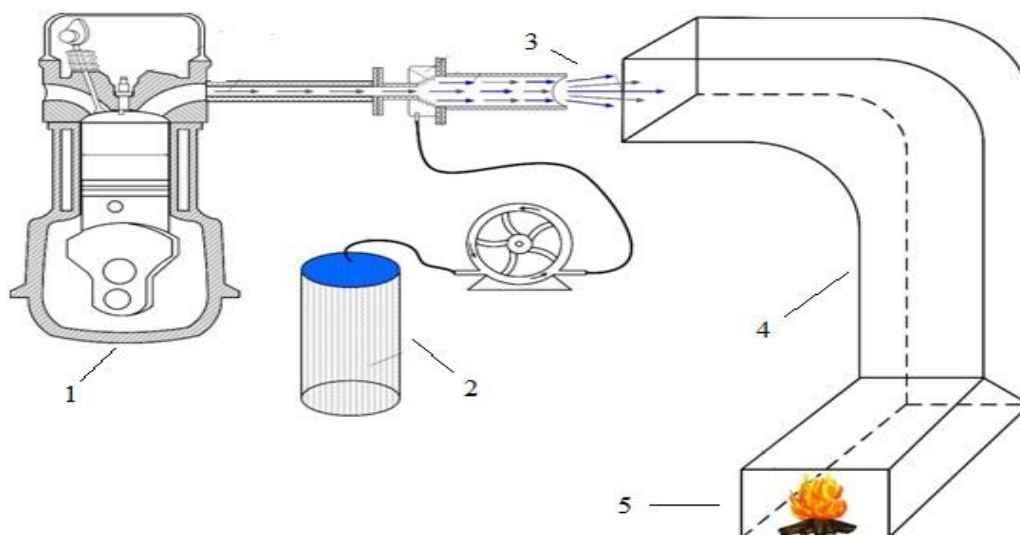


Рис. 5.15. Схема подачі дрібнодисперсного водяного струменя через вентиляційні канали: 1 – установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії; 2 – вогнегасна речовина (вода); 3 – дрібнодисперсний водяний струмінь; 4 – вентиляційний канал; 5 – джерело горіння.

При цьому враховується напрямок руху потоку дрібнодисперсного водяного струменя по таким каналам. За умови можливості використання засобів примусової вентиляції такі дії погоджуються з інженерним персоналом об'єкту (можливість направлення потоку в необхідному напрямку, можливість перекриття напрямків, що не потребують використання та інше).

При проведенні робіт з використанням установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії обов'язкове застосування сигналів (свисток, сигнали руками тощо), які мають бути добре зрозумілі для особового складу. Сигнали та способи їх подачі повинні бути заздалегідь узгоджені та доведені до особового складу.

При безпосередній роботі з використанням установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії забороняється палити, продовжувати роботу при виникненні технічних несправностей, отриманні сигналу «Небезпека» чи «Закінчити роботу», тощо.

Експлуатація та обслуговування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії здійснюється особами, що мають допуск до цих робіт. Всі люди, які не зайняті в підготовці та застосуванні установки, повинні віддалитися за межі зони проведення робіт, які визначає керівник робіт. Роботи що проводяться на інших ділянках та напрямках (гасіння окремих осередків, пошук та евакуація потерпілих тощо) узгоджуються зі старшим начальником на місці проведення робіт.

В умовах недостатнього штатного запасу вогнегасної речовини може бути розгорнута розбірна проміжна ємність, або використовуються інші технічні засоби (автоцистерни, прицепні цистерни, бочки) (рис. 5.16). При наявності загрози таким засобам – тільки розбірна проміжна ємність з достатнім запасом води [147].

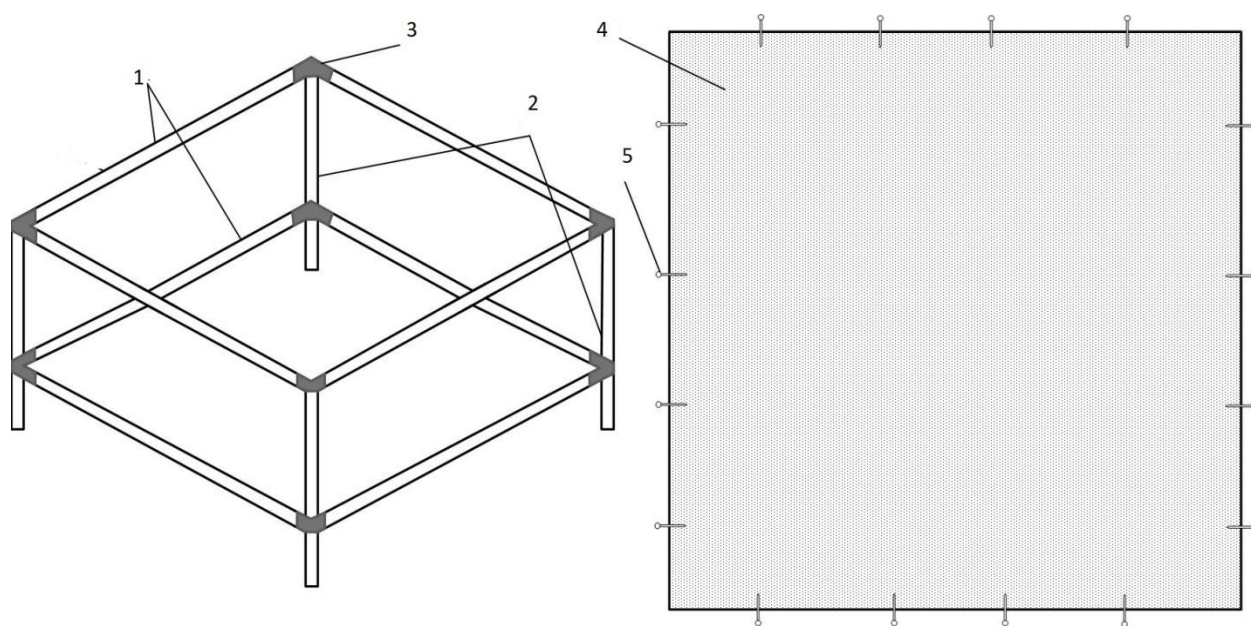


Рис. 5.16. Розбірна проміжна ємність для зберігання рідини: 1 – вертикальні стійки; 2 – горизонтальні стійки; 3 – кутові з'єднання; 4 – полівінілхлоридний матеріал; 5 – пластикові хомути

Розбірна проміжна ємність містить збірний каркас, що складається з восьми горизонтальних стійок та чотирьох вертикальних стійок, виконаних з легкого металу у формі порожнистого циліндра. Фіксування горизонтальних та вертикальних стійок між собою здійснюється за допомогою кутових з'єднань. В складений збірний каркас розгортається полівінілхлоридний матеріал [147].

Місце розташування розбірної ємності обирається з урахуванням наступних вимог:

- поверхня повинна бути рівною, стійкою та забезпечувати надійне та стійке розташування ємності;
- підстилаючи поверхня повинна бути чистою (без загрози порізів полівінілхлоридного матеріалу);
- розгорнута ємність не повинна заважати проведенню робіт оператором установки та іншим аварійно-рятувальним роботам;
- відстань від ємності до установки повинна забезпечувати стійку подачу вогнегасної речовини;
- відстань від ємності до джерела горіння повинна забезпечувати цілісність та збереження ємності.

Запропонована конструкція розбірної проміжної ємності дозволяє здійснювати її транспортування в кабіні або у відсіку пожежно-рятувального автомобіля без залучення додаткового габаритного місця, а перенесення та застосування під час проведення оперативних дій, визначається насамперед її мобільністю, що значно підвищує ефективність проведення оперативних дій за рахунок скорочення часу її застосування з одночасним зменшенням кількості рятувальників до двох [147].

По прибуттю пожежно-рятувального автомобіля на місце виклику пожежник-рятувальник дістає з кабіни або відсіку розбірну проміжну ємність, що знаходиться в чохлі, та вирушає до місця її застосування, визначене керівником. Складення розбірної проміжної ємності відбувається двома рятувальниками. З початку відбувається складання збірного каркаса (рис 5.16) за

рахунок фіксування горизонтальних 1 та вертикальних стійок 2 за допомогою кутових з'єднань 3. Наступним кроком відбувається розгортання полівінілхлоридного матеріалу 4 в збірному каркасі та кріплення за допомогою пластикових хомутів 5 [147].

В складеному стані розбірна проміжна ємність використовується як резервуар для наповнення та зберігання запасу вогнегасної речовини. Після її використання відбувається її розбирання у зворотному порядку (рис 5.17, 5.18). За необхідності проводиться обробка (миття, деконтамінація) полівінілхлоридного матеріалу [147].



Рис. 5.17. Загальний вид розбірної проміжної ємності без води.



Рис. 5.18. Загальний вид розбірної проміжної ємності з водою.

Після використання та очищення полівінілхлоридний матеріал обов'язково просушується, що подовжує термін його зберігання та використання.

У разі пошкодження полівінілхлоридного матеріалу він підлягає ремонту шляхом проклеювання чи пайки. За умови недоцільності ремонту проводиться його заміна.

5.5 Висновки до розділу 5

1. За результатами експериментальних досліджень дрібнодисперсного водяного струменя довжина його розповсюдження склала 34 м, висота відповідно 2,1 м. Встановлено, що найбільш інтенсивне осідання крапель води відбувається на відстані 3 метра від ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, а форма осідання мала розміри $8 \times 1,9$ м.

2. Дослідження можливості подавання ДДВС через трубопровід складної конфігурації довжиною 10 м. показали незначний відсоток осадження та стале формування струменю на виході через 100 с.

3. Під час роботи установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії витрата води склала 30 л/хв, що забезпечить відбір тепла із зони пожежі біля 4 ГДж/год. Визначено, що для витіснення повітря та газоподібних продуктів згорання з приміщення розміром $5 \times 3 \times 3$ м необхідно 36 л води.

4. Результати проведених досліджень дозволили визначити сферу застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії та сформулювати рекомендації щодо її застосування при формуванні та подачі дрібнодисперсного водяного струменя.

ВИСНОВКИ

В представленій роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання з підвищення ефективності гасіння пожеж шляхом удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем за рахунок використання установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії за принципом газодетонаційної технології подрібнення води.

При цьому отримано наступні висновки:

1. Дослідження систем пожежогасіння дрібнодисперсними (тонкорозпиленими) водяними струменями в Україні, здебільшого, спрямовані на впровадження стаціонарних систем пожежогасіння. Сучасні технічні засоби гасіння дрібнодисперсним водяним струменем характеризуються обмеженою продуктивністю подавання дрібнодисперсного водяного струменя, що зумовлено низькою періодичністю пострілу.

2. За результатами математичного моделювання процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою виявлено порівняно високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до газодетонаційних процесів в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії, що вказує на недоцільність застосування імпульсного впорскування води у ствол установки. Результати математичного моделювання процесу подрібнення цівки води у стволі установки під дією ударної хвилі виявили високу якість розпилення води під дією високошвидкісного газового потоку та показали, що основний процес подрібнення води відбувається не під дією ударної хвилі, а під дією високошвидкісного газового потоку, що рухається за ударною хвилею. В умовах проведеного моделювання час заповнення всього модельного приміщення ДДВС склав 85 с, а густина крапель води у повітрі, за якої досягається гасіння пожежі, була досягнута через 100 с. При цьому, швидкість поширення вогнегасної здатності дрібнодисперсного водяного струменя у модельному приміщенні склала 0,14 м/с.

3. Експериментальними дослідженнями параметрів роботи установки пожежогасіння з газодетонаційним принципом прискорення рідини встановлено, що при застосуванні заряду об'ємом 2 л при початковому тиску 0,2 МПа далекобійність струменя перевищила 23,3 м з максимальним радіусом розкриття струменя до 4,8 м. За встановленими параметрами роботи установки визначено сферу її застосування, а саме для створення протипожежних бар'єрів, захисних екранів, для гасіння пожеж на далеких відстанях та на важкодоступній місцевості.

4. Запропоновано установку пожежогасіння періодично-імпульсної дії для гасіння пожеж в будівлях дрібнодисперсним водяним струменем. Принцип формування дрібнодисперсного водяного струменя у системі пожежогасіння за допомогою установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії полягає у безперервному подаванні води через форсунки та періодичної дії на цівку води ударних хвиль з частотою 23-24 Гц, що призводить до їх дрібнодисперсного розпилення.

5. Результати проведених досліджень дозволяють визначити сферу застосування установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, що полягає у застосуванні дрібнодисперсного водяного струменя для гасіння внутрішніх пожеж в різноманітних будівлях та спорудах, а також для гасіння електроустановок під напругою та приміщень з обертанням ЛЗР та ГР.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Довідник керівника гасіння пожежі / За заг. ред. В. С. Кропивницького. Київ: ТОВ "Літера-Друк", 2016. 320 с.
2. Кокот ІІ. Гасіння внутрішніх пожеж: посіб. / пер. з пол. В. Дубасюка. Львів, 2022. 319 с.
3. Farrell K., Hassan, M. K., Hossain M. D., Ahmed B., Rahnamayiezekavat P., Douglas G., Saha S. Water Mist Fire Suppression Systems for Building and Industrial Applications: Issues and Challenges. *Fire*. 2023. 6 (2). P. 40. doi: 10.3390/fire6020040.
4. Дубінін Д. П. Дослідження вимог до перспективних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 1 (33). С. 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2
5. Kuti R. Advantages of Water Fog Use as a Fire Extinguisher. *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*. 2015. Vol. 14 (2). P. 259–264. doi: 10.32565/aarms.2015.2.11.
6. Cao X., Bi M., Ren J., Chen B. Experimental research on explosion suppression affected by ultrafine water mist containing different additives. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 368. P. 613–620. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.01.006.
7. Zhang P., Tang X., Tian X., Liu C., Zhong M. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. P. 706–714. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.110.
8. Кокот ІІ. Способи оперування вогнегасними струменями: посіб. / пер. з пол. В. Дубасюка. Львів: AIR PRESS, 2019. 36 с.
9. Dubinin D., Krivoruchko Y., Harbuz S. Investigation of the influence of water dispersion on the fire extinguishing process. *Sectoral research XXI: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» II International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference. European Scientific Platform. Chicago, USA. 2021. P. 63–64. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/15324>.*

10. Ferng Y. M., Liu C. H. Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241 (8). P. 3142–3148. doi: 10.1016/j.nucengdes.2011.06.002.
11. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ: ІКХХВ НАН України, 2015. 18 с.
12. The Engineering ToolBox. Specific Heat Capacity of Water: Temperature-Dependent Data and Calculator. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html.
13. Wiegleb, G. Gas Measurement Technology in Theory and Practice; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, Germany, 2023; ISBN 978-3-658-37231-6.
14. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Обґрунтування умов припинення горіння та доцільність застосування дрібнорозпиленої води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 163.
15. Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі: навч. посіб. Харків: АЦЗУ, 2004. 252 с.
16. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: навч. посіб. Харків: АПБУ, 2002. 352 с.
17. Сировий В. В., Сенчихін Ю. М., Лісняк А. А., Дерев'янка І. Г. Основи тактики гасіння пожеж: навч. посіб. Харків: НУЦЗУ, 2015. 216 с.
18. Лісняк А. А., Бородич П. Ю., Покідін М. В. Підвищення ефективності гасіння пожеж твердих горючих матеріалів в будівлях. *Проблеми пожежної безпеки*. 2013. № 34. С. 115–119. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1063>.
19. Про затвердження Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах України: наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 22.12.2011 р. № 863. Офіційний вісник України. 2012. № 4. С. 190. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0013-12#Text>.

20. Кодрик А., Борисов А., Тітенко О., Іллюченко П. Особливості гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю альтернативних джерел енергії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1 (15). С. 128–140. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15).128-140.
21. Nguyen D., Kesler R. M., Cheng S., Chamorro, L. P., Vega S., Fields A., LeGear D., Masoud F. On the Fire Hose Kickback Force in Solid Water Streams. *Fire Technology*. 2024. Vol. 60. P. 1627–1641. doi: 10.1007/s10694-023-01539-9.
22. Kuti R., Zólyomi G., László G., Hajdu C., Környei L., Hajdu F. Examination of effects of indoor fires on building structures and people. *Heliyon*. 2023. Vol. 9 (1). P. e12720. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12720.
23. Mahmud H. M. I., Thorpe G., Moinuddin K. A. M. The Behaviour of Water-Mists in Hot Air Induced by a Room Fire: Effect of the Initial Size of Droplets. *Fire*. 2022. Vol. 5 (4). P. 116. doi: 10.3390/fire5040116.
24. Tyco AquaMist. URL: <https://www.tycoaquamist.com>.
25. Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 512 p. doi:10.1002/9781119975465.
26. Hurley M. J., Gottuk D. T., Hall J. R. Jr., Harada K., Kuligowski E. D., Puchovsky M., Torero J. L., Watts J. M. Jr., Wieczorek C. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. New York, NY, USA: Springer, 2016.
27. Zhou L., Shi X., Jiang H., Xu Z., Li S., Xu W. An experimental study on the thermal radiation attenuation effect of water mist from flat fan nozzle. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023. Vol. 39. P. 101634. doi: 10.1016/j.tsep.2022.101634.
28. Semko A. N., Beskrovnaya M. V., Vinogradov S. A., Hritsina I. N., Yagudina, N. I. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2014. Vol. 52 (3). P. 655–664.
29. Semko A. N., Rusanova O. A., Kazak O., Beskrovnaya M. V., Vinogradov S. A., Gricina I. N. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*. 2015. Vol. 9 (1). P. 9–20.

doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9.

30. Tragbarer Hochdruck-Wasser-Feuerlöscher: pat. EP1932566B1: A62C13/66. № 06126038.6; declared: 13.12.2006; published: 21.04.2010, Pat.bl. Nr. 10/2016. 15 p.

31. Fine water mist multiple orientation discharge fire extinguisher: pat. US8746357B2: A62C2/00. № 11/875,494; declared: 19.10.2007; published: 10.06.2014. 28 p.

32. Pancawardani F., Arini D., Yunindar R. P., Ramadhan M. L., Imran F. A., Nugroho Y. S. Analysis of Water Mist Fire Suppression System Applied on Cellulose Fire. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 170. P. 344–351. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.049.

33. Li J., Li Y. F., Bi Q., Li Y., Chow W. K., Cheng C. H., To C. W., Chow C. L. Performance evaluation on fixed water-based firefighting system in suppressing large fire in urban tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 84. P. 56–69. doi: 10.1016/j.tust.2018.10.020.

34. Христич В. В., Малярів М. В., Бондаренко С. М. Сучасні способи підвищення ефективності гасіння пожежі розпорошеною водою. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. № 40. С. 201–205. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198>.

35. Криворучко Є. М. Дослідження способів розпилення води. *Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС: матеріали круглого столу*. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С 53–54.

36. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А. Технічні засоби пожежогасіння дрібнорозпиленням водяним струменем. *Проблеми пожежної безпеки*. 2018. № 43. С. 45–53. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7022>.

37. Koval O., Kozerskyi M. The influence of hydraulic fluid viscosity on the process of their ultrasonic spraying. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 3 (81). P. 21–27. doi: 10.20535/2521-1943.2017.81.110866.

38. Trujillo M., Gurjar S., Mason M., Agarwal A. Global Characterization of the Spray Formation Process. *Atomization and Sprays*. 2018. Vol. 28 (9). P. 811–835. doi: 10.1615/AtomizSpr.2018027169.
39. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications / Ed. by M. M. Khait and A. M. L. Abom. New York: CRC Press, 2015. 492 p.
40. Розпилення. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F>.
41. Park S., Park K. Principles and droplet size distributions of various spraying methods: a review. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022. Vol. 36. P. 4033–4041. doi: 10.1007/s12206-022-0724-3.
42. Луговський О. Ф., Шульга А. В., Берник І. М., Гришко І. А., Мовчанюк А. В., Зілінський А. І. Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування: монографія. Вінниця: ФОП Кушнір Ю. В., 2022. 288 с.
43. Криворучко Є. М. Розвиток техніки пожежогасіння дрібнорозпиленними струменями води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 6.
44. Ляшок А. В. Пристрої ультразвукового розпилення рідини в системах мехатроніки: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Київ, 2014. 167 с.
45. Довідник пожежного рятувальника. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/9/5/7/7/2018-10-2-112-dovidnik-pozeznogo-ryatuvalnika-2018.pdf>.
46. Криворучко Є. М. Класифікація технічних засобів подачі вогнегасної речовини для гасіння пожеж: *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 80.
47. ДСТУ 2112-92 Стволи пожежні ручні. Технічні умови (ГОСТ 9923-93). З поправкою (ІПС № 7-1993). Київ: ТК 25, 1992. 12 с.
48. Protek – офіційний представник Protek в Україні.

URL: <http://protektfire.com.ua/http://protektfire.com.ua>.

49. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж: наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26.04.2018 р. № 340. Офіційний вісник України. 2018. № 57. С. 33.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text>.

50. Task Force Tips. URL: <https://tft.com>.

51. Handline Nozzle type. URL: <http://xmz.com.ua>.

52. Rosenbauer International AG. URL: www.rosenbauer.com.

53. ДСТУ EN 15182-1:2017 Стволи ручні пожежні. Частина 1. Загальні вимоги (EN 15182-1:2007 + A1:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 23 с.

54. ДСТУ EN 15182-2:2017 Стволи ручні пожежні. Частина 2. Комбіновані ручні пожежні стволи PN 16 (EN 15182-2:2007 + A1:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 21 с.

55. ДСТУ EN 15182-3:2017 Стволи ручні пожежні. Частина 3. Стволи PN 16 для формування суцільного струменя та/або струменя з одним фіксованим розпилювальним насадком (EN 15182-3:2007 + A1:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 19 с.

56. ДСТУ EN 15182-4:2017 Стволи ручні пожежні. Частина 4. Стволи PN 40 високого тиску (EN 15182-4:2007 + A1:2009, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 17 с.

57. Сучасні засоби автоматичного пожежогасіння: навч. посіб. / О. А. Антошкін та ін. Харків: НУЦЗ України, 2018. 272 с.

58. Вогнегасні речовини: посіб. / А. В. Антонов та ін. Київ: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.

59. Zhou Y., Bu R., Zhang X., Fan C., Gong J. Performance evaluation of water mist fire suppression: A clean and sustainable fire-fighting technique in mechanically-ventilated place. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 209. P. 1319–1331. doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.315.

60. Zhou Y., Bu R., Gong J., Zhang X., Fan C., Wang X. Assessment of a clean and efficient fire-extinguishing technique: Continuous and cycling discharge water mist system. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 182. P. 682–693. doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.046.
61. Shrigondekar H., Chowdhury A., Prabhu S. V. Characterization of a simplex water mist nozzle and its performance in extinguishing liquid pool fire. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 93. P. 441–455. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2018.01.015.
62. Zhu P., Wang X., Wang Z., Cong H., Ni X. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain. *Journal of Fire Sciences*. 2015. Vol. 33(4). P. 269–289. doi: 10.1177/0734904115585796.
63. Yuan Y., Wu S., Shen B. A Numerical simulation of the suppression of hydrogen jet fires on hydrogen fuel cell ships using a fine water mist. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (24). P. 13353–13364. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.130.
64. Wang Z., Wang X., Huang Y., Tao C., Zhang H. Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel. *Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 342. P. 231–241. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.08.026.
65. Pan L., Lo S. M., Liao G., Cong B. Experimental Study of Smoke Control in Subway Station for Tunnel Area Fire by Water Mist System. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 335–342. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.666.
66. Zhang P., Tang X., Tian X., Liu C., Zhong M. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 94. P. 706–714. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.10.110.
67. Виноградов А. Г., Яхно О. М. Процеси радіаційного нагрівання й випаровування крапель і їх вплив на екрануючі властивості протипожежних водяних завіс. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2016. № 1. С. 23–30. doi: 10.20535/1810-0546.2016.1.54479.
68. Виноградов А. Г., Випаровування дрібнорозпиленої води в умовах

теплообміну з нагрітим повітрям. *Вісник НТУУ «КПІ»*. 2009. № 56. С. 56–61.
URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6603>.

69. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., Криворучко Є. М., Гапоненко Ю. І. Дослідження впливу будівельного матеріалу конструкції будівлі на розвиток внутрішньої пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-13>.

70. Korytchenko K., Samoilenko D., Dubinin D., Kucherskyi V., Krivoruchko Y. Enhancing the Fire Resistance of Concrete Structures by Applying Fire-Retardant Temperature-Resistant Metal Coatings. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 500-505. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500>.

71. Wighus R., McDowell B. Water Mist Technology – History, Effectiveness and Efficiency. *Asia Pacific Fire*. 2013. № 45. P. 27–28.

72. McDowell B. Atomized Futures. *Industrial Fire Journal*. 2015. № 100. P. 54–56.

73. Дубінін Д. П., Криворучко Є. М. Розвиток становлення водяного туману для гасіння пожеж. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 133–134.

74. Lechler GmbH. URL: <https://www.lechler.com/de-en>.

75. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар: Протокол; ООН від 16.09.1987 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/995_215.

76. MS Scandinavian Star.
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/MS_Scandinavian_Star.

77. International Maritime Organization, IMO.
URL: <http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx>.

78. International Water Mist Association IWMA.
URL: <https://iwma.net/home>.

79. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., Криворучко Є. М.,

Гапоненко Ю. І. Експериментальне дослідження розвитку пожежі в будівлі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 110–121. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-8>.

80. Mawhinney J. R., Back G. G. III. Water mist fire suppression systems. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. ed. by M.J. Hurley et al. New York: Springer, 2016. P. 1587–1645.

81. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Обґрунтування технології створення дрібнорозпиленних водяних струменів для гасіння пожеж. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу*. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 110–112.

82. Антонов А. В. Вогнегасна ефективність струменів тонкорозпиленних водних вогнегасних речовин. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2013. № 1. С. 133–137. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvundipb_2013_1_24.

83. Zhang X., Ismail M. H. S., Ahmadun F. R., Abdullah, N. B. H., Hee C. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: A review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 32 (3). P. 707–724. doi: 10.1590/0104-6632.20150323s00003510.

84. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. *Fire Safety Journal*. 2022. Vol. 130. P. 103601. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103601.

85. ПРАТ Інститут «Спецавтоматика. URL: <http://specavtomatica.su>.

86. Звіт з НДР «Провести дослідження і розробити методики проведення вогневих випробувань для систем пожежогасіння тонкорозпиленними водними вогнегасними речовинами (Системи ТРВ – методики випробувань)». Київ: УкрНДІЦЗ, 2014. 333 с.

87. Тимчасові рекомендації щодо проектування, монтування та експлуатації автоматичних систем комбінованого пожежогасіння модульного типу тонкорозпиленними водними вогнегасними речовинами (АСКПГМТРВВР) виробництва «ЗАТ «Інститут «Спецавтоматика», Луганськ, Київ – 2010.

88. Marioff Corporation. URL: <https://www.marioff.com>.
89. KIDDE-DEUGRA Brandschutzsysteme GmbH. URL: <https://kiddedeugra.com>.
90. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Проектування систем пожежогасіння та пожежної сигналізації. Київ: ВГО «Український союз пожежної та техногенної безпеки», 2014. 97 с.
91. ДСТУ CEN/TS 14972:2016. Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проектування та монтування (CEN/TS 14972:2011, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 207 с.
92. Fireco S.R.L. URL: <https://www.fireco.eu>.
93. Danfoss Fire Safety A/S. URL: <https://semsafe.danfoss.com>.
94. HI-FOG® Fire Protection. URL: <https://www.marioff.com>.
95. FOGTEC Fire Protection. URL: <https://fogtec-international.com>.
96. Aquasys Technik GmbH. URL: <https://www.aquasys.at/en>.
97. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Застосування дрібнорозпиленних водяних струменів під час гасіння пожежі. *Problems of Emergency Situations: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 79–81.
98. MINIMAX Brandschutz-Sortiment. URL: <http://www.minimax.ch>.
99. KAMAT GmbH & Co. KG. URL: <https://www.kamat.de>.
100. IFEX ® Technologies GmbH. URL: <https://www.ifex3000.com>.
101. Криворучко Є. М. Дослідження процесу розпилення води під дією ударної хвилі. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 125.
102. Криворучко Є. М. Подрібнення води ударною хвилею. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація: матеріали круглого столу (вебінару)*. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 167–169.
103. Rodriguez V., Jourdan G., Marty A., Allou A., Parisse J. D. Planar shock wave sliding over a water layer. *Experiments in Fluids*. 2016. Vol. 57. P. 125.

doi: 10.1007/s00348-016-2217-6.

104. Stefanski K., Lewandowski D., Dygdala R., Kaczorowski M., Ingwer-Żabowska M., Smigielski G., Papliński, A. Explosive Formation and Spreading of Water-Spray Cloud – Experimental Development and Model Analyses. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2009. Vol. 6. P. 291–302.

105. Liu J., Liang D., Zhao Z., Dong W. Progress in Research and Application of Electronic Ultrasonic Water Mist Fire Suppression Technology. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 288–295. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.659.

106. Xiang G., Wang B. Numerical study of a planar shock interacting with a cylindrical water column embedded with an air cavity. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 825. P. 825–852. doi: 10.1017/jfm.2017.403.

107. Rodriguez V., Jourdan G., Marty A., Allou A., Parisse, J. D. Interaction of a Planar Shock Wave with a Water Surface. *In book: 31st International Symposium on Shock Waves I*. 2019. Vol. 1. P. 429–434. doi: 10.1007/978-3-319-91020-8_49.

108. Dubinin D., Korytchenko K., Krivoruchko Y., Tryfonov O., Sakun O., Ragimov S., Tryhub V. Numerical studies of the breakup of the water jet by a shock wave in the barrel of the fire extinguishing installation. *Sigurnost*. 2024. Vol. 66 (2). P. 139–150. doi: <https://doi.org/10.31306/s.66.2.4>.

109. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Криворучко Є. М., Рагімов С. Ю., Тригуб В. В. Особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 2(38). С. 69–79. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2023-38-5>.

110. Bheekhun N., bin Abu Talib A. B. D. R., Hasini H., Hassan M. R. Flame Temperature Distribution from ISO2685 Standard Propane-Air Burner Using CFD. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 564. P. 240–244. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.564.240.

111. Korytchenko K. V., Kucherskyi V. Yu., Krasnoshapka R. Y., Dubinin D. P., Shevchenko S. M., Kovalenko R. I. Comparing of the characteristics of thermal spray coating technologies: air-fuel detonation aluminum spraying onto steel with other technologies. *Journal Functional Materials*. 2023. Vol. 30 (1). P. 65–73.

doi: 10.15407/fm30.01.65.

112. ANSYS_Fluent_Theory_Guide. URL: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf.

113. Parham K., Esmailzadeh E., Atikol U., Aldabbagh L. A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries. *Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 47. P. 427–437. doi: 10.1007/s00231-010-0741-0.

114. Клапан VZWD. URL: <http://technical.com.ua/ru/valve-vzwd-l-m22c-m-g14-40-v-1p4-8>.

115. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Математичне моделювання впливу поширення ударної хвилі на потік води у стволі установки пожежогасіння. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених*. м. Харків: НУЦЗ України, 2022. – С. 156.

116. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці: підручник 5-те вид., Львів: Афіша, 2001. 350 с.

117. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finely-dispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2/10 (92). P. 8–43. doi:10.15587/1729-4061.2018.127865.

118. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Slepuzhnikov E., Nikorchuk A., Tsebriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gasdetonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3/5 (93). P. 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193.

119. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., Криворучко Є. М. Тенденції розвитку імпульсних вогнегасних систем для гасіння пожеж дрібнорозпилим водяним струменем. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 45. С. 41–47. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9027>.

120. Дубінін Д. П., Криворучко Є. М. Обґрунтування технічних характеристик імпульсних вогнегасних систем «IFEX». *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах*: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). м. Київ: ІДУЦЗ. 2019. С. 87–90.

121. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., Криворучко Є. М. Експериментальне дослідження водяного аерозолю, що створюється установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 47. С. 29–34. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10844>.

122. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Зі Зміною № 1. Київ: УкрНДІводоканалпроект, 2013. 172 с.

123. Дубінін Д. П., Криворучко Є. М. Дослідження застосування дрібнорозпиленого водяного струменя для гасіння пожеж. *Безпека людини у сучасних умовах*: збірник доповідей XII Міжнародної науково-методичної конференції та 144 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS). м. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 253–255.

124. Dubinin D., Krivoruchko Y., Lisniak A. Research of creation of fine dispersed water jet for fire extinguishing. *Der sammlung wissenschaftlicher arbeiten «ΛΟΓΟΣ» Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz «Multidisziplinäre forschung: perspektiven, probleme und muster»*. Ullstein Buchverlage GmbH & Europäische. Wien-Vinnytsia. 2021 P. 131–132. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-09.04.2021.v1.44>.

125. PCB Piezotronics. URL: <https://www.pcb.com/products?m=113b22>.

126. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Криворучко Є. М., Думчикова Д. М. Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі водяним аерозолем у приміщеннях складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46. С. 47–53. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10560>.

127. Дубінін Д. П., Криворучко Є. М. Проведення дослідження із визначення довжини та висоти розповсюдження водяного аерозолю. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали X Всеукраїнської науково-

практичної конференції з міжнародною участю. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2020. С. 34–36.

128. Abdelouahab M., Gatignol R. Study of falling water drop in stagnant air. *European Journal of Mechanics – B/Fluids*. 2016. Vol. 60. P. 82–89. doi: 10.1016/j.euromechflu.2016.07.007.

129. Штангрет Н. О. Підвищення ефективності ліквідування пожеж у підвальних приміщеннях комбінованим застосуванням димовсмоктувачів та струменів тонкорозпиленої води: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02. Львів, 2019. 24 с.

130. Lin Z., Bu R., Zhao J., Zhou Y. Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 13. P. 100402. doi: 10.1016/j.csite.2019.100402.

131. Cao X., Ren J., Bi M., Zhou Y., Li Y. Experimental research on the characteristics of methane/air explosion affected by ultrafine water mist. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 324 (Part B). P. 489–497. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.017.

132. Bu R., Yang H., Xie Y., Zhao W., Fan C., Guo Z., Zhou Y. Application of the high-pressure water mist system in a railway tunnel rescue station. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2022. Vol. 35. P. 101467, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101467.

133. Liu T., Tao C., Wang X. Cooling control effect of water mist on thermal runaway propagation in lithium ion battery modules. *Applied Energy*. 2020. Vol. 267. P. 115087. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115087.

134. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., Криворучко Є. М., Белоусов І. О. Експериментальне дослідження подавання водяного аерозолю через трубопровід складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 48. С. 45–52. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12016>.

135. Дубінін Д. П., Криворучко Є. М. Дослідження застосування складних конструкцій житлових будівель для подачі водяного аерозолю.

Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: збірник наукових праць Регіональної науково-практичної конференції. м. Львів: ЛДУ БЖД. 2020. С. 131–134.

136. Dubinin D., Lisniak A., Krivoruchko Y., Pobidash A., Experimental Investigations of the Thermal Decomposition of Wood at the Time of the Fire in the Premises of Domestic Buildings. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1066. P. 191–198. doi: <https://doi.org/10.4028/p-8258ob>.

137. Masterton W. L., Hurley C. N. Chemistry: Principles and Reactions. 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2016. 800 p.

138. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 р. № 5403-VI. Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34-35. С. 1802 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text>.

139. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 02.04.2024 р. № 375. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf>.

140. Про організацію гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій: окреме доручення Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 23.05.2022 р. № В-269 URL: <https://if.dsns.gov.ua/upload/1/1/9/3/3/4/7/Vr00vOSx9wVORgnKSrdVAYnz6P9sLaTd1EVLmisK.pdf>.

141. Про організацію оперативних дій під час гасіння пожеж з наявністю небезпечних хімічних речовин: окреме доручення Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 12.09.2022 р. № В-577.

142. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями в сучасних умовах. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 248–249.

143. Криворучко Є. М., Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-

практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 164.

144. Про забезпечення безпеки: окреме доручення Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 22.03.2022 р. № 022-01-од ппу URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u184/metodichni_rekomendaciyi_pes_vn_p_pmd.doc.pdf.

145. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>.

146. Правила безпеки праці в органах та підрозділах МНС України: наказ Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 07.05.2007 р. № 312. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya_diyalnosti/slugbova_pidgotovka/normativno_pravovi_akti_nakazi/PRAVIL_Ohor-Pr_MNS.pdf.

147. Розбірна проміжна ємність для зберігання рідини: пат. 151203, МПК (2022.01) B65D 6/00, A62C 99/00, E03B 11/00. № u202200208; заяв. 17.01.2022; опубл. 15.06.2022, бюл. № 24.

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації

Публікації у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus:

A1. Dubinin D., Lisniak A., **Krivoruchko Y.**, Pobidash A. Experimental Investigations of the Thermal Decomposition of Wood at the Time of the Fire in the Premises of Domestic Buildings. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1066. P. 191–198. doi: <https://doi.org/10.4028/p-8258ob>.

A2. Korytchenko K., Samoilenko D., Dubinin D., Kucherskyi V., **Krivoruchko Y.** Enhancing the Fire Resistance of Concrete Structures by Applying Fire-Retardant Temperature-Resistant Metal Coatings. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 500-505. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.500>.

A3. Dubinin D., Korytchenko K., **Krivoruchko Y.**, Tryfonov O., Sakun O., Ragimov S., Tryhub V. Numerical studies of the breakup of the water jet by a shock wave in the barrel of the fire extinguishing installation. *Sigurnost*. 2024. Vol. 66 (2). P. 139–150. doi: <https://doi.org/10.31306/s.66.2.4>.

Публікації в наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

A4. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.** Тенденції розвитку імпульсних вогнегасних систем для гасіння пожеж дрібнорозпилим водяним струменем. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 45. С. 41–47. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9027>.

A5. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., **Криворучко Є. М.**, Думчикова Д. М. Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі водяним аерозолем у приміщеннях складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. № 46. С. 47–53. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10560>.

A6. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.** Експериментальне дослідження водяного аерозолі, що створюється установкою пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 47. С. 29–34. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10844>.

A7. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А., **Криворучко Є. М.**,

Белоусов І.О. Експериментальне дослідження подавання водяного аерозолю через трубопровід складної конфігурації. *Проблеми пожежної безпеки*. 2020. № 48. С. 45–52. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12016>.

А8. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., **Криворучко Є. М.**, Гапоненко Ю. І. Експериментальне дослідження розвитку пожежі в будівлі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2021. № 2 (34). С. 110–121. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2021-34-8>.

А9. Дубінін Д. П., Лісняк А. А., Шевченко С. М., **Криворучко Є. М.**, Гапоненко Ю. І. Дослідження впливу будівельного матеріалу конструкції будівлі на розвиток внутрішньої пожежі. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2022. № 1(35). С. 175–185. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2022-35-13>.

А10. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., **Криворучко Є. М.**, Рагімов С. Ю., Тригуб В. В. Особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 2(38). С. 69–79. doi: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2023-38-5>.

Патенти України на корисну модель:

А11. Розбірна проміжна ємність для зберігання рідини: пат. №151203 Україна. № u202200208, заяв. 17.01.2022; опубл. 15.06.2022, Бюл. № 24.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

А12. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Обґрунтування технічних характеристик імпульсних вогнегасних систем «IFEX». *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах*: матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). м. Київ: ІДУЦЗ. 2019. С. 87–90.

А13. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Дослідження застосування складних конструкцій житлових будівель для подачі водяного аерозолю. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення*: збірник наукових праць Регіональної науково-практичної

конференції. м. Львів: ЛДУ БЖД. 2020. С. 131–134.

А14. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Проведення дослідження із визначення довжини та висоти розповсюдження водяного аерозолю. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: матеріали Х Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2020. С. 34–36.

А15. **Криворучко Є. М.**, Дубінін Д. П. Застосування дрібнорозпиленних водяних струменів під час гасіння пожежі. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 79–81.

А16. **Криворучко Є. М.** Класифікація технічних засобів подачі вогнегасної речовини для гасіння пожеж: *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2020. С. 80.

А17. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.** Дослідження застосування дрібнорозпиленого водяного струменя для гасіння пожеж. *Безпека людини у сучасних умовах*: збірник доповідей XII Міжнародної науково-методичної конференції та 144 Міжнародної наукової конференції Європейської Асоціації наук з безпеки (EAS). м. Харків: НТУ «ХП», 2020. С. 253–255.

А18. **Криворучко Є. М.** Дослідження способів розпилення води. *Суб'єкти забезпечення цивільного захисту (регіонального та місцевого рівня) в реалізації завдань із запобігання та ліквідації наслідків НС*: матеріали круглого столу. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 53–54.

А19. Дубінін Д. П., **Криворучко Є. М.**, Розвиток становлення водяного туману для гасіння пожеж. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 133–134.

А20. **Криворучко Є. М.** Розвиток техніки пожежогасіння дрібнорозпиленими струменями води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції

молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2021. С. 6.

A21. Dubinin D., **Krivoruchko Y.**, Harbuz S. Investigation of the influence of water dispersion on the fire extinguishing process. *Sectoral research XXI: characteristics and features: collection of scientific papers «SCIENTIA» II International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference. European Scientific Platform. Chicago, USA. 2021. P. 63–64.*
URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/scientia/article/view/15324>.

A22. Dubinin D., **Krivoruchko Y.**, Lisniak A. Research of creation of fine dispersed water jet for fire extinguishing. *Der sammlung wissenschaftlicher arbeiten «ΛΟΓΟΣ» Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen konferenz «Multidisziplinäre forschung: perspektiven, probleme und muster».* Ullstein Buchverlage GmbH & Europäische. Wien-Vinnytsia. 2021 P. 131–132.
DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-09.04.2021.v1.44>.

A23. **Криворучко Є. М.** Дослідження процесу розпилення води під дією ударної хвилі. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 125.

A24. **Криворучко Є. М.** Подрібнення води ударною хвилею. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація: матеріали круглого столу (вебінару).* м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 167–169.

A25. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Математичне моделювання впливу поширення ударної хвилі на потік води у стволі установки пожежогасіння. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених.* м. Харків: НУЦЗ України, 2022. – С. 156.

A26. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Обґрунтування технології створення дрібнорозпилених водяних струменів для гасіння пожеж. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу.* м. Харків: НУЦЗ України, 2022. С. 110–112.

A27. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Обґрунтування умов припинення горіння та доцільність застосування дрібнорозпиленої води. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 163.

A28. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями в сучасних умовах. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 248–249.

A29. **Криворучко Є. М.,** Дубінін Д. П. Застосування установки пожежогасіння дрібнодисперсними водяними струменями. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. м. Харків: НУЦЗ України, 2023. С. 164.

ДОДАТОК Б

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступника начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області

Олександр ЧАПЛИГІН

2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів отриманих в ході виконання дисертаційних досліджень
КРИВОРУЧКА Євгена Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за темою: «Удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем»

Комісія у складі: голови – начальника управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області Євгена ТУНІКА; членів комісії: заступника начальника управління реагування на надзвичайні ситуації-начальника відділу організації реагування та готовності підрозділів ГУ ДСНС України у Харківській області Івана ТРОФІМОВА; провідного фахівця відділу організації пожежогасіння та роботи з об'єктовими підрозділами управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області Юлії СЕНЧИХІНОЇ, склала цей акт про те, що практичні результати, одержані особисто Євгеном КРИВОРУЧКОМ в ході виконання дисертаційних досліджень за темою: «Удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем» у вигляді результатів математичного моделювання процесу заповнення модельного приміщення дрібнодисперсним водяним струменем при розмірі крапель 5 мкм та результатів експериментальних досліджень впроваджені у діяльність пожежно-рятувальних підрозділів ГУ ДСНС України у Харківській області. Результати математичного моделювання застосовуються для прогнозування можливої оперативної обстановки, а експериментальні дослідження спрямовані на підвищення безпеки та ефективності проведення оперативних дій під час гасіння пожеж в приміщеннях.

Голова комісії:

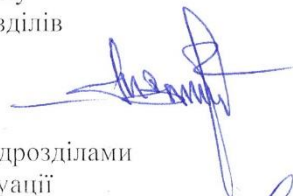
Начальника управління реагування
на надзвичайні ситуації
ГУ ДСНС України у Харківській області



Євген ТУНІК

Члени комісії:

Заступник начальника управління реагування
на надзвичайні ситуації – начальника відділу
організації реагування та готовності підрозділів
ГУ ДСНС України у Харківській області



Іван ТРОФІМОВ

Провідний фахівець відділу організації
пожежогасіння та роботи з об'єктовими підрозділами
управління реагування на надзвичайні ситуації
ГУ ДСНС України у Харківській області



Юлія СЕНЧИХІНА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник 1 державного пожежно-рятувального загону Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Сумській області

Іван МОСКАЛЕНКО



2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів отриманих в ході виконання дисертаційних досліджень
КРИВОРУЧКА Євгена Миколайовича на здобуття наукового ступеня
доктора філософії за темою: «Удосконалення техніки гасіння пожежі
дрібнодисперсним водяним струменем»

Комісія у складі: голови - заступника начальника 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Сумській області Віталія ФЕДОРЕНКА та членів комісії: начальника 1 ДПРЧ 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Сумській області Артема ТИМОШИКА та фахівця відділення організації реагування на надзвичайні ситуації 1 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Сумській області Олега ЛИСЕНКА, склала цей акт про те, що практичні результати, одержані особисто КРИВОРУЧКОМ Євгеном Миколайовичем в ході виконання дисертаційних досліджень за темою: «Удосконалення техніки гасіння пожежі дрібнодисперсним водяним струменем» у вигляді результатів експериментальних досліджень розробленої установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії впроваджені у практичну діяльність підрозділу.

Експериментальні дослідження установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії дозволяють сформувати перспективні напрямки розвитку технічних засобів пожежогасіння спрямовані на підвищення ефективності та безпекової складової під час проведення оперативних дій.

Голова комісії:

Заступник начальника 1 державного пожежно-рятувального загону Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Сумській області

Віталій ФЕДОРЕНКО

Члени комісії:

Начальник 1 державної пожежно-рятувальної частини 1 державного пожежно-рятувального загону Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Сумській області

Артем ТИМОШИК

Фахівець відділення організації реагування
на надзвичайні ситуації 1 державного
пожежно-рятувального загону Головного
управління Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
у Сумській області



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "О.Л.", which corresponds to the name Oleh Lisenko.

Олег ЛИСЕНКО