

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Кравченко Антон Вікторович**

УДК 614.841

**ДИСЕРТАЦІЯ**

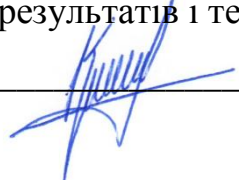
**ПІДШАРОВЕ ГАСІННЯ СПИРТІВ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ**

261 – пожежна безпека

21 – 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

  
\_\_\_\_\_ А.В. Кравченко

Науковий керівник **Баланюк Володимир Мірчович,**  
доктор технічних наук, доцент

Львів – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Кравченко А.В.* Підшарове гасіння спиртів вогнегасним аерозолем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 216 – пожежна безпека. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності ДСНС України, Львів, 2021.

У дисертаційній роботі, яка є закінченим науковим дослідженням, розв'язано актуальну науково-технічну задачу розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння спиртів у резервуарах при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолю, як наукового підґрунтя підвищення ефективності систем підшарового пожежогасіння резервуарів із спиртами.

У роботі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи та важливість використання вогнегасного аерозолю для підшарового гасіння спиртів.

Проведено аналіз пожеж на спиртових підприємствах та встановлено, що при великих об'ємах горіння спирту теплове випромінювання набуває значного впливу на швидкість горіння спирту. Також встановлено, що при значних об'ємах горіння спирту існуючі пінні засоби пожежогасіння подеколи не забезпечують повного гасіння, а витрата піноутворювача може бути більшою за об'єм самого спирту який горить.

У дисертаційній роботі за результатами аналізу сучасного стану розроблення та застосування систем підшарового та аерозольного пожежогасіння висунуто ідею, що одним із шляхів підвищення ефективності підшарового пожежогасіння є подавання вогнегасного аерозолю підшарово з метою припинення горіння спирту.

Також проведено аналіз існуючих вогнегасних способів та засобів підшарового гасіння, встановлено їх недоліки та показано особливості їх застосування. Теоретично обґрунтовано можливість підвищення

ефективності систем підшарового гасіння спиртів у резервуарах шляхом підшарового подавання вогнегасного аерозолу з дна резервуара. Обґрунтовано, що при підшаровому подаванні аерозолу успішність гасіння забезпечується сумарною дією чинників, які виникають в момент виходу, проходження через шар рідини та вихід аерозолу на поверхню спирту. Проаналізовано існуючі методи підшарового гасіння та виявлено можливості застосування вогнегасного аерозолу для гасіння при підшаровому подаванні аерозолу з дна резервуара зі спиртом. Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження щодо виявлення чинників впливу на ефективність процесу припинення горіння у разі підшарового подавання аерозолу з дна резервуара зі спиртом. Виявлено ефект синергізму чинників при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолу з дна резервуара через кільцевий розподільник, який розташований біля бортів, роль якого полягає у зниженні часу гасіння до 2 разів, за умови подавання вогнегасного аерозолу в центрі резервуара.

У результаті дослідження виявлено ефект синергізму, який полягає у безпосередньому одночасному забезпеченні охолоджуючого ефекту, що виникає в результаті виходу аерозолу на поверхню, при перемішуванні спирту та охолодженні верхнього киплячого шару спирту та стінок резервуара внаслідок виходу аерозолу на поверхню рідини. При цьому експериментально встановлено, що зменшення розміру бульбашок (1-5 мм) забезпечує більш рівномірний вихід та ефективність гасіння спирту за рахунок утворення пінистого гетерогенного шару на поверхні спирту, який складається з бульбашок та спирту.

Експериментально встановлено інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 та 60 мм від поверхні спиртового полум'я площею  $234 \text{ см}^2$ . Встановлено, що значення інтенсивності теплового випромінювання для зазначених спиртів становить від 0,8 до  $4,7 \text{ кВт/м}^2$ , а інтенсивність випромінювання максимально збільшується від 30 до 40 секунд горіння, що пояснюється нагріванням поверхні спирту і збільшенням

інтенсивності його випаровування. Також експериментально встановлено, що інтенсивність теплового випромінювання для етанолу значно зменшується при інтенсивностях подавання аерозолу до 1,2 г/с, що забезпечує зменшення полум'я до 2 разів та подальшого гасіння. При цьому встановлено, що основним фактором, який впливає на силу горіння є інтенсивність випромінювання, яка забезпечує нагрівання поверхні рідини та стінки резервуара. Розроблено математичне планування експерименту щодо впливу концентрації аерозолу та густини горючої рідини на час ліквідації горіння при умові підшарового гасіння.

Зважаючи, що проведення експерименту з визначення інтенсивності теплового випромінювання горіння спиртів при підшаровому подаванні аерозолу здійснювалось в лабораторних умовах, то було встановлено регресійну залежність, яку було показано у вигляді поліноміальних рівнянь регресії.

Також в роботі теоретично обґрунтовано та показано взаємозв'язки чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів вогнегасними аерозолями. Встановлено, що підшарове подавання вогнегасного аерозолу реалізовує ряд чинників, які синергічно забезпечують зниження інтенсивності теплового випромінювання за рахунок охолодження спирту, флегматизування зони парів і газів, інгібування зони реакції горіння та розсіювання тепла разом з нагрітим аерозолем. Крім цього, винесення аерозолу разом з продуктами горіння із зони реакції горіння забезпечує екранування навколишнього простору від теплового випромінювання полум'я. У результаті аналізу теоретичних та експериментальних результатів дослідження було обґрунтовано вихідні дані системи підшарового аерозольного пожежогасіння з виходом вогнегасного аерозолу на поверхню через кільце-розподільник. Також розроблено схематичну конструкцію системи аерозольного підшарового гасіння. Розроблено технічні документи, виготовлено дослідний зразок системи аерозольного підшарового гасіння, проведено апробацію в

полігонних умовах, а також напрацьовано рекомендації щодо їх застосування для протипожежного захисту об'єктів з можливістю виникнення пожеж класу В.

Результати досліджень впроваджено в системі підшарового аерозольного пожежогасіння для протипожежного захисту резервуара із спиртом об'ємом 5 м<sup>3</sup>, на підприємстві, яке спеціалізується на дистиляції, ректифікації та змішуванні спиртних напоїв, ТзОВ «Гуральня Бруницьких», за адресою: 81555, Львівська обл., Городоцький р-н, селище міського типу Великий Любінь, вул.Львівська, будинок 176. Також результати досліджень впроваджено у вигляді установки та методики випробувань у науково-випробувальній лабораторії Львівського державного університету безпеки життєдіяльності та лекційних матеріалах під час викладання дисципліни «Теорія розвитку та припинення горіння».

**Ключові слова:** вогнегасний аерозоль, інгібітори горіння, аерозольне пожежогасіння, підшарове гасіння, гасіння спиртів, флегматизатори.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Журнал у наукометричній базі Scopus*

1. Баланюк В.М., Кравченко, А.В., Гарасим'юк О.І. (2021). Зменшення інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів екологічно прийнятними аерозолями. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (109), 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225216>

### *Наукові статті у фахових виданнях*

2. Проблеми гасіння пожеж спиртів та їх сумішей / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, Ю.О. Копистинський, А.В. Кравченко // *Пожежна безпека*. - 2018. - № 33. - С. 5-9. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.01
3. Спосіб підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, А.В. Кравченко / *Технічні науки. Scientific Journal*

- «ScienceRise» №1(54) 2019, 11-15. 2019 DOI: 10.15587/2313-8416.2019.156097
4. Перспективи аерозольного підшарового гасіння спиртів / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, А.В. Кравченко // Пожежна безпека. 35, 5-9. DOI: 10.32447/20786662.35.2019.01
  5. Підшарове гасіння спиртів бінарними сумішами вогнегасного аерозолю та CO<sub>2</sub> / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, А.В. Кравченко, О.І. Гарасимюк // Пожежна безпека. 36, 5-9. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.01
  6. Деякі температурні характеристики підшарового аерозольного гасіння спиртів / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, А.В. Кравченко // Пожежна безпека. 37, 11-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.02>
- Інші видання***
7. Баланюк В.М., Кравченко А.В., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Копистинський Ю.О. Синергізм чинників при підшаровому аерозольному гасінні спиртів у резервуарах // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2020. — №16. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-16-6390>
- Матеріали та тези конференцій***
8. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Кравченко А.В. Підшарове гасіння пожеж резервуарів з спиртами вогнегасним аерозолем. The 9th International conference —Science and society (February 1, 2018) Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada. 2019. 1359 p. С. 239 -243.
  9. Баланюк В. М., Кравченко А.В. Переваги аерозольного підшарового гасіння спиртів. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали ІХ Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. – С.137-139.
  10. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Кравченко А.В. Вогнегасна та флегматизувальна ефективність бінарних газоаерозольних систем. Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю).

Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: – Електронне видання комбінованого використання. – Київ: ІДУЦЗ, 2019. – С. 25-27.

11. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Кравченко А.В. К вопросу использования огнетушащего аэрозоля для подслоного тушения спиртов. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of II International Scientific and Practical Conference Kyoto, Japan. 4-6 November. 2020 С. 232 -236.

12. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Кравченко А.В. Екологічно прийнятні вогнегасні бінарні газоаерозольні суміші. Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека об'єктів туристично-рекреаційного комплексу» м. Львів, 5-6 грудня 2019 р. С. 74-75.

13. Баланюк В.М., Кравченко А.В., Гарасим'юк О.І., Екологічні переваги підшарового аерозольного гасіння. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції. 26 березня 2021 р. Електронне видання комбінованого використання - м. Львів 2021. – С. 25-27.

## ABSTRACT

*Anton Kravchenko.* Sublayer extinguishing of alcohols by fire extinguishing aerosol. - Qualifying scientific work on manuscript copyright.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 216 - fire safety. Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2021.

In the dissertation work, which is a completed scientific research, the actual scientific and technical problem of revealing the peculiarities of the influence of factors on the processes of stopping the burning of alcohols in tanks with sublayer supply of fire extinguishing aerosol as a scientific basis for improving the efficiency of sublayer fire extinguishing systems.

The relevance of the dissertation topic and the importance of using fire-extinguishing aerosol for sublayer extinguishing of alcohols are substantiated in the work.

The analysis of fires at alcohol enterprises was carried out in the work and it was established that at significant volumes of alcohol combustion thermal radiation has a significant effect on the rate of alcohol combustion. It has also been found that with significant volumes of alcohol combustion, the existing foam extinguishing agents sometimes do not provide complete extinguishing, and the consumption of foaming agent can be much larger even than the volume of the alcohol itself that burns.

In the dissertation, based on the analysis of the current state of development and application of sublayer and aerosol fire extinguishing systems, the idea is put forward that one of the ways to increase the efficiency of sublayer fire extinguishing is to supply fire extinguishing aerosol sublayer to stop alcohol burning.

The analysis of the existing fire extinguishing methods and means of sublayer extinguishing is carried out in the work, their shortcomings are established and features of their application are shown. The possibility of increasing the efficiency of sublayer extinguishing systems of alcohols in tanks by



sublayer supply of fire-extinguishing aerosol from the bottom of the tank is theoretically substantiated. It is substantiated that at sublayer aerosol supply the final fire-extinguishing effect at sublayer aerosol supply is provided by total action of the factors arising at the moment of an exit, passing through a liquid layer and an aerosol exit on an alcohol surface. The existing methods of sublayer extinguishing are analyzed and the possibilities of application of fire extinguishing aerosol for extinguishing at sublayer supply of aerosol from the bottom of the tank with alcohol are revealed. A method has been developed and experimental studies have been carried out to identify the influence of factors on the efficiency of the combustion cessation process in the case of sublayer aerosol supply from the bottom of an alcohol tank. The effect of synergism of factors in the sublayer supply of fire-extinguishing aerosol from the bottom of the tank through the annular distributor, which is located near the sides, the essence of which is to reduce the quenching time to 2 times, compared with the supply of fire-extinguishing aerosol in the center of the tank.

The study revealed the effect of synergism, which consists in the direct simultaneous provision of the cooling effect resulting from the aerosol on the surface when mixing alcohol and cooling the upper fluidized bed of alcohol and tank walls due to the aerosol on the surface of the liquid. It was experimentally established that the reduction of the size of the bubbles (1-5 mm) provides a more uniform yield and effective quenching of alcohol due to the formation of a foamy heterogeneous layer on the surface of the alcohol which consists of bubbles and alcohol.

The intensity of thermal radiation at an distance of 30 and 60 mm from the surface of an alcohol flame with an area of  $234 \text{ cm}^2$  was experimentally established. It is established that the value of the intensity of thermal radiation for these alcohols is from 0.8 to  $4.7 \text{ kW} / \text{m}^2$ , and the radiation intensity increases from 30 to 40 seconds of combustion, due to heating of the alcohol surface and increasing the intensity of its evaporation. It has also been experimentally established that the intensity of thermal radiation for ethanol is significantly

reduced at aerosol supply intensities of up to 1.2 g / s, which reduces the flame by up to 2 times and then extinguishes it. It was found that the main factor influencing the intensity of combustion is the intensity of radiation, which provides heating of the liquid surface and the tank wall. Mathematical planning of the experiment on the influence of aerosol concentration and combustible liquid density on the elimination of combustion under the condition of sublayer quenching has been developed.

Considering that the experiment to determine the intensity of thermal radiation of alcohol combustion during sublayer aerosol supply was carried out in the laboratory, a regression dependence was established which was shown in the form of polynomial regression equations.

The paper also theoretically substantiates and shows the relationships of factors that lead to a decrease in the intensity of thermal radiation during sublayer quenching of alcohols with fire-extinguishing aerosols. It is established that the sublayer supply of fire extinguishing aerosol implements a number of factors that synergistically reduce the intensity of thermal radiation by cooling alcohol, phlegmatizing the vapor and gas zone, inhibiting the combustion reaction zone and heat dissipation together with the heated aerosol. In addition, the removal of the aerosol together with the combustion products from the combustion reaction zone provides shielding of the surrounding space from the thermal radiation of the flame. As a result of analyzes of theoretical and experimental results of the study, the initial data of the sublayer aerosol fire extinguishing system with the release of fire extinguishing aerosol to the surface through the distributor ring were substantiated. A circuit solution for the design of the aerosol sublayer extinguishing system has also been developed. Technical documents have been developed, a prototype of an aerosol sublayer extinguishing system has been prepared, testing in landfill conditions has been carried out, and recommendations for their use for fire protection of objects with the possibility of class B fires have been developed.

The research results were implemented in the system of sublayer aerosol fire extinguishing for fire protection of a tank with alcohol volume of 5 m<sup>3</sup>, at the enterprise specializing in distillation, rectification and mixing of alcoholic beverages, LLC "Brunitsky Huralnya", at the address: 81555, Lviv. district, urban-type settlement Velykyi Lyubyn, Lvivska Street, building 176. Also, the research results were implemented in the form of installation and test methods in the research laboratory of Lviv State University of Life Safety and lecture materials during the teaching of the discipline "Theory of development and cessation of combustion ».

Key words: fire extinguishing aerosol, combustion inhibitors, aerosol fire extinguishing, sublayer extinguishing, alcohol extinguishing, phlegmatizers.

**LIST OF PAPERS PUBLISHED ON THE TOPIC OF THE  
DISSERTATION**

*Journal in the scientometric database Scopus*

1. Balanyuk, V., Kravchenko, A., Harasymyuk, O. (2021). Reducing the intensity of thermal radiation at the sublayer extinguishing of alcohols by ecologically acceptable aerosols. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (109), P. 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225216>

*Scientific articles in professional journals*

2. Balanyuk, V., Kozyar, N., Kopystynskyi, Y., Kravchenko, A. (2018). Extinguishing fires of alcohols and their mixtures. *Fire Safety*, (33), Pp. 5-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.33.2018.01>

3. Method of sublayer fire extinguishing of alcohols by fire extinguishing aerosol. V. Balanyuk, N. Kozyar, A. Kravchenko - *ScienceRise, Scientific Journal «ScienceRise» No1(54) 2019*, Pp. 11-15. 2019  
DOI: 10.15587/2313-8416.2019.156097

4. Balanyuk, V., Kozyar, N., Kravchenko, A. (2019). Prospects aerosol sublayer quenching of alcohols. *Fire Safety*, 35, Pp. 5-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.35.2019.01>

5. Balanyuk, V., Kozyar, N., Kravchenko, A. (2020). Sub-layer extinguishing of alcohols by binary mixtures of fire-extinguishing aerosol and CO<sub>2</sub>. *Fire Safety*, 36, Pp. 5-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.36.2020.01>

6. Balanyuk, V., Kozyar, N., Kravchenko, A. (2021). Some temperature characteristics sub-layer aerosol extinguishing of alcohols. *Fire Safety*, 37, Pp. 11-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.02>

*Other editions*

7. Balanyuk, V., Kravchenko, A., Kozyar, N., Harasymyuk, O., Kopystynskyi, Y. (2020). Synergism of factors in sublayer aerosol extinguishing of alcohols in tanks. // Scientific journal "Internauka" — 2020. — №16. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2020-16-6390>

*Proceedings and abstracts of conferences*

8. Balanyuk V., Kozyar N., Kravchenko A. Sublayer fire extinguishing of tanks with alcohols with fire extinguishing aerosol The 9th International conference — Science and society (February 1, 2018) Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada. 2019. 1359. Pp. 239 -243.

9. Balanyuk V., Kravchenko A. Advantages of aerosol sublayer quenching of alcohols. Emergencies: security and protection: Proceedings of the IX All-Ukrainian scientific-practical conference with international participation. - Cherkasy: CHIPB them. Heroes of Chernobyl NUTSZ of Ukraine, 2019. Pp.137-139.

10. Balanyuk V., Kozyar N., Kravchenko A. Fire extinguishing and phlegmatizing efficiency of binary gas aerosol systems. Proceedings of the 21st All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (with international participation). Development of civil protection in modern security conditions: - Electronic edition of combined use. - Kyiv: IDUTS, 2019. Pp. 25-27.

11. Balanyuk V., Kozyar N., Harasymyuk O., Kravchenko A. On the issue of using a fire-extinguishing aerosol for sub-layer extinguishing of alcohols. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of II International Scientific and Practical Conference Kyoto, Japan. 4-6 November. 2020. Pp. 232 -236.

12. Balanyuk V., Kozyar N., Harasymyuk O., Kravchenko A. Ecologically accepted fire-extinguishing binary gas-aerosol mixtures. Proceedings of the First International Scientific and Practical Conference "Environmental Safety of Tourist and Recreational Complex" Lviv, December 5-6, 2019.

13. Balanyuk V., Kravchenko A. & Harasymyuk O. Environmental benefits of sublayer aerosol quenching. Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference. March 26, 2021. Electronic edition of combined use - Lviv 2021. Pp. 25-27.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	18
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ПРОЦЕС ГОРІННЯ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН В СПИРТОСХОВИЩАХ .....	26
1.1. Актуальність проблеми .....	26
1.1.1. Конструктивні особливості резервуарів для зберігання горючих рідин.	28
1.1.2. Особливості горіння та гасіння полярних горючих рідин в резервуарах.	33
1.1.3. Проблеми гасіння спиртів та можливі шляхи їх вирішення .....	35
1.1.4. Гасіння пожеж у спиртосховищах повітряно-механічною піною. Аналіз та недоліки .....	43
1.1.5. Гасіння пожеж з використанням «спиртостійких» піноутворювачів ...	45
1.1.6. Гасіння пожеж з використанням піноутворювачів загального та спеціального призначення, які не містять спеціальних добавок.....	47
1.1.7. Гасіння пожеж у спиртосховищах іншими способами.....	50
1.2. Мета і завдання дослідження .....	52
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РЕЗЕРВУАРІВ З ПОЛЯРНИМИ ГОРЮЧИМИ РІДИНАМИ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ .....	54
2.1. Теоретичне обґрунтування умов ефективного подавання вогнегасної речовини об'ємної дії для гасіння полярної горючої речовини в резервуарі...	54
2.2. Особливості горіння спиртів.....	59
2.2.1. Процес гасіння резервуарів з полярними горючими рідинами вогнегасними аерозолями.....	59
2.2.2. Підвищення ефективності підшарового гасіння аерозолями методом вибору рецептур аерозольуючих сполук .....	65
2.3. Моделювання процесу проходження вогнегасного аерозолю через шар рідини .....	67
2.3.1. Параметри, що впливають на швидкість руху бульбашок аерозолю	

	16
через шар рідини .....	67
2.3.2. Взаємодія вогнегасного аерозолю зі спиртами .....	71
2.4. Теоретичне обґрунтування умов підшарового гасіння полярних горючих рідин в резервуарах.....	74
2.5. Математична модель впливу концентрації аерозолю та густини горючої рідини на час ліквідації горіння за умови підшарового гасіння.....	79
2.6. Висновки .....	84
<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН (СПИРТІВ) У РЕЗЕРВУАРАХ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ.....</b>	<b>86</b>
3.1. Методика визначення ефективності гасіння об'ємним способом вогнегасним аерозолем пожеж у резервуарах із спиртами.....	86
3.2. Експериментальне визначення ефективності об'ємного гасіння аерозолем полярних горючих рідин .....	89
3.3. Лабораторна методика визначення ефективності підшарового гасіння вогнегасними аерозолями .....	91
3.4. Експериментальне визначення ефективності підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем .....	93
3.5. Експериментальне визначення температурних характеристик процесу підшарового гасіння спиртів аерозолем .....	96
3.6. Експериментальне визначення інтенсивності теплового випромінювання під час підшарового гасінні пожеж в резервуарах з полярними горючими рідинами.....	103
3.7. Експериментальне визначення параметрів зміни інтенсивності випромінювання при горінні спиртів під час підшарового подавання вогнегасного аерозолю.....	107
3.8. Обґрунтування чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання у разі підшарового гасіння спиртів вогнегасними аерозолями та їх взаємозв'язок.....	110
3.8.1. Обговорення результатів досліджень інтенсивності теплового	



	17
випромінювання під час підшарового гасіння спиртів.....	111
3.9. Висновки .....	115
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ .....	117
4.1. Особливості проектування системи аерозольного підшарового гасіння.....	117
4.2. Розробка системи підшарової подачі аерозолю.....	118
4.3. Техніко-економічні дослідження ефективності установки підшарового аерозольного гасіння.....	123
4.4. Методика досліджень та експериментальна установка з визначення параметрів підшарового гасіння в полігонних умовах.....	126
4.5. Результати полігонних досліджень та їх обговорення.....	128
4.6. Рекомендації щодо застосування вогнегасного аерозолю для підшарового гасіння спиртів у резервуарах.....	134
4.7. Висновки .....	136
ВИСНОВКИ.....	138
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	141
ДОДАТКИ.....	154
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи .....	154
ДОДАТОК Б. Протокол випробувань експериментальної установки підшарового аерозольного гасіння на вогнегасну ефективність.....	158
ДОДАТОК В. Протокол визначення вогнегасної ефективності підшарового аерозольного гасіння на лабораторній установці.....	164
ДОДАТОК Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	170

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АУС – аерозольутворююча суміш

ГВР – газові вогнегасні речовини

МВК – мінімальна вогнегасна концентрація

ГВА – генератор вогнегасного аерозолю

ГДК – гранично допустима концентрація

ОРС – оперативно-рятувальна служба

ЛЗР – легкозаймиста рідина

ГР – горюча рідина

## ВСТУП

### **Актуальність теми**

Відомо, що на даний час особливо високою пожежною небезпекою характеризуються спиртосховища та технологічні процеси, в яких наявні спирти та їх суміші. Оскільки вони мають: низьку температуру кипіння, що забезпечує швидке випаровування та низьку температуру спалаху. На сьогодні для ліквідації пожеж та їх наслідків на таких об'єктах використовують піну низької та середньої кратності, що утворюється з піноутворювачів загального та спеціального призначення.

Актуальність роботи підкреслюється тим, що пожежі на об'єктах, де зберігають та переробляють спирти та їх суміші, характеризуються високою швидкістю поширення полум'я до - 10 м/с, та досягненням високих значень температур всередині об'єму на перших хвилинах пожежі, можливістю вибухів, як газопароповітряних сумішей, так і ємностей під тиском, які зазнають теплового впливу.

У роботі представлено аналіз та теоретичні узагальнення процесу гасіння спиртів і спиртовмісних рідин. Вказано недоліки гасіння спиртів і спиртовмісних рідин пінними засобами, інертними розріджувачами, а також запропоновано спосіб підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем.

На об'єктах з перебуванням людей необхідно враховувати граничні концентрації газової вогнегасної речовини, які можуть призвести до ускладнення дихання, втрати свідомості та можливої смерті.

Результатом аналізу процесу гасіння спирту та спиртовмісних рідин різними засобами пожежогасіння було теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено високу ефективність підшарового гасіння аерозолем на основі неорганічних солей калію. Перевагами такого способу гасіння є низька вартість системи пожежогасіння, значний період експлуатації, висока вогнегасна ефективність, простота обслуговування та використання.

Під час подавання вогнегасного аерозолю для підшарового гасіння спиртів виявлено значне зменшення тривалості гасіння порівняно з традиційними методами гасіння спирту та спиртовмісних рідин у резервуарах при незначних витратах вогнегасного аерозолю. На даний час в Україні не застосовуються аерозольні системи пожежогасіння для підшарового гасіння спиртів та спиртовмісних рідин у резервуарах.

Отже залишається актуальним питання щодо розробки рецептури аерозольотворюючих сполук та впровадження систем пожежогасіння для підшарового гасіння спиртів і спиртовмісних рідин у резервуарах.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконувалась відповідно до плану науково-дослідної роботи Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за напрямком: «Розроблення, дослідження, випробування та впровадження систем виявлення та гасіння пожеж, вогнегасних речовин, методів та пристроїв їх подачі» та згідно з розділом II «Основні завдання щодо розвитку наукового забезпечення діяльності університету» Концепції наукової діяльності Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, схваленої Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (Протокол № 7 від 20 травня 2020 р.).

### **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння спирту у резервуарах під час подавання вогнегасного аерозолю підшаровим способом.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- провести аналіз сучасного стану розроблення та застосування систем пожежогасіння (у тому числі підшаровим способом) у практиці та виявити напрями підвищення їхньої ефективності;
- теоретично обґрунтувати можливість підвищення ефективності систем аерозольного пожежогасіння шляхом підшарового подавання вогнегасного аерозолю в резервуарах;

- розробити методики проведення експериментальних досліджень з виявлення впливу чинників на ефективність процесів припинення горіння спиртів при його підшаровому подаванні;
- провести експериментальні дослідження з виявлення впливу параметрів та чинників на ефективність гасіння спиртів при підшаровому подаванні аерозолію;
- обґрунтувати вихідні дані системи підшарового аерозольного пожежогасіння для протипожежного захисту резервуарів зі спиртами;
- обґрунтувати схему конструкції системи підшарового аерозольного пожежогасіння, розробити дослідний зразок такої системи, провести апробацію в полігонних умовах, а також розробити рекомендації щодо їх застосування для протипожежного захисту об'єктів з можливістю виникнення горіння спиртів в резервуарах.

**Об'єкт досліджень.** Процеси припинення горіння в резервуарах для зберігання спиртів у разі застосування систем аерозольного підшарового пожежогасіння.

**Предмет досліджень.** Вплив чинників на ефективність процесів припинення горіння у резервуарах з можливістю виникнення горіння спиртів у разі застосування систем підшарового аерозольного пожежогасіння.

**Методи дослідження.** У роботі було використано комплексний метод дослідження, який включає аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень за напрямками: гасіння пожеж спиртів, метод камери, методи планування експерименту, методи математичної статистики, метод експериментального дослідження теплового режиму при гасінні спирту.

Для проведення експериментальних досліджень використовували метрологічно каліброване обладнання та повірені засоби вимірювання. Результати теоретичних досліджень порівнювали із результатами експериментів, які проводились в лабораторії та в полігонних умовах.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у розкритті особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в резервуарах зі спиртами під час підшарового подавання аерозолі.

При цьому:

– вперше виявлено можливість ефективного застосування вогнегасного аерозолі для підшарового гасіння спиртів, що забезпечує значне зменшення часу гасіння, при незначних витратах вогнегасного аерозолі. Встановлено, що нормативна інтенсивність подавання вогнегасного аерозолі для підшарового гасіння знаходиться в межах 7 - 30 г/(м<sup>2</sup>·с). Виявлено синергізм чинників у разі підшарового подавання вогнегасного аерозолі, що полягає в одночасному зменшенні температури поверхні, стінок резервуара та значного зменшення інтенсивності теплового потоку, що діє на поверхню спирту, що, відповідно, забезпечує значне зменшення часу гасіння (до 60 с);

– вперше встановлена залежність ефективності гасіння спиртів підшаровим способом від розмірів бульбашок вогнегасного аерозолі, який подається на гасіння. Встановлено, що бульбашки з розміром до 5 мм в діаметрі забезпечують більш рівномірний вихід аерозолі на поверхню, перемішування спирту та охолодження бортів ємності зі спиртом. При цьому на поверхні спирту утворюється гетерогенний шар, який складається зі спирту та бульбашок аерозолі, що забезпечує флегматизування зони парів та газів дифузійного полум'я;

– вперше встановлені температурні характеристики процесу підшарового гасіння спиртів та виявлено, що підшарове подавання вогнегасного аерозолі забезпечує значне зменшення інтенсивності теплового потоку від зони горіння до поверхні палаючого спирту;

– набуло подальшого розвитку застосування систем аерозольного підшарового пожежогасіння шляхом застосування генератора вогнегасного аерозолі (ГВА) в резервуарах зі спиртом, з можливістю виникнення в них горіння.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні системи підшарового аерозольного пожежогасіння та її застосуванні для протипожежного захисту резервуарів зі спиртом з можливістю виникнення в них горіння.

Розроблено відповідну технічну документацію, виготовлено дослідно-промисловий зразок системи підшарового аерозольного пожежогасіння, яка встановлена в резервуарі для зберігання спирту етилового ректифікованого на ТЗОВ «Гуральня Бруницьких», Львівська обл., Городоцький р-н, селище міського типу Великий Любінь (Додаток А. – Акт впровадження результатів дисертаційної роботи).

Результати досліджень також впроваджено у науково-дослідній лабораторії пожежної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності для науково-дослідної роботи студентів ад'юнктів та дослідників.

**Особистий внесок здобувача** полягає в самостійному аналізі літературних джерел, формулюванні мети і завдань досліджень, обґрунтуванні методології та виборі методик, у плануванні і безпосередньому проведенні лабораторних та полігонних випробувань з узагальненням одержаних результатів. Особистий внесок у наукових працях, опублікованих за співавторства, відображено в дисертації, зокрема:

- теоретично обґрунтовано ефективність теплового екранування поверхні спирту вогнегасним аерозолем та проведено експериментальне дослідження з визначення інтенсивності теплового випромінювання;

- визначено проблему дослідження, проаналізовано відомі методи і способи гасіння спирту. Описано методику визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння;

- описано методику підшарового гасіння спиртів та експериментальної установки. Проведено експериментальні дослідження та визначено масу заряду АУС, достатню для підшарового гасіння спиртів в умовах лабораторної установки;

- визначено актуальність роботи. Встановлено проблеми гасіння спиртів та описано чинники, які визначають вогнегасну ефективність аерозолію під час гасіння спиртів підшаровим способом;
- проведено аналіз останніх досліджень та публікацій за проблематикою. Взято участь у проведенні дослідів та у формуванні висновків;
- взято участь у встановленні задач дослідження та описі чинників, які впливають на вогнегасну ефективність аерозолію на різних стадіях його виходу з шару спирту;
- сформовано мету досліджень, описано взаємозв'язок чинників при підшаровому аерозольному гасінні спиртів у резервуарах.

Співавтори вказаних робіт за даними дослідженнями дисертації не захищали, а на спільно виконані роботи є посилання на джерело та відзначено особистий внесок. Всі основні результати дисертаційного дослідження отримані автором самостійно. Керівник роботи і здобувач спільно сформулювали задачі та загальні висновки дисертаційного дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 6 міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях, зокрема: Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of II International Scientific and Practical Conference Kyoto, Japan. 4-6 November. 2020.; The 9th International conference —Science and society (February 1, 2018) Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada. 2019.; Матеріали ІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції за міжнародною участю. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019.; Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: – Електронне видання комбінованого використання. – Київ: ІДУЦЗ, 2019.

**Публікації.** Основні результати досліджень опубліковані у 13 наукових працях, із них 5 – у фахових наукових виданнях, 1 – в інших наукових



виданнях та 1 – входить в наукометричну базу даних Scopus, 6 – у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, розділів, висновків, списку використаних джерел із 110 найменувань, 4 додатків. Загальний об'єм дисертації складає 172 с. та включає 35 рис., 15 табл.

## РОЗДІЛ 1

# ПРОЦЕС ГОРІННЯ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН В СПИРТОСХОВИЩАХ

### 1.1. Актуальність проблеми

Полярні горючі рідини, зокрема етанол, останнім часом набувають все більшого поширення за рахунок значного розширення спектру їх застосування в хімічній, легкій, харчовій промисловостях, а як добавок до бензину. Незважаючи на тривалу історію застосування, процеси його отримання, зберігання, переробки і транспортування залишаються вибухопожежонебезпечними. Вибухи та пожежі за участю спиртів продовжують траплятись, хоча використовуються засоби гасіння та флегматизування. Аналіз пожеж із спиртами показав, що вони мають тенденцію до збільшення як кількості, так і масштабів. Так, 24 червня 2018 року сталась пожежа на території Збаражського спиртзаводу в Тернопільській області, де вибухнули з продовженням горіння ємності з біоетанолом, при цьому було евакуйовано 350 місцевих жителів [1].

А 20 червня 2015 року в Березовському районі Брестської області (Білорусь) у результаті потрапляння блискавки у склад із спиртом згоріло 110 тонн спирту [2]. В США в м. Балтімор [3] 14 травня 2007 року на мосту зазнав аварії танкер який перевозив етанол, в результаті чого стався вилів та займання. До ліквідації аварії було залучено 4 пожежні автомобілі, які подавали піну, але гасіння ускладнювалось тим що, спирт витікав з цистерни і піна неефективно покривала його поверхню у вертикальному положенні. Слід згадати про пожежу, яка трапилась у лютому 2020 року в м. Одеса [4] За даними відомства ДСНС повідомлення про займання складського приміщення на Балтській дорозі 15 надійшло до служби порятунку 101 о 00:24 17 лютого. О 2:12 пожежу було локалізовано і о 3:11 ліквідовано на площі 250 кв. м. До гасіння залучалися 12 одиниць пожежної техніки та 45

людей особового складу ДСНС. Складність гасіння пожежі полягала в наявності ємкостей з етанолом, які розміщувалися в будівлі складу.

Як правило, пожежі спиртів починаються з вибуху, який руйнує резервуар, після чого стається пожежа. У таблиці 1.1 наведено інформацію про найбільші пожежі, які трапились за останні 20 років в світі, та, відповідно, кількість піноутворювача, яка була використана для їх гасіння.

Таблиця 1.1

## Загальна витрата піноутворювача на гасіння спирту на пожежах [5]

№ з/п	Рік	Місце пожежі	Кількість та вид горючої рідини, л	Загальна кількість піноутворювача, л	Витрата піноутворювача, л/м <sup>2</sup>
1	1996	Amoco (США)	Etanol (МВТЕ) 87000	2800000	65,5
2	1998	Nedalko (Нідерланди)	Etanol (відс дані)	11000	-
3	2000	Villette-sur-Aube (Франція)	Etanol (відс дані)	50000	62.5
4	2001	Liller (bund + tank) (США)	Etanol (відс дані)	23000	-
5	2004	Port Kembla (Австралія)	Etanol (відс дані)	36000	-

Як видно з таблиці 1.1 при гасінні спирту витрата піноутворювача є набагато більшою ніж при гасінні нафтопродукту. Середня витрата розчину піноутворювача згідно з довідником керівника гасіння пожежі [6] при подаванні піни через ГПС-600 становить 21,6 л/с. Подеколи необхідна для

гасіння кількість піноутворювача становить більше, ніж кількість початкового об'єму спирту, який горить. У вищевказаних випадках середня витрата розчину піноутворювача на одиницю площі при гасінні становила близько 62 л/м<sup>2</sup>.

Таким чином, відповідно до проведеного аналізу видно, що існує проблема ефективного і чистого гасіння спиртів та їх сумішей і вона потребує подальшого дослідження та вирішення.

### **1.1.1. Конструктивні особливості резервуарів для зберігання горючих рідин**

За останнє десятиліття значно зріс обсяг резервуарного парку зі зберігання горючих рідин (спиртів та водно-спиртових розчинів), які містять етиловий спирт у концентраціях понад 20 % (об) (надалі - спиртовмісні рідини). Під час проектування, будівництва та експлуатації підприємств, на яких використовуються спирти та спиртовмісні рідини, керуються вимогами будівельних норм, затверджених в установленому порядку, а також нормативних актів з пожежної безпеки [7] та інших нормативно-технічних і нормативно-правових документів.

Склади для зберігання спирту залежно від місткості поділяються на дві групи [8]:

- перша група — базисні склади для зберігання і постачання спирту споживачам, а також спиртосховища окремих підприємств місткістю величин, більших ніж вказані у табл. 1.2 для другої групи складів;
- друга група — видаткові склади спирту, які входять до складу підприємства, місткість яких відповідає табл. 1.2.

Таблиця 1.2

## Поділ складів (спиртосховищ) на групи

№ з/п	Група складів	Найменування спиртосховищ	Місткість складів, м <sup>3</sup>	
			Складські будівлі	Наземні резервуари
1	Перша	Базисні склади	до 2000	до 6000
2	Друга	Видаткові склади	до 1000	до 2000

Спирти зберігаються в сталевих резервуарах різної місткості та форми з обов'язковою умовою можливості виміру в них наявності спирту по об'єму. Резервуари встановлюються як на відкритих майданчиках, так і в закритих приміщеннях, що відповідають вимогам до приміщень категорії А (для спиртосховищ закритого типу) і А<sub>3</sub> (для спиртосховищ відкритого типу) вказаних у ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою».

Відкриті спиртосховища для зберігання спирту у резервуарах, складські будівлі для зберігання спирту у вертикальних і горизонтальних резервуарах і бочках допускається будувати заглибленими [7].

Відомо що, етиловий спирт належить до полярних легкозаймистих рідин, що має нижчу, порівняно з водою, температуру кипіння і розчиняється у ній необмежено [8]. Етиловий спирт і більшість спиртовмісних рідин горять прозорим полум'ям, яке іноді важко помітити в умовах високої освітленості, внаслідок слабого випромінювання світла, без утворення диму і сажі [8]. Лінійна швидкість вигорання спирту не перевищує 2,5 мм/хв, його тривале горіння не супроводжується утворенням прогрітого шару біля поверхні, а призводить до прогрівання усього об'єму рідини [9].

Виникнення пожежі у резервуарі або усередині приміщення спиртосховища закритого типу можливе у разі потрапляння концентрації парів етилового спирту в область займання, де  $\varphi_n = 3 \%$ , а  $\varphi_v = 19 \%$ , та наявності джерела запалювання, яке становить для етанолу 3,6-17,7 % [10]. Займання та вибухи можуть виникати у результаті появи іскор (користування інструментом, який дає іскри під час ударів, несправність електрообладнання, тощо), внесення джерела полум'я у вибухопожежонебезпечний простір, проявів статичної або атмосферної електрики, підпалу і т. ін. Причому мінімальна енергія запалювання ( $E_{min}$ ) для етанолу становить 0,246 мДж, що менше за енергію електричного розряду [10]. Ймовірність появи та величина вибухонебезпечних концентрацій парів етилового спирту усередині резервуарів або приміщень спиртосховищ закритого типу, де спирти та спиртовмісні рідини зберігаються у дрібній тарі, залежить від фізико-хімічних властивостей рідини, конструкції резервуара або виду тари, технологічних режимів експлуатації резервуара або спиртосховища, справності дихальних пристроїв та/або системи вентиляції, кліматичних і метеорологічних умов та інших чинників пожежної небезпеки об'єкта [7]. Утворенню та накопиченню парів сприяють: висока температура спиртовмісної рідини, повітря, а також низька інтенсивність повітрообміну [11]. Ймовірність виникнення пожежі підвищується у разі переливання продукту через борт резервуара, порушення герметичності корпусу, його елементів (засувки, фланцевих з'єднань, технологічних трубопроводів і ін.) або дрібної тари для зберігання спиртовмісних рідин. Пожежа у резервуарі для зберігання спиртовмісної рідини звичайно починається з вибуху пароповітряної суміші, який може призвести до підриву і навіть зриву покрівлі з наступним горінням частини або усієї поверхні рідини [8]. Можливе також виникнення факельного горіння спиртовмісної рідини на дихальній арматурі резервуара, у місцях з'єднання пінокамер зі стінками резервуара та в інших отворах і тріщинах у покрівлі або стінках резервуара. Подальший розвиток пожежі у резервуарі залежить від місця її виникнення,

розмірів початкового осередку горіння, кліматичних і метеорологічних умов, оперативності та правильності дій персоналу об'єкта, виду і справності систем охолодження і протипожежного захисту резервуара, проміжку часу до прибуття підрозділів ДСНС і початку виконання ними дій з охолодження резервуара та гасіння пожежі, а також інших чинників [8]. Можливий розвиток пожежі тільки в одному резервуарі, або її перекидання на сусідні резервуари та інші об'єкти (особливо у разі порушення цілісності або руйнування резервуара і виходу палаючої рідини в обвалування та за його межі). Під час пожежі в резервуарі можливе утворення «кишень» (зон незалежним від основної маси рідини тепломасообміном), наявність яких значно ускладнює процес гасіння [8]. Вони можуть мати різну форму, площу і утворюються як на стадії виникнення пожежі внаслідок часткового руйнування стаціонарної покрівлі, так і в процесі її розвитку через деформацію стінок резервуара. Утворенню «кишень» сприяє відсутність або недостатня ефективність охолодження резервуара під час горіння рідини у ньому або в обвалуванні. Гасінню пожеж у резервуарах, які розташовані усередині приміщень спиртосховищ закритого типу, може завадити насамперед складність подавання вогнегасних речовин на поверхню горючої рідини, оскільки відстань від покрівлі резервуара до перекриття зазвичай достатньо мала. Пожежі у спиртосховищах, де горючі рідини зберігаються у дрібній тарі, звичайно починаються з вибухів у цих ємностях. Вибухи можуть супроводжуватися розриванням посудин і розлиттям продукту на достатньо великі площі, тобто збільшення площі зони горіння. Так, наприклад, у місті Збараж Тернопільської області на спиртовій базі Зарубинецького спиртзаводу стався вибух та пожежа. Зазначається, що існувала загроза перекидання полум'я на сусідні будівлі та житловий сектор, що знаходився поруч. Рятувальники евакуювали 350 місцевих мешканців з прилеглих житлових будинків. Пожежа виникла в будівлі виробничого корпусу. У будівлі знаходилось 10 резервуарів, в яких зберігалось 480 тонн біоетанолу. Площа пожежі становила 1200 м<sup>2</sup>. Всього для ліквідації пожежі

залучили 15 одиниць техніки, 63 рятувальники та пожежний поїзд. Було організовано підвіз води за допомогою сільськогосподарської техніки [1]. Також 16 листопада 2001 р. пролунав вибух у бродильному цеху спиртзаводу АО «Амурский кристалл» (Благовещенск, Амурская область, Російська Федерація). У результаті пожежі три людини загинуло, спиртзавод повністю зруйновано. За попередньою версією вибух стався через несправність обладнання, яке багато років не замінювалось. Крім того збитки для області лише від несплати податків підприємством становили одну шосту бюджету [12].

Таким чином, для актуального обґрунтування необхідності застосування вогнегасного аерозолію для гасіння спирту необхідно визначити чинники пожежовибухонебезпеки парів спирту у резервуарах.

Рідини мають властивості текучості та не мають певної визначеної форми, тому на виробництві вони зберігаються у замкнених об'ємах: резервуарах, апаратах, трубопроводах тощо.

Резервуари та ємності з ЛЗР та ГР звичайно не бувають заповнені повністю, тобто мають вільний від рідини простір, який поступово насичується парами рідини при її випаровуванні (рис. 1.1). За наявності в цьому просторі повітря (або іншого окислювача) пари рідини змішуються з ним і утворюють вибухонебезпечні суміші [13]. Практичні спостереження показали, що в результаті дифузії та конвекційних потоків концентрація пари індивідуальних рідин у повітряному просторі апаратів майже не змінюється за висотою. Пари неоднорідних рідин з низькою температурою кипіння над розчинами також мають однакові концентрації в різних точках пароповітряного простору закритих ємностей [13]. Це забезпечує високу швидкість поширення полум'я по об'єму горючої суміші.



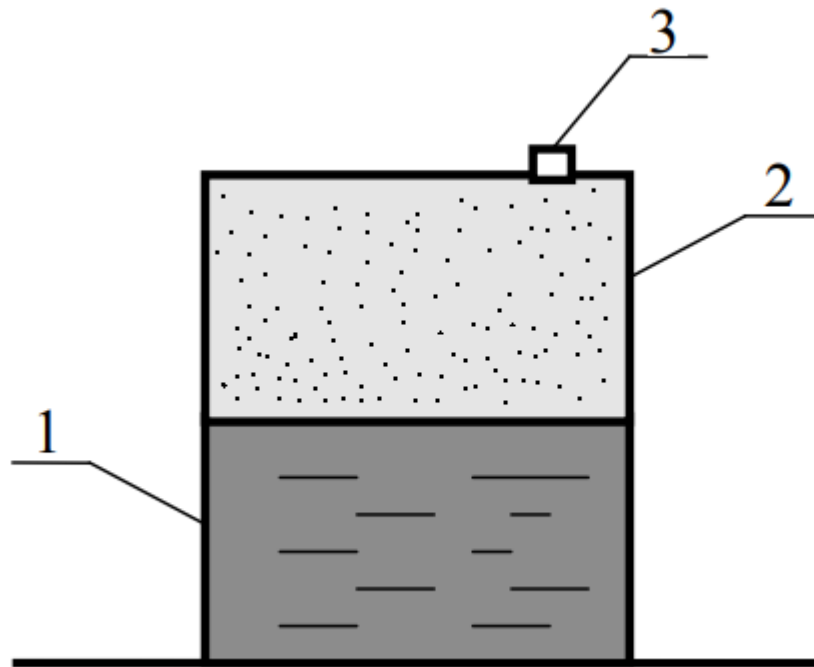


Рисунок 1.1 – Апарат (резервуар) із пароповітряним простором  
1 – рідина; 2 – пароповітряний простір; 3 – дихальна лінія.

### 1.1.2. Особливості горіння та гасіння полярних горючих рідин в резервуарах

Відповідно до значень вогнегасних та флегматизувальних концентрацій газових вогнегасних речовин подавання необхідної кількості газу в об'єм, що захищається, подеколи є проблемною, оскільки кількість ємностей, які необхідні для цього, в деяких випадках є дуже великою, що вимагає окремих приміщень та значної довжини трубопровідної арматури [14].

На об'єктах, з перебуванням людей, необхідно враховувати граничні концентрації вогнегасного газу, які можуть призвести до ускладнення дихання. Ця концентрація становить мінімально 14 % кисню [15]. Подальше зниження концентрації  $O_2$  призведе до втрати свідомості та можливої смерті. З метою досягнення вогнегасної концентрації для етанолу необхідно досягнути концентрації діоксиду вуглецю близько 25-30 %, а флегматизувальної концентрації 35-45 %, що значно вище за допустимі значення. Значення вогнегасних та флегматизувальних концентрацій для

азоту є ще вищими та відповідають концентраціям в 40 % для вогнегасної та 50-55 % для флегматизувальної [16].

Таким чином, вказані значення концентрацій є досить високими для гасіння та флегматизування і потребують значного заповнення по об'єму. При цьому гасіння та флегматизація забезпечується лише за рахунок тепловідведення газами флегматизаторами [16].

Беручи до уваги вищесказане та фізико-хімічні властивості етанолу, метанолу та інших спиртів (табл. 1.3), які під час горіння мають ряд особливостей, ускладнює їх гасіння та флегматизування їх пароповітряних сумішей. До зазначених проблем належать: висока температура горіння яка, подеколи, унеможливорює потрапляння засобу пожежогасіння всередину полум'я, висока швидкість поширення полум'я (на рівні дефлаграційного горіння), можливість руйнування піни та плівкоутворювальних засобів та ін.

У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що вогнегасна речовина має характеризуватися декількома чинниками, що забезпечують припинення горіння, інгібування, флегматизування, охолодження, так і теплову ізоляцію поверхні від дії тепла із зон горіння.

Таблиця 1.3

Фізико-хімічні властивості та характеристики пожежонебезпечності полярних рідин [10]

№ з/п	Назва	Молярна маса	Температура спалаху, °С	Концентраційні межі поширення полум'я фн; фв, %	Еакт, мДЖ	Примітка
1.	Метанол	32,04	6	6,98-35,5	0,14	
2.	Етанол	46,07	16	3,6-17,7	0,246	
3.	Пропанол	60,09	29	2,3-13,6	0,25	
4.	Бутанол	74,12	41	1,8-10,9	0,276	

### 1.1.3. Проблеми гасіння спиртів та можливі шляхи їх вирішення

В результаті дії високої температури від пожежі, яка вже виникла на об'єкті, можливе порушення герметичності апаратів технологічного процесу виробництва чи інших ємностей (резервуарів), що в свою чергу може призвести до утворення вибухонебезпечного середовища, яке за наявності джерела запалювання (відкритого полум'я) призведе до вибуху.

Гасіння об'ємним способом являється одним з найбільш ефективних способів протипожежного захисту, так як пристрої з можливістю швидкого гасіння об'єму забезпечують запобігання вибухів в апаратах і приміщеннях при створенні вибухонебезпечних концентрацій речовин. Припинення горіння, шляхом введення в зону реакції негорючих газоаерозолів і попередження створення вибухонебезпечної концентрації компонентів можна віднести до методу розбавлення чи флегматизації пароповітряних сумішей, що утворюються на поверхні рідин. Етанол як найбільш поширений представник гомологічного ряду спиртів володіє такими характеристиками: температура горіння становить близько  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура займання становить нижче  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що вказує на особливу пожежну небезпечність таких рідин, температура спалаху (в закритому тиглі) для етанолу становить  $+13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для бензинів з вмістом спирту від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  – E85 (зимовий та літній варіанти) та E95 (бензин з вмістом етанолу від 5 до 30 %) – близько  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Дослідження, які проводились авторами роботи [5] показали, що інтенсивність потоку теплової радіації від вогнища для етанолу порівняно з бензином є меншим ніж від етанолу, але температура горіння етанолу є вищою за температуру горіння бензину (рис. 1.2). Це забезпечує достатньо потужний тепловий потік від поверхні дифузійного полум'я спирту.

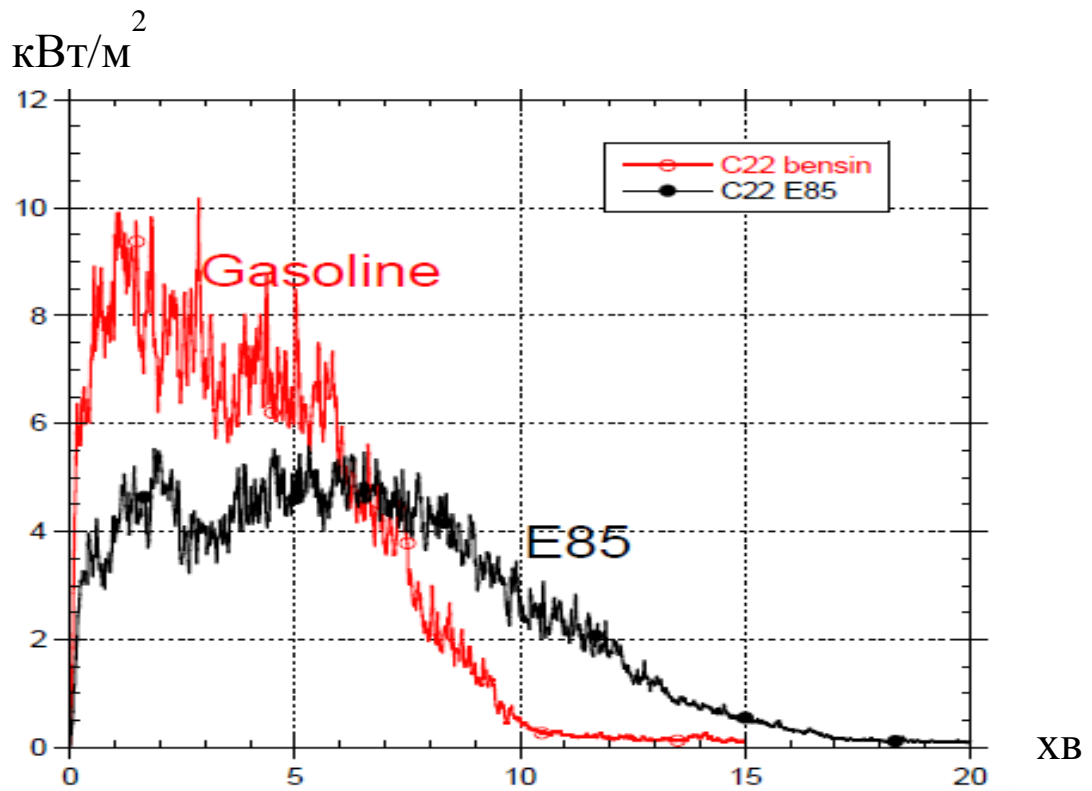


Рисунок 1.2 – Інтенсивність теплового випромінювання від вогнищ бензину (Gasoline) та суміші бензину з етанолом E85  $\text{kW/m}^2$  на відстані 3м [5].

Також при горінні спирту та його сумішей на відстані 3 м виділяється значно менша кількість продуктів згоряння у вигляді сажі та інших аерозольних і газоподібних продуктів, за рахунок яких власне і здійснюється теплове випромінювання [5] (рис.1.3). Як видно з результатів досліджень автора [5], показаних на рисунку 1.3, при горінні бензину з добавкою спирту утворюється значно менше кіптяви, аніж у випадку з горінням бензину. При цьому висота факелу є дещо вищою у бензину, але при цьому температура горіння бензино-спиртової суміші марки E85 є значно вищою за температуру горіння бензину [5].

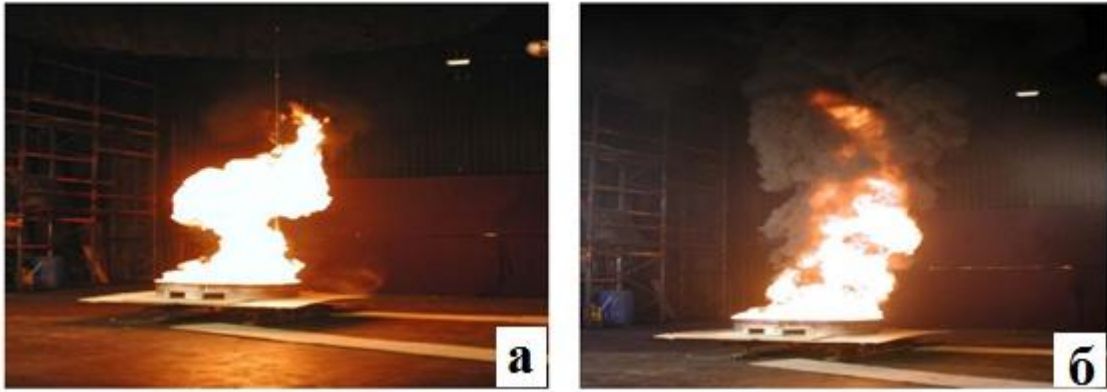


Рисунок 1.3 – Горіння спиртових сумішей в деко.

Результати роботи авторів [5].

а – горіння бензино-спиртової суміші марки E85; б – горіння бензину.

До того ж особливістю будови молекули спирту є те, що вона містить гідроксильну групу  $\text{OH}$ , яка забезпечує високу розчинність у воді чим, власне, і забезпечується ефект руйнування піни при її контакті зі спиртом або спиртовмісними рідинами. Таким чином, враховуючи, що спирти є водорозчинні, це створює проблему при гасінні пінами, більшість з яких їх ефективно розчиняє. Існує ряд піноутворювачів AR-AFFF, що підтримують стійку піну на поверхні полярних розчинників. Але, незважаючи на цю особливість зазначеного піноутворювача, при гасінні етанолу, його сумішей та полярних рідин можуть виникати проблеми через те, що більшість пожеж таких рідин є трьохвимірними і горіння може відбуватись на вертикальних або горизонтальних нахилених нерівномірних поверхнях, звідки піна буде стікати. Такі ситуації можуть виникати при розгерметизуванні трубопроводів, реакторів на бокових стінках і т.д. Інший фактор, який ускладнює гасіння, є висока температура при горінні етанолу [19, 20]. У випадку значної площі горіння піна повинна утворювати ідеальне покриття, яке потрібно підтримувати необхідною інтенсивністю подачі піни, частина якої буде руйнуватись в результаті дії теплового випромінювання. Піна при цьому руйнується в результаті випаровування води, з якої буде утворюватись нагріта пара та відносити наступні порції піни від місця горіння. Таким

чином, якщо припинити подавати піну, горіння може відновитись. Відповідно до аналізу статистичних даних можна сказати, що повне гасіння спирту можливе лише внаслідок пінної атаки, коли інтенсивність подачі піни є більшою за інтенсивність її руйнування. У результаті гасіння спирту піною буде створюватись значна кількість нагрітої пари, яка може утворювати вибухонебезпечні суміші над поверхнею піни. Піна не може ефективно гасити витоки спирту з трубопроводів та ємностей під тиском, коли відбувається факельне горіння, проте це ефективно робить аерозоль.

Таким чином можна зробити висновок, що на даний час не існує універсальних засобів гасіння спиртів і полярних рідин, а існуючі способи є дороговартісними та призводять до забруднення спирту в результаті гасіння. Альтернативним способом гасіння спиртів є застосування об'ємних засобів пожежогасіння, які заповнюють весь об'єм, і таким чином забезпечують вищу ефективність гасіння спирту, включаючи флегматизування утворених пароповітряних сумішей. Загалом, якщо брати до уваги необхідні концентрації засобів пожежогасіння об'ємним способом для спиртів, то можна навести наступні значення концентрацій. Вогнегасні концентрації для  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  та вогнегасних аерозолів наведено в таблиці 1.4. Як видно з таблиці вогнегасні концентрації, речовин об'ємної дії зазначені в роботах [19-22], є незначними для спиртів і після гасіння спирту об'ємним способом спирт не зазнає втрати якості та після незначної очистки може бути й надалі використаний, адже після експерименту спирт був візуально прозорим та чистим.

Вогнегасні та флегматизувальні концентрації вогнегасних речовин  
об'ємної дії [19-21]

№ з/п	Горюча рідина	Вогнегасна речовина	Вогнегасна концентрація, (% – для газів, г/м <sup>3</sup> – для аерозолю)	Флегматизувальна концентрація, (% – для газів, г/м <sup>3</sup> – для аерозолю)
1.	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	CO <sub>2</sub>	23	33
2.	CH <sub>3</sub> OH	N <sub>2</sub>	38,6	46,2
3.	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	N <sub>2</sub>	36,8	44,2
4.	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Аерозоль «Багр»	7	22
5.	CH <sub>3</sub> OH	CO <sub>2</sub>	28,5	39,2
6.	E-95	Аерозоль «Багр»	15	22

На відміну від газових вогнегасних речовин (Табл. 1.4) вогнегасні аерозолі володіють більшою зручністю в експлуатації порівняно з газовим, пінним та водяним пожежогасінням. Що стосується флегматизувальних концентрацій, то як видно з таблиці 1.4, всі зазначені речовини володіють різними значеннями флегматизувальної концентрації. Найнижчі показники флегматизувальної концентрації є для вогнегасних аерозолів, які за рахунок розвинутої поверхні ефективно переривають ланцюгові реакції та чинять вибухоподавляючу дію.

Порівнюючи вогнегасні концентрації піноутворювача та об'ємних вогнегасних речовин, останні є кращими через їх значно менші вогнегасні концентрації та можливість гасити горіння спиртів в будь-якому положенні та в об'ємі.

Таким чином, гасіння об'ємним способом спиртів, а зокрема аерозолями, представляє інтерес з позиції ефективності, вартості, швидкості

та можливості вибухоподавлення спиртоповітряних сумішей, і як результат – створення нових ефективних газоаерозольних сумішей.

Відомо, що гасіння спиртовмісних рідин може досягатися за рахунок фізичного, хімічного, а також комбінованого впливу на вогнище пожежі [8], зокрема:

- розбавлення горючої рідини водою, або водним розчином піноутворювача до концентрацій, за яких вона перетворюється на негорючу;
- перетворення газового горючого середовища, яке містить пари етилового спирту, на негорюче шляхом подавання водяної пари або газової вогнегасної речовини;
- інгібування реакцій горіння шляхом подавання порошкових або вогнегасних аерозолів, тонкорозпилених водних вогнегасних речовин, до складу яких входять неорганічні солі-інгібітори горіння тощо;
- охолодження рідини до температури, нижчої за температуру спалаху.

У разі горіння невеликих кількостей спиртовмісних рідин (у тому числі їх розливів) достатньо ефективними можуть бути первинні засоби пожежогасіння, зокрема: пісок, пожежна кошма, порошкові, водопінні, водяні та газові вогнегасники, а також вода, яку бажано подавати у вигляді розпилених струменів. Ефективним може бути подавання вогнегасних речовин ручним вогнегасником. При цьому необхідно уникати розбризкування горючої рідини, оскільки це може призвести до збільшення площі горіння або займання інших предметів. Вогнегасні порошки, що подаються з вогнегасників, модулів пожежогасіння, стаціонарних систем пожежогасіння або пересувної протипожежної техніки, забезпечують ефективне інгібування ланцюгових реакцій окислення і швидко припиняють горіння. Однак, вони практично не мають охолоджувальної дії. У разі їх застосування, особливо в умовах тривалого вільного розвитку пожежі, ймовірно повторне займання горючої рідини внаслідок дії розжарених конструкцій. Те саме стосується вогнегасних аерозолів, успішне застосування яких, до того ж, потребує забезпечення герметичності



приміщення, що захищається. Подавання тонкодисперсної води стаціонарними системами пожежогасіння забезпечує як охолодження поверхні горючої рідини, повітря, конструкційних елементів та інших предметів так і розбавлення цієї рідини. Подавання тонкодисперсних водних вогнегасних речовин, до складу яких входять неорганічні солі – інгібітори горіння, може прискорити гасіння полум'я і забезпечити збільшення стійкості твердих конструкційних матеріалів природного походження (насамперед – деревини) до повторного займання. Разом з тим, успішне застосування тонкорозпилених водних вогнегасних речовин можливе тільки для гасіння поверхневих пожеж. Використання водяної пари, що подається з парових котлів (парогенераторів), а також газових вогнегасних речовин, що подаються зі стаціонарних систем пожежогасіння, забезпечує достатню ефективність гасіння пожежі тільки у тому разі, якщо приміщення закритого спиртосховища або інший простір, у якому відбувається горіння спирту, має достатньо високий ступінь герметичності, щоб забезпечити підтримання мінімальної вогнегасної концентрації водяної пари або газової вогнегасної речовини. Розведення горючих спиртовмісних рідин водою або водним розчином піноутворювача з метою їх перетворення на негорючі може бути пов'язано з такими труднощами, як неможливість доставки належної кількості рідини в осередок горіння, переповнення резервуара чи іншої посудини, у якій горить рідина та/або її розлиття зі збільшенням площі зони горіння. Також внаслідок суттєвої різниці між густиною води та етилового спирту, подавання води супроводжується збагаченням нею переважно нижнього шару горючої рідини, яка міститься у резервуарі або іншій посудині. Щоб забезпечити більш рівномірний розподіл концентрації спирту в об'ємі рідини, воду або водний розчин піноутворювача слід подавати у дисперсному вигляді та/або вживати заходів щодо перемішування цієї рідини. Збільшення рівномірності розподілу концентрації спирту досягається також при подаванні на поверхню рідини повітряно-механічної піни замість води. Спонтанне загасання етилового спирту, внаслідок розведення водою

або водним розчином піноутворювача, звичайно відбувається після зниження його концентрації у поверхневому шарі близько 20% (об), що відповідає збільшенню температури спалаху приблизно до 40°C [14]. Якщо спиртовмісна рідина, розведена водою до вказаної концентрації, має вищу температуру, то її горіння триватиме, у цьому разі необхідно вжити заходів щодо її подальшого гасіння. Охолодження горючої рідини, конструкційних елементів резервуара, будівельних конструкцій та інших предметів до температур, нижчих за температуру спалаху горючої рідини, можливе у разі подавання рідкого азоту, твердого діоксиду вуглецю або інших речовин, які поглинають значну кількість теплоти під час випаровування, тобто забезпечують різке охолодження внаслідок перебігу названого процесу [6]. Апаратурна реалізація цього способу полягає у подаванні цих речовин стаціонарними або транспортованими системами пожежогасіння безпосередньо у нижню частину шару горючої рідини, яка зберігається у резервуарі (гасіння газовою вогнегасною речовиною «підшаровим» способом). У цьому разі, має місце як охолодження горючої рідини, так і розведення газового горючого середовища газовою вогнегасною речовиною. Загалом, повітряно-механічна піна, генерована з робочих розчинів піноутворювачів, є найбільш універсальним засобом гасіння горючих рідин, застосування якої дає змогу ліквідувати горіння великого «дзеркала» рідини. Разом з тим, гасіння спиртовмісних рідин, а також більшості інших полярних водорозчинних і водонерозчинних горючих рідин пов'язане зі складністю створення на їх поверхні шару піни достатньої товщини. На відміну від нафти, нафтопродуктів та інших неполярних горючих рідин, етиловий спирт, маючи необмежену розчинність у воді, легко змішується з водним розчином піноутворювача, який міститься у пінних плівках [8]. Молекули етилового спирту спричиняють десорбцію молекул поверхнево-активних речовин (основних компонентів піноутворювачів), швидко руйнуючи піну [8]. У зв'язку з цим пінне гасіння спиртовмісних рідин можливе у разі використання піноутворювачів спеціального призначення, які містять спеціальні добавки,

або у разі використання піноутворювачів загального чи спеціального призначення, які їх не містять, після розведення спиртовмісної рідини до концентрації, за якої можливе її гасіння [8]. З позиції підшарового аерозольного гасіння не потрібно забезпечувати стійкість аерозолі, адже він безперешкодно проникає через шар горючої рідини та забезпечує її ефективне гасіння в зоні горіння, а особливо горіння біля бортів резервуара. Відомо, що кільце запалювання підтримує зону горіння і його відрив призведе до відриву полум'я та його гасіння.

#### **1.1.4. Гасіння пожеж у спиртосховищах повітряно-механічною піною. Аналіз та недоліки**

Основним засобом гасіння пожеж спиртів у резервуарах є повітряно-механічна піна низької або середньої кратності. Гасіння пожеж піною відбувається внаслідок ізолювання поверхні пального від окислювача, зниження швидкості випаровування горючої рідини завдяки її охолодженню, ізолюванню та розведенню водою і частково за рахунок розведення газового горючого середовища водяною парою. Внесок кожного з цих чинників у процес гасіння залежить від властивостей рідини, що горить, типу піноутворювача, а також виду, способу та інтенсивності подавання піни [23].

Подавання піни в осередок горіння супроводжується її руйнуванням внаслідок дії факела полум'я і горючої рідини. Шар піни, яка накопичується на поверхні, екранує її від теплового потоку полум'я, зменшує кількість парів, що надходять у зону горіння, і знижує його інтенсивність [24]. Водний розчин піноутворювача, який виділяється з піни (відсік), охолоджує і розбавляє горючу рідину. Крім того, у процесі гасіння рідини відбувається конвекційний тепломасообмін, завдяки чому температура вирівнюється в усьому об'ємі (за винятком «кишень»).

Піна низької або середньої кратності, генерована з робочих розчинів піноутворювачів, може подаватися на поверхню горючої рідини «м'яким»

або «жорстким» способом. Подавання піни під шар спирту (гасіння піною «підшаровим» способом) не допускається [25].

При цьому «м'який» спосіб передбачає подавання піни за допомогою пінокамер стаціонарних систем пожежогасіння або її подавання за допомогою переносних чи лафетних пожежних стволів-генераторів піни, пересувних технічних засобів пожежогасіння на стінку резервуара, спеціально передбачений або додатково встановлений захисний екран, відбійник чи інша конструкція, з якої піна плавно спливає на поверхню горючої рідини. Плавне спливання піни уповільнює її руйнування і забезпечує найбільшу ефективність пожежогасіння.

Що стосується «жорсткого» способу, то він передбачає подавання піни безпосередньо на поверхню пального за допомогою переносних або лафетних стволів-генераторів піни, а також стволів-генераторів піни, встановлених на пінопідіймачах. У разі подавання піни «жорстким» способом відбувається її часткове занурення у палне, яке супроводжується інтенсивним руйнуванням піни, тобто різким зниженням її вогнегасної ефективності. Чим більша швидкість руху піни у момент стикання із спиртом, тим інтенсивніше відбувається її руйнування [8].

Зважаючи на викладене, в усіх випадках рекомендовано подавання піни у резервуар «м'яким» способом. Якщо це неможливо, то піну слід подавати якомога ближче до стінки резервуара на ділянки поверхні з таким розрахунком, щоб забезпечити її однобічний рух у напрямі до стінки.

Суттєва залежність вогнегасної ефективності піни низької кратності від способу її подавання можлива у випадках, коли товщина шару спирту перевищує 25 мм [8]. Тому, у разі гасіння розливів спиртовмісних рідин, коли товщина шару спирту не перевищує вказаного значення, з подаванням піни «жорстким» способом досягається приблизно така ж ефективність пожежогасіння, як і у випадку її подавання «м'яким» способом [8].

З метою забезпечення безпеки в усіх випадках не слід розташовувати пожежні стволи-генератори піни у безпосередній близькості від палаючої

спиртовмісної рідини, щоб уникнути ежекції повітря, яке містить багато парів етилового спирту і, як наслідок, можливого погіршення процесів піногенерації. Порівнюючи з аерозольним гасінням, то такого не відбувається, оскільки аерозоль без зміни структури проходить через шар рідини.

### **1.1.5. Гасіння пожеж з використанням «спиртостійких» піноутворювачів**

Для гасіння спиртовмісних рідин найбільш ефективні піноутворювачі спеціального призначення, придатні для гасіння полярних горючих рідин (так звані «спиртостійкі» піноутворювачі). Такі піноутворювачі виготовляються із синтетичної сировини або сировини природного походження і містять водорозчинні полімери (як правило, тиксотропні полісахариди) або інші сполуки, які розчиняються у воді і в самому піноутворювачі, але коагулюють під час контакту з полярними органічними розчинниками (у тому числі етиловим спиртом) [26].

Використання «спиртостійких» піноутворювачів забезпечує гасіння спиртовмісних горючих рідин практично без їх розведення. Використання цих піноутворювачів найбільш доцільне, якщо вміст етилового спирту у рідині перевищує 30 % (об), оскільки в інших випадках достатньо ефективні дешевші піноутворювачі інших типів [27].

Під час контакту піни, генерованої з робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів, з полярною горючою рідиною на поверхні пального утворюється захисна плівка, яка частково екранує піну від дії рідини і різко уповільнює процес її руйнування. За певної інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача поверхня пального покривається шаром піни, достатнім для припинення горіння і забезпечення належного опору повторному займанню [26].

Піноутворювачі спеціального призначення, які передбачається використовувати для гасіння спиртовмісних рідин, повинні відповідати

вимогам ДСТУ EN 1568-4:2018 «Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню».

Інтенсивність подавання робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів під час гасіння спиртовмісних рідин у резервуарах піною низької кратності слід приймати (незалежно від концентрації спирту у рідині):

- не менше ніж  $0,12 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  – у разі подавання піни «м'яким» способом;

- не менше ніж  $0,20 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  – у разі подавання піни «жорстким» способом.

Інтенсивність подавання робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів під час гасіння спиртовмісних рідин у резервуарах піною середньої кратності приймають (незалежно від концентрації спирту у рідині):

- не менше ніж  $0,06 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  – у разі піни подавання «м'яким» способом;

- не менше ніж  $0,10 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  – у разі подавання піни «жорстким» способом.

У разі гасіння розливів спиртовмісних рідин, у тому числі розливів в обвалуванні та міжсвайному просторі під резервуаром, а також пожеж на наливних естакадах, інтенсивність подавання робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів у разі гасіння піною низької або середньої кратності приймають не менше ніж  $0,20 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  і  $0,10 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , відповідно.

Маючи у своєму складі водорозчинні полімери, більшість «спиртостійких» піноутворювачів є високов'язкими неньютонівськими рідинами. За зовнішнім виглядом такі піноутворювачі є мутнуватими субстанціями, за консистенцією подібними до желе. У їх позначеннях часто зустрічаються аббревіатури «AR» («alcoholresistant») або «ATC» («alcoholtyreconcentrate») [28]. Якщо такої аббревіатури у позначенні немає, то належність піноутворювача до «спиртостійких» можна визначити за

наявністю у його позначенні символів «/» або «х», які розділяють концентрації робочих розчинів для гасіння неполярних і полярних горючих рідин. Крім того, інформація про придатність та умови застосування піноутворювача для гасіння полярних горючих рідин, а також його належність до неньютонівських рідин, вказується у нормативній та/або супровідній документації на нього, а також на етикетках, прикріплених до оригінальної заводської тари або посудин, які використовуються для його транспортування.

Одним з недоліків є те, що для приготування робочих розчинів піноутворювачів, які є неньютонівськими рідинами, необхідно використовувати пінозмішувачі спеціальних конструкцій, призначені для приготування робочих розчинів таких піноутворювачів. Пінозмішувачі є досить вартісними у виготовленні та не можуть використовуватись без додаткових засобів – насосів, які перекачують рідини, рукавів та стволів. Використання переносних і стаціонарних пожежних пінозмішувачів звичайних конструкцій, призначених для приготування робочих розчинів піноутворювачів загального призначення (зокрема, пінозмішувачів типу «ПС»), може не забезпечити одержання водного розчину заданої концентрації та/або його однорідності. «Спиртостійкі» піноутворювачі допускається зберігати тільки у концентрованому вигляді.

Таким чином необхідно зазначити наступні недоліки та особливості:

- «спиртостійкі» піноутворювачі є вартісними;
- зберігання та використання «спиртостійких» піноутворювачів потребує спеціальних умов та ємкостей, що ускладнює застосування даного виду піноутворювачів.

#### **1.1.6. Гасіння пожеж з використанням піноутворювачів загального та спеціального призначення, які не містять спеціальних добавок**

Не маючи у своєму складі водорозчинних полімерів та інших спеціальних добавок, піноутворювачі загального та спеціального

призначення (у тому числі плівкоутворювальні) обмежено придатні для гасіння полярних горючих рідин. Зокрема, піна, генерована з їх робочих розчинів, інтенсивно руйнується під час контакту з концентрованими водними розчинами етилового спирту. Їх успішне застосування для гасіння спиртовмісних рідин можливе за умови попереднього розведення цих рідин водою або водним розчином піноутворювача до концентрації за якої інтенсивність руйнування піни суттєво знижується.

Концентрація спирту у водному розчині, за якої можливе гасіння спиртовмісної рідини піною, генерована з робочого розчину піноутворювача загального призначення, певною мірою залежить від хімічного складу піноутворювача і хімічного складу рідини, якою розводили спирт перед початком подавання піни. Зокрема, за даними літературних джерел [29-34], ця величина залежить від поверхневого натягу спиртовмісної рідини перед початком подавання піни, хімічного складу рідини (вода або водний розчин того чи іншого піноутворювача), якою розводили спиртовмісну рідину перед початком подавання піни, а також параметрів процесів розведення і подальшого подавання піни (інтенсивність, спосіб, тривалість подавання тощо).

Якщо відсутні нормативні документи чи рекомендації щодо застосування певного піноутворювача загального або спеціального призначення (за винятком «спиртостійких» піноутворювачів) для гасіння спиртовмісних рідин та початку подавання повітряно-механічної піни на гасіння повинне передувати розведення спиртовмісної рідини водою або водним розчином піноутворювача до концентрації 30 % (об).

Під час подавання води або водного розчину піноутворювача у резервуар чи іншу посудину, де міститься спирт, слід враховувати можливу нерівномірність розподілу його концентрацій в об'ємі суміші, тобто вживати заходів щодо її гомогенізації. Відносної рівномірності хімічного складу водно-спиртової суміші можна досягти за рахунок перемішування та/або подавання на поверхню рідини води у розпиленому вигляді за допомогою



водяних пожежних стволів-розпилювачів або водяних пожежних стволів багатоцільового призначення, а також за рахунок подавання на неї повітряно-механічної піни низької або середньої кратності.

Для генерування повітряно-механічної піни, що подається з метою розбавлення етанолу, допускається використовувати будь-які піноутворювачі загального або спеціального призначення, у тому числі такі, що частково не відповідають встановленим вимогам. Разом з тим, з метою зменшення шкоди довкіллю, перевагу слід віддавати біологічно «м'яким» піноутворювачам, тобто таким, біологічна здатність яких до розкладання перевищує 80 %. Піна може подаватися як стаціонарно встановленими пінокамерами, так і за допомогою пожежних ручних і лафетних стволів-генераторів піни від пересувної протипожежної техніки.

За відсутності технічної можливості перемішування рідини у резервуарі, цистерні або іншій посудині під час її горіння, збільшення рівномірності розподілу концентрації етилового спирту в об'ємі рідини може бути досягнуто завдяки природному конвекційному тепломасообміну, який відбувається у процесі горіння. Мінімізація порушень його перебігу досягається у разі подавання води в розпиленому вигляді, або подавання повітряно-механічної піни із забезпеченням постійного або послідовного зрошування усієї поверхні горючої рідини. Після подавання попередньо розрахованої кількості води (водного розчину піноутворювача) доцільно витримати певний проміжок часу (декілька хвилин) перед початком подавання піни.

Інтенсивність подавання робочих розчинів піноутворювачів загального або спеціального призначення, які відповідають вимогам стандартів [26] або [27], у разі гасіння спиртовмісних рідин, попередньо розведених до концентрації 30 % (для етилового спирту), піною низької або середньої кратності слід приймати не менше ніж  $0,08 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Тривалість подавання піни на гасіння рідини вказаного складу, яка знаходиться у резервуарі, слід приймати не менше ніж 60 хв.

Тривалість подавання піни на гасіння розливів (після попереднього розведення рідини) слід приймати не менше ніж 15 хв, а у випадку розливів рідин в обвалуваннях резервуарів або на інших обвалованих майданчиках – не менше ніж 30 хв. Подавати вогнегасні речовини на розведення і гасіння слід з таким розрахунком, щоб уникнути розбризкування горючої рідини.

Кількість води або водного розчину піноутворювача ( $m^3$ ), необхідну для розведення спиртовмісної рідини у резервуарі до заданої концентрації, слід розраховувати за формулою:

$$V_r = \frac{C_B - C_3}{C_3} \cdot V_{СП} \quad (1.1)$$

де  $C_B$  - вихідна концентрація спирту у рідині, яка зберігається у резервуарі, % (об);

$C_3$  - задана концентрація спирту, після якої передбачається розпочинати подавання піни, % (об);

$V_{СП}$  - кількість спиртовмісної рідини, наявної у резервуарі,  $m^3$ .

Зменшенням об'єму спиртовмісної рідини внаслідок вигорання нехтують.

Якщо після проведення розрахунків буде з'ясовано, що у разі заливання цієї кількості води (водного розчину піноутворювача) у резервуар відбудеться його переповнення і переливання горючої рідини через борт, то необхідно вжити заходів щодо зниження рівня горючої рідини у резервуарі до початку її розбавлення. Зниження рівня горючої рідини може бути досягнуто за рахунок її відкачування в інші резервуари або інші посудини через технологічні трубопроводи. Такі заходи слід передбачати під час складання оперативних планів пожежогасіння.

### **1.1.7. Гасіння пожеж у спиртосховищах іншими способами**

Як вже зазначалося, гасіння спирту може бути досягнуто за рахунок його розведення водою до концентрації близько 20% (об). Розрахункову кількість води, необхідної для розведення рідини до заданої концентрації,

визначають за формулою (1.1), нехтуючи зменшенням її кількості внаслідок вигорання. Вода може відбиратися як з водогону чи пожежної водойми, наявної на об'єкті, так і з цистерн пожежних автомобілів. За необхідності, зниження рівня горючої рідини може бути досягнуто за рахунок її відкачування в інші резервуари, цистерни або резервні посудини через технологічні трубопроводи. Необхідно зазначити, що вищенаведені способи важко реалізувати, так як для їх забезпечення потрібен великий об'єм води.

Гасіння пожежі у закритому спиртосховищі може бути досягнуто за рахунок подавання в об'єм приміщення водяної пари від парових котлів (парогенераторів), наявних на об'єкті. Цей спосіб гасіння дає змогу погасити пожежу тільки за достатнього ступеня герметичності приміщення, що захищається.

Гасіння пожеж у спиртосховищах закритого типу за рахунок застосування порошкових, газових, аерозольних або тонкорозпилених водних вогнегасних речовин може бути досягнуто за наявності стаціонарних систем пожежогасіння або шляхом подавання вогнегасних речовин від пожежних автомобілів відповідного призначення [36].

Відомо, що при горінні спирту в резервуарі особливу роль відіграє охолодження резервуарів. Охолодження резервуарів є першочерговою задачею, яку повинні вирішувати підрозділи ДСНС після прибуття на місце пожежі. Резервуар, що горить, і сусідні резервуари допускається охолоджувати подаванням води від стаціонарних систем охолодження резервуарів або пересувної протипожежної техніки.

Охолодження резервуара, що горить, ведуть за всією довжиною окружності його стінки, а сусідніх з ним – за довжиною половини окружності стінки, яку повернуто до резервуара, що горить. На противагу цьому вогнегасні аерозолі забезпечують ефективне екранування поверхні горючої речовини від зони горіння. Це забезпечує значне зменшення температури бортів резервуара. Зважаючи на проведений аналіз необхідно зазначити, що гасіння спиртів повинно супроводжуватися охолодженням.

Під час гасіння спиртів можуть виникати такі ускладнення:

- утворення «кишень», у які неможливо подати піну (аерозоль – можна);
- одночасне горіння рідини у двох або більшій кількості резервуарів;
- одночасне горіння рідини у резервуарі і в обвалуванні;
- низька температура повітря.

При цьому необхідно зауважити, що вогнегасний аерозоль можна застосовувати у всіх подібних ситуаціях.

## **1.2. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння спирту у резервуарах при підшаровій подачі вогнегасного аерозолю.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- провести аналіз сучасного стану розроблення та застосування систем пожежогасіння, а також систем підшарового пожежогасіння в практиці пожежогасіння та виявити шляхи підвищення їх ефективності;
- теоретично обґрунтувати можливість підвищення ефективності гасіння пожеж у резервуарах для зберігання спиртів методом підшарового подавання вогнегасного аерозолю;
- розробити методики проведення експериментальних досліджень з виявлення впливу чинників на ефективність процесів припинення горіння при його підшаровому подаванні;
- провести експериментальні дослідження з виявлення впливу параметрів та чинників на ефективність пожежогасіння при підшаровому подаванні аерозолю;
- обґрунтувати вихідні дані системи підшарового аерозольного пожежогасіння;
- обґрунтувати схему конструкцію системи підшарового аерозольного пожежогасіння, виготовити дослідний зразок такої системи, провести

апробацію в полігонних умовах, а також розробити рекомендації щодо їх застосування для протипожежного захисту об'єктів з можливістю виникнення горіння спиртів у резервуарах.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РЕЗЕРВУАРІВ З ПОЛЯРНИМИ ГОРЮЧИМИ РІДИНАМИ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ

#### 2.1. Теоретичне обґрунтування умов ефективного подавання вогнегасної речовини об'ємної дії для гасіння полярної горючої речовини в резервуарі

Для виникнення загоряння потрібно три умови (умовний трикутник горіння), а саме:

- горюча речовина (горюча рідина, горючі гази, тверді горючі матеріали тощо);
- окислювач;
- джерело запалювання.

Усунувши одну з них, можна припинити горіння.

Класи пожеж та їх символи встановлює ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж» [45].

Вогнегасна ефективність речовини зумовлюється, насамперед, такими характеристиками: здатність до інгібування (сповільнення) реакції горіння, охолоджувальна здатність (залежить від теплопровідності, теплоємності, теплоти фазового перетворення – топлення або випаровування), ізолювальна здатність, а також поверхневий натяг, змочувальна та піноутворювальна здатність (для рідин). Суттєве значення має електропровідність вогнегасної речовини, коли йдеться про безпеку осіб, які безпосередньо застосовують засоби пожежогасіння за наявності напруги електричного струму [34].

Завдяки високій інгібіторній здатності сучасні вогнегасні порошки є ефективними засобами гасіння пожеж класів В і С у разі, коли достатньо припинити полуменеве горіння. Порошки на основі фосфорамонійних солей придатні також і для гасіння пожеж класу А завдяки здатності створювати на

поверхні розжарених твердих матеріалів щільну ізолювальну плівку з фосфатів. У разі застосування порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D переважає ізолювальний ефект – обмеження доступу повітря до поверхні горючої речовини. Вогнегасні порошки характеризуються низькою електропровідністю і, завдяки цьому, можуть застосовуватись для гасіння пожеж електрообладнання з наявністю напруги електричного струму [6, 11, 34, 41].

Воду у вигляді компактного або розпиленого струменя застосовують для гасіння пожеж класу А, а в тонкорозпиленому стані (діаметр краплин до 100 мкм) – у разі пожеж класу В [10, 24]. Припинення горіння досягається, переважно, внаслідок охолодження горючих речовин і матеріалів, тобто усунення джерела запалювання. Певну роль при цьому відіграє утворення водяної пари, що діє в зоні горіння як газова вогнегасна речовина – інертний розріджувач горючих газів (парів) і повітря. У разі гасіння пожежі класу В (пожежі за участю рідин або твердих речовин, що зріджуються) також відбувається розведення горючої рідини водою, внаслідок чого зменшується концентрація її парів у зоні горіння.

Останнім часом використовують різноманітні добавки до води, як вогнегасної речовини, з метою поліпшення її функціональних та експлуатаційних характеристик [34]. Зокрема водні розчини піноутворювачів та інших поверхнево-активних речовин, концентрація яких вимірюється десятими і навіть сотими частками відсотка (змочувальні розчини), характеризуються низькими значеннями поверхневого натягу, внаслідок чого вони легко розтікаються по поверхні, а також проходять у товщу волокнистих структур. Для підвищення в'язкості застосовуються загущувальні добавки, наприклад, полісилікат натрію, ефіри целюлози. Деякі сольові розчини ( $\text{KNO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  тощо) проявляють інгібіювальні властивості, особливо у тонкорозпиленому (туманоподібному) стані; концентровані водні розчини карбаміду, етиленгліколю та деяких інших речовин придатні до зберігання та застосування за низьких температур [34].

Для генерування газомеханічної піни застосовують робочі розчини піноутворювачів загального та спеціального призначення. З робочих розчинів піноутворювачів загального призначення, з використанням відповідних піногенераторів, одержують піну низької, середньої та високої кратності (співвідношення об'єму піни до об'єму витраченого розчину становить відповідно: до 20, від 20 до 200, понад 200), котра придатна для гасіння пожеж класів А та В. У разі застосування піни переважає ізолювальна дія, а також можливий охолоджувальний ефект. Піну і водні речовини в будь-якому вигляді, крім тонко розпиленого, не можна застосовувати для гасіння пожеж електрообладнання під напругою [6, 42].

Піноутворювачі спеціального призначення застосовують для гасіння пожеж класів А та В змочувальними розчинами чи піною низької кратності та (або) для приготування робочих розчинів у морській воді.

В Україні налагоджено власне виробництво вітчизняними виробниками ТзОВ «Вогнеборець», ТзОВ «Пірена» та ін., плівкоутворювальних піноутворювачів спеціального призначення переважно на основі фторованих поверхнево-активних речовин. Піна низької кратності, одержана з робочих розчинів таких піноутворювачів, здатна швидко розтікатися поверхнею горючої рідини і утворювати щільну ізолювальну плівку водного розчину, яка в разі механічного пошкодження швидко самовідновлюється [6].

Газові вогнегасні речовини (надалі – ГВР) застосовують здебільшого для припинення полуменевого горіння. За механізмом гасіння вони поділяються на: інертні розріджувачі (діоксид вуглецю, азот, інертні гази, їх суміші) та інгібітори горіння (галогеновані вуглеводні) [47]. Гасіння інертними розріджувачами досягається переважно внаслідок розведення газового середовища і зниження в ньому концентрації окисника, а гасіння інгібіторами горіння – за хімічним механізмом (зв'язування радикалів, за участю яких у полум'ї відбуваються ланцюгові окисно-відновні реакції) [6].

Деякі ГВР, які зберігаються в технічних засобах пожежогасіння у рідкому або зрідженому стані, мають ще й охолоджувальну дію, і тому також



можуть застосовуватись для гасіння поверхні твердих матеріалів. Насамперед, це стосується діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), який зберігають у зрідженому стані в ізотермічних ємкостях або балонах за низької температури та (або) під надлишковим тиском. У корпусах вуглекислотних установок (балонів), залежно від температури навколишнього середовища ( $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), діоксид вуглецю перебуває під тиском власної пари 5,8 МПа. Під час викидання зрідженого  $\text{CO}_2$  з технічного засобу пожежогасіння утворюється двофазний струмінь, який складається з газу та переохолоджених твердих часток («снігу»). Однак існуючі на сьогодні вуглекислотні вогнегасники не призначені для гасіння пожеж класу А.

ГВР – це вогнегасні речовини, застосування яких не призводить до забруднення або пошкодження матеріальних цінностей. Тому, незважаючи на порівняно високу вартість, їх доцільно використовувати у банківських приміщеннях, обчислювальних центрах, сховищах музеїв, бібліотек тощо. Всі ГВР придатні для гасіння електрообладнання під напругою.

Загальні технічні вимоги до газових та аерозольних вогнегасних речовин встановлюються такими нормативними документами: ДБН В.2.5-56:2014 «Системи протипожежного захисту», ДСТУ 3958-2000 «Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань», ДСТУ 4490:2005 «Пожежна техніка. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтування та експлуатування. Технічні вимоги» [47, 48, 49] та ін.

Газові вогнегасні речовини – інертні розріджувачі (діоксид вуглецю, азот, аргон та їх суміші) виробляються або можуть вироблятися на підприємствах України за технологіями розділення повітря та шляхом збирання побічного продукту процесів бродіння ( $\text{CO}_2$ ) на об'єктах харчової промисловості.

Інгібітори горіння (галогенопохідні вуглеводні) в Україні не виробляються, оскільки немає відповідної сировинної бази. З часів Радянського Союзу в технічних засобах газового пожежогасіння, зокрема в

хладонових вогнегасниках, залишилася значна кількість озоноруйнівних речовин (брометил, хладон 114В2, галон 1301 тощо) [50], споживання яких, згідно з положеннями Монреальського протоколу 1987 року, підлягає поступовому скороченню і припиненню. Натомість зарубіжні фірми виробляють і пропонують на ринку України екологічно безпечні інгібітори горіння, які потребують перевірки органами санітарно-гігієнічного контролю та сертифікації. Серед цих вогнегасних речовин найбільш поширеними є гептафторпропан  $C_3HF_7$ , пентафторетан  $C_2HF_5$  (HFC 125, хладон 125).

Фізико-хімічні характеристики та показники вогнегасної ефективності більшості сучасних ГВР наведено в літературі [33, 40].

На даний час повністю не визначений механізм припинення горіння аерозолями. Якщо вважати, що гальмування процесу горіння здійснюється виключно за рахунок дрібнодисперсних твердих частинок  $K_2O$ ,  $KOH$ ,  $K_2CO_3$  чи  $KCl$ , то залишається нез'ясованим той факт, яким чином ці частинки проникають в зону горіння, адже відомо, що частинки мікронних розмірів можуть просто не потрапляти в зону горіння дифузійного факелу у зв'язку з їх малою інерційністю [53], через що вони можуть захоплюватись супутніми конвективними потоками і виноситись вгору за межі факелу горіння. У роботі [54] чітко вказується, що зменшення розміру частинок вогнегасних порошків менше 20 мкм є недоцільним, оскільки при цьому зменшується проникаюча здатність таких частинок і суттєво ускладнюється їх доставка в зону горіння. Те ж саме можна сказати і про зменшення вогнегасної дії тонкорозпиленої води, хоча теоретичні розрахунки показують, що із зменшенням розміру крапель води вогнегасна дія води зростає [34], але при умові введення води безпосередньо в зону горіння [55].

Необхідно зазначити, що всі компоненти аерозолі мають високі значення теплоємностей. Крім того тверда фаза аерозолі  $K_2O$  може взаємодіяти з компонентами газової фази, такими як:  $CO_2$  чи  $H_2O$  з утворенням або  $K_2CO_3$ , або  $KHCO_3$ , або  $KOH$ . У свою чергу ці новоутворені

сполуки, як відомо, легко утворюють гідратовані форми:  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$ ;  $KOH \cdot H_2O$ ;  $KOH \cdot 2H_2O$ ;  $KOH \cdot 4H_2O$ ;  $KCl \cdot 1,5H_2O$  і т. д.

Існують також аерозолеві вогнегасні речовини. Здебільшого це – тверда композиція системи газ-тверда фаза, яка здатна швидко згоряти без доступу повітря з утворенням аерозолу (димув). За характером дії на полум'я такі аерозолі близькі до вогнегасних порошків та ГВР.

ГВА призначені для гасіння в закритому просторі об'ємним способом. Основним недоліком таких речовин є висока пожежонебезпечність, зумовлена виділенням великої кількості теплоти під час горіння. Для спорядження переносних і пересувних вогнегасників їх не застосовують.

## **2.2. Особливості горіння спиртів**

### **2.2.1. Процес гасіння резервуарів з полярними горючими рідинами вогнегасними аерозолями**

Пожежі на об'єктах, де зберігаються та переробляються спирти та їх суміші, трапляються досить часто [16] та характеризуються високою швидкістю поширення полум'я – до 10 м/с, досягненням високих значень температур всередині об'єму на перших хвилинах, можливістю вибухів як газопароповітряних сумішей, так і ємностей під тиском, які зазнають теплового впливу. Виникнення таких пожеж, як правило, починається з вибуху або вибух стається в процесі пожежі [16].

Об'ємне гасіння є одним з найбільш ефективних способів протипожежного захисту, оскільки пристрої з можливістю швидкого гасіння об'єму інертним газом забезпечують попередження вибухів в апаратах і приміщеннях при створенні вибухонебезпечних концентрацій речовин. Але враховуючи той факт, що гасіння пожеж об'ємним способом із використанням вогнегасних газів вимагає концентрації вуглекислого газу в приміщенні близько 25-30 % для гасіння, а флегматизувальної дії – 35 %-45

%, що значно вище за гранично допустимі значення. Для азоту ці концентрації є ще більшими та становлять відповідно 40% для вогнегасної та 50 %-55 % флегматизувальної концентрації.

Для визначення факторів, які призведуть до підвищення ефективності гасіння таких рідин, необхідно розглянути механізм припинення горіння об'ємними засобами.

Потрапляючи в зону реакції горіння газу-розчинники  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  та аерозоль знижують концентрацію молекул палива та окисника  $\varphi_g$  і  $\varphi_o$  в одиниці об'єму суміші, що призводить до зменшення кількості їх молекул в об'ємі. Аерозоль додатково буде інгібувати горючу систему, що спричинить підвищення температури самоспалахування. Таким чином, зниження концентрації компонентів горючої суміші призводить до зменшення швидкості реакції окислення та підвищення енергії активації в зоні реакції горіння, що витікає з рівняння Арреніуса (2.1) [52].

$$\omega_{XP} = \varphi_G^n \cdot \varphi_{ok}^m \cdot \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT_{xp}}\right) \quad (2.1)$$

де:  $\varphi_{ок}; \varphi_{св}$  - концентрація горючого і окисника;

$E_{акт}$  – енергія активації реакції;

$T$  – температура, К;

$R$  – універсальна газова стала.

Таким чином, знижуючи концентрацію реагуючих компонентів – горючого та окисника, можна зменшити швидкість реакції до рівня, коли виникнення горіння чи його розповсюдження стає неможливим.

Зниження швидкості хімічної реакції, в свою чергу призведе до зменшення інтенсивності тепловиділення і температури горіння (2.2).

$$Q_{ТВ} = Q'_H \cdot V_{Г.С.} \cdot \omega_{XP} \quad (2.2)$$

де:  $Q_H$  – нижча теплота згоряння, кДж/кг;

$V_{Г.С.}$  – об'єм горючої системи, м<sup>3</sup>.

$\omega_{xp}$  – швидкість хімічної реакції.

Поступове зменшення тепловиділення горючої системи призводить до появи моменту, коли створюється, як мінімум, дві точки теплового балансу системи, та зниження температури в зоні реакції горіння до температури затухання.

При цьому залежність температури горіння від концентрації реагуючих речовин може бути визначена за допомогою рівняння теплового балансу (2.3):

$$T = T_0 + \frac{\eta Q_H}{\sum_{i=1}^n V_{np} C_{p_{пг}} + V_{\phi} C_{p_{\phi}}} \quad (2.3)$$

де:  $T_0$  – початкова температура;

$Q_H$  – нижча теплота хімічної реакції;

$\eta$  - коефіцієнт недопалу;

$C_{p_i}$  - теплоємність і-го продукту згоряння;

$V_{\phi}$  – об'єм в молях і-го продукту згоряння;

$C_{p_{г}}$  – теплоємність продуктів згоряння;

$V_{\phi}$  – об'єм в молях (не вступаючих в реакцію) і-го компонента.

Таким чином з рівняння теплового балансу випливає, що чим більше суміш відрізняється від стехіометричного складу, тим більший об'єм надлишкового компонента реакції який не зреагував, відповідно, тим нижча температура горіння  $T_r$  та вища енергія активації  $E_a$ .

На практиці ця залежність має широке застосування для зниження пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів. При введенні в газопароповітряну суміш інертних газів (флегматизаторів) – вуглекислого газу, азоту, пари води, гелію, аргону або їх сумішей, область поширення полум'я звужується – нижня границя зростає, а верхня знижується, чим і досягається флегматизація.

Підвищення концентрації інертного газу рівносильне зниженню концентрації кисню в горючій суміші, а дифузійне горіння більшості горючих речовин зупиняється при концентрації кисню в суміші, меншій 14-

16%. Але якщо гасіння полум'я газовими вогнегасними речовинами класу інертних розріджувачів звести до механічного застосування закону Арреніуса, то отримаємо, що вогнегасна концентрація не залежить від властивостей інертних газів, однак з практики відомо, що ефективність застосування азоту нижча, ніж у діоксиду вуглецю чи водяної пари. Для подачі інертного газу в об'єм, що захищається, існують різні способи подачі та методики розрахунку вогнегасної концентрації газів-розчинників.

При проектуванні систем пожежогасіння газоаерозольні засоби гасіння можуть подаватися в зону реакції горіння різними способами. Залежно від поставлених цілей можна виділити три способи подачі вогнегасних засобів в зону парів і газів безпосередньо в об'єм:

- в зону парів та газів – застосовується для попередження вибуху і припинення горіння в закритих технологічних апаратах і закритих приміщеннях;

- в об'єм, де відбувається горіння – застосовується для гасіння речовин і матеріалів, які горять у відкритому об'ємі, таких як: рідини, що розтікаються, газовий і нафтовий розпилювач;

- в горючу рідину – для зниження інтенсивності та температури при підготовці гасіння іншим методом чи для попередження спалахування рідини (флегматизування). При цьому успішність гасіння полум'я аерозолем повинно значно збільшитися за рахунок поєднання чинників, які впливатимуть на рідину та зону горіння.

Також підвищення ефективності гасіння газовими вогнегасними речовинами можна досягнути в результаті комбінованого застосування вогнегасного аерозолю та інертних розріджувачів або в результаті застосування комбіновано газоаерозольної системи та третього фактору – ударних хвиль, що описано в роботі [52]. Застосування ударних хвиль забезпечить найменшу тривалість гасіння, але їх застосування може призвести до непередбачуваних наслідків, наприклад, руйнування

трубопроводів або ємностей зі спиртом, внаслідок чого пожежа може підсилитись або трапитись вибух.

Як відомо, зменшення концентрації кисню в об'ємі, що захищається, і розбавлення горючих сумішей негорючими газами (азот, вуглекислий газ, пари води та ін.) призводить до зниження швидкості хімічної реакції окислення в зоні горіння, і, як наслідок, зменшення швидкості і температури полум'я. Аналогічно і в умовах пожежі для дифузійного газового полум'я рідких, газоподібних і твердих матеріалів – при зменшенні концентрації кисню в середовищі настає припинення горіння.

У цих умовах дисперсні тверді частинки аерозолі довший час перебувають в контакті із зоною хімічної реакції горіння. Цим забезпечується їх більш повна реалізація вогнегасних властивостей (ефективніше відбувається інгібування твердими частинками ланцюгових реакцій полум'я, поглинання тепла із зони горіння при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладанні твердих частинок), що в кінцевому результаті і визначає високу ефективність ліквідації горіння.

Доказом є висока інгібуюча здатність свіжо утвореного аерозолі по відношенню до ланцюгових реакцій у полум'ї. Невеликі дози аерозолі, що подаються для гасіння на початковому етапі (20-30 % від об'єму потрібної вогнегасної витрати), несуттєво змінюють концентрацію кисню і температуру в об'ємі, проте значно знижують відносну швидкість поширення полум'я (на 30-40 %) порівняно з нормальною швидкістю полум'я (рис.2.1).

**Пари бензину + повітря**  
 **$U_n/U_0$**

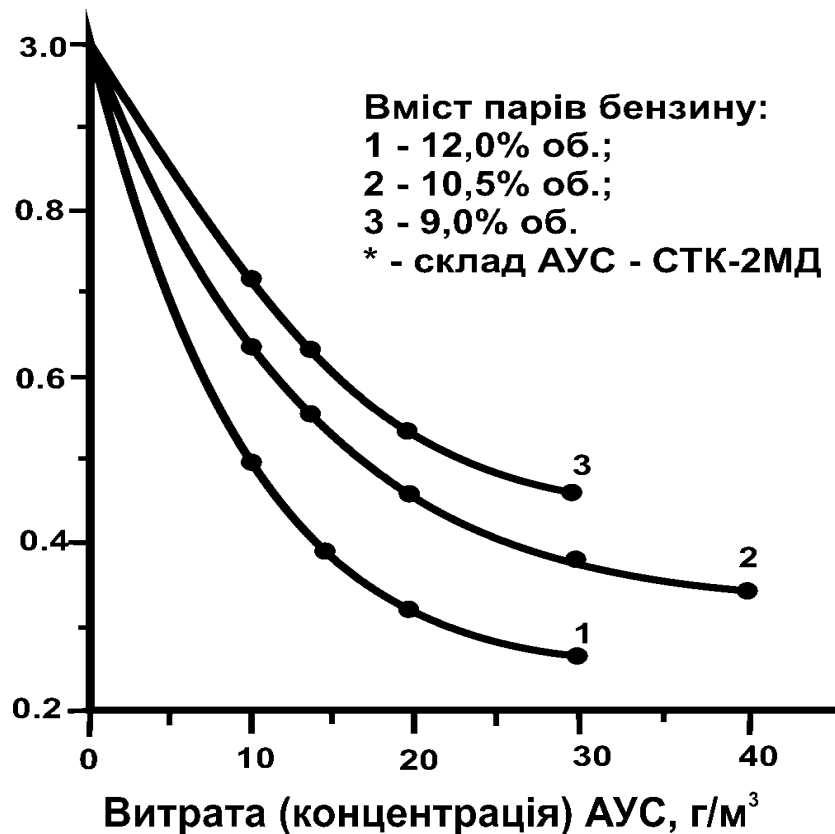


Рисунок 2.1 – Зміна відносної швидкості поширення полум'я в пароповітряній суміші над поверхнею бензину при введенні вогнегасного аерозолі.

Суттєве зниження нормальної швидкості полум'я у зв'язку із введенням в них малих доз аерозолі вказує на достатньо високу інгібуючу здатність твердофазних аерозолів.

При збільшенні концентрації аерозолі до нормативних значень інтенсивності подавання аерозолів темп зниження нормальної швидкості процесу горіння і ефективність рекомбінації активних центрів для однотипних вихідних горючих сумішей падає, але помітною стає швидкість пониження температури. Іншими словами збільшення витрати АУС до нормативних вогнегасних (флегматизуючих) значень супроводжується зниженням інгібуючих властивостей і збільшенням впливу теплофізичних факторів на процес припинення полум'я. Основним важливим процесом у



цих умовах є зниження температури полум'я за рахунок теплопоглинання при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладанні твердих частинок аерозолію [32].

### **2.2.2. Підвищення ефективності підшарового гасіння аерозолями методом вибору рецептур аерозольотворюючих сполук**

Як відомо, аерозолі проявляють високу вогнегасну дію і, змінюючи співвідношення окисників і пального, можна впливати на їх ефективність [53].

У більшості запропонованих рецептур аерозольотворюючих сполук у якості окислювачів використовують  $\text{KNO}_3$  чи  $\text{KClO}_4$ , або їх суміш, в меншій мірі використовують нітроцелюлозу та інші окисники. В якості пального використовують різноманітні синтетичні смоли – ідітол, епоксидну смолу, каучуки та інші, а також різноманітні добавки для регулювання процесу горіння АУС, оскільки у продуктах горіння АУС різного складу, який залежить від природи пального і окисників та їх співвідношення, може бути різне співвідношення газових компонентів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_x\text{O}_y$ ) і твердої фази у вигляді дрібнодисперсних частинок ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KNO}_2$ , а також гідратовані форми цих сполук). Змінюючи в рецептурі АУС співвідношення окислювачів і пального, а також використовуючи різні його види, можна впливати на вогнегасну ефективність аерозолів, зокрема застосовувати їх для гасіння палаючих резервуарів з горючими рідинами [56].

Співвідношення компонентів газової і твердої фаз визначає вогнегасну ефективність одержаних аерозолів.

Згідно з твердженням [31] одним із чинників, який суттєво може впливати на співвідношення газової і твердої фаз, є умови перебігу реакції горіння АУС, а саме: тепловий ефект реакції або теплота згоряння, оскільки

від цього фактору залежить, в першу чергу, повнота перетворення вихідних компонентів АУС в кінцеві продукти.

Для припинення горіння над дзеркалом горючої рідини резервуара потрібен великий об'єм вогнегасного аерозолу, а він, як відомо, утворюється в результаті спалювання АУС. Коли АУС буде мати стехіометричну концентрацію пального-окисник, то важко домогтися повного розкладання окисника, оскільки це вимагає значних втрат тепла. Але, якщо в суміші збільшити частку пального, то цим ми отримаємо додаткову порцію теплоти, яка сприятиме повному розкладанню окислювача до  $K_2O$ . Внаслідок цього збільшиться об'єм газової фази, який буде сприяти виносу в простір твердих частинок аерозолу, тобто забезпечувати вищу степінь перетворення зарядів АУС в аерозоль в ділянці горіння над шаром горючої рідини. Крім того, при спалюванні АУС з від'ємним кисневим балансом, за рахунок збільшення об'єму газової фази і за рахунок спалювання надлишкового пального, концентрація кисню в оточуючому середовищі буде зменшуватися.

Крім того, збільшення кількості газової фази, за рахунок збільшення кількості пального, буде сприяти утворенню більш потужного і довшого факелу (форсу полум'я) при горінні АУС, що не дасть згаснути суміші у випадку її розміщення під шаром горючої рідини. Так буде досягнуто максимальної концентрації аерозолу в зоні горіння. До того ж, при горінні пального буде утворювати інертний газ, який рухаючись через шар пального, сприятиме інтенсивному перемішуванню поверхневих нагрітих шарів. А це, як розглядалось вище, позитивно впливає на процес припинення горіння.

У разі встановлення установок аерозольного гасіння зверху резервуара, більш доцільним буде використання рецептур АУС, наближених до стехіометричних, адже при даному розміщенні установок продукти недопалу пального не встигатимуть охолоджуватись, що понизить вогнегасну ефективність суміші. Вводячи додатково у стехіометричну суміш частку  $KClO_4$  можна забезпечити більш повний розклад  $KNO_3$  та інших компонентів. До того ж, наявність в одержаному аерозолі карбонатів і хлоридів калію

може призвести до ефекту синергізму [54], тобто до підвищення в кінцевому результаті вогнегасної ефективності аерозолі. Використовуючи такі рецептури АУС в установках з верхнім розташуванням, буде підвищена їхня безпека, адже стехіометрична суміш при горінні створює менший факел ніж попередня рецептура.

Таким чином для підшарового гасіння аерозолем підходить рецептура АУС з надлишком пального із збільшеним газоутворенням. Це забезпечуватиме інтенсивніший вихід аерозолі на поверхню.

### **2.3. Моделювання процесу проходження вогнегасного аерозолі через шар рідини**

#### **2.3.1. Параметри, що впливають на швидкість руху бульбашок аерозолі через шар рідини**

При достатньо великих швидкостях, вихід газу в рідину утворює значний газоаерозольний факел, який далі дробиться на бульбашки і продовжує рухатись у вигляді потоку газорідної суміші.

Під впливом нерівномірного розподілу тиску по контуру бульбашки, остання деформується. Характер цих деформацій показаний на рис. 2.2 за спостереженнями над аерозольними бульбашками, які вільно спливають в об'ємі рідини. Стабілізуючою силою у даному випадку є поверхневий натяг, котрий зводить до мінімуму поверхню розділу фаз.

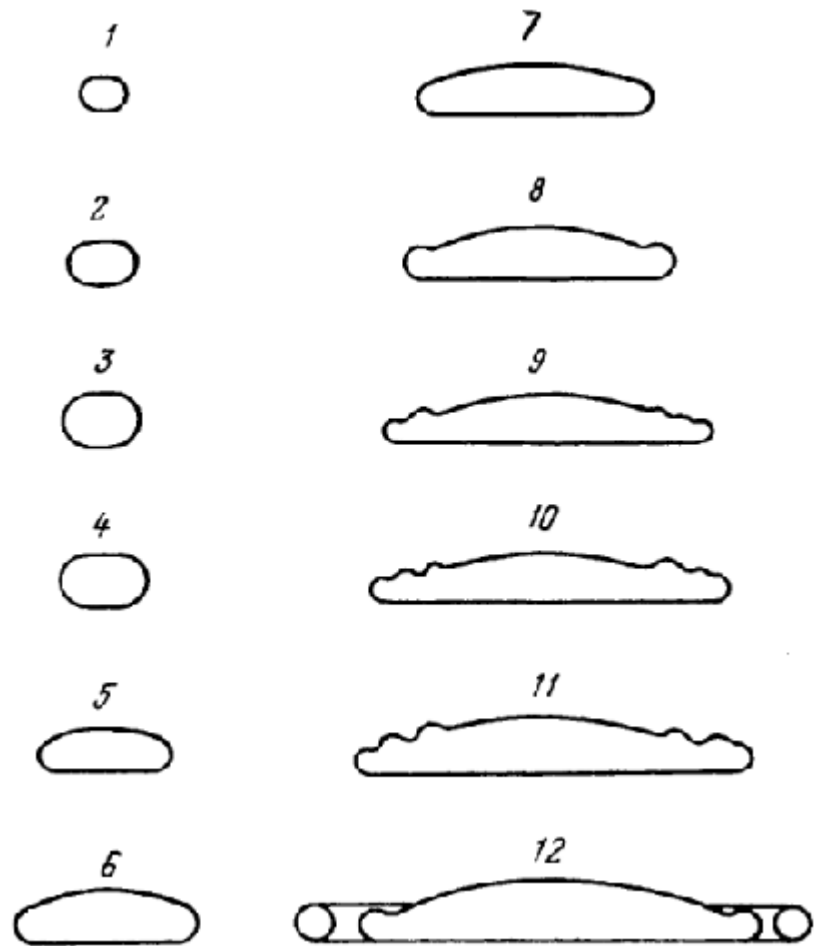


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення деформації аерозольних бульбашок, що підіймаються крізь рідину

Щоб зрозуміти процес руху аерозольних бульбашок через шар спирту розглянемо рис. 2.3, на якому приведені експериментальні дані про швидкість спливання аерозольних бульбашок в об'ємі рідини [40, 57, 58].

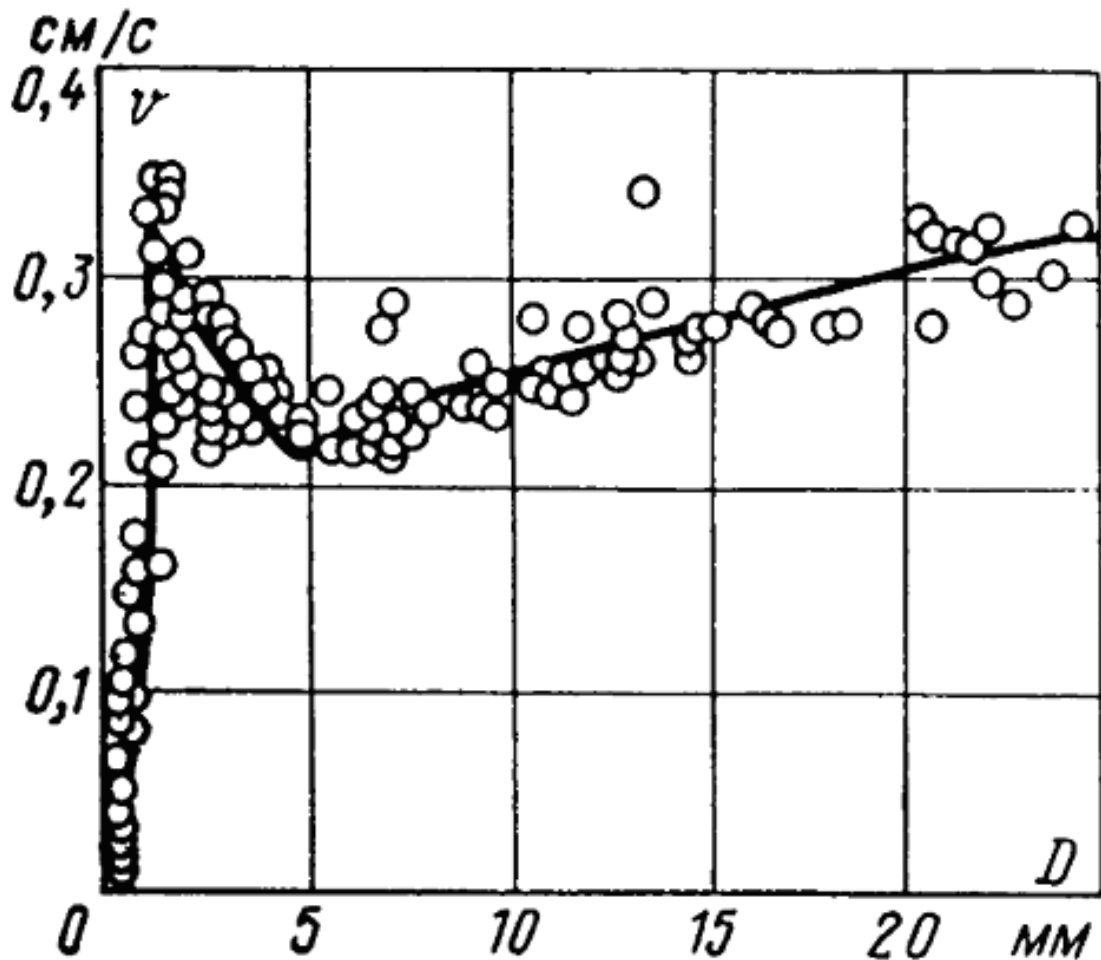


Рисунок 2.3 – Швидкість підйому бульбашок у воді в залежності від їх діаметру [40, 57, 58]

Ліва, висхідна гілка залежності  $v(D)$  відповідає закону (2.4):

$$Re \sim Ar^{2/3} \quad (2.4)$$

де:  $Re$  – число Рейнольда;

$Ar$  – число Архімеда.

Далі спостерігається падіння швидкості спливання, пов'язане з різкою деформацією (сплюсненням) бульбашок [40, 57, 58].

За деяким мінімумом швидкості спливання слідує її зростання із збільшенням об'єму бульбашки.

Права висхідна крива на рис. 2.3 добре описується за формулою, запропонованою Паблсом і Гарбером (2.5):

$$v = 1,35 \sqrt{\frac{\sigma}{R(\rho_1 - \rho_2)}} \quad (2.5)$$

На рис. 2.4 показано ряд експериментальних даних, що відповідають формулі (2.5) для бульбашок з більшим поперечним перерізом, які цілком задовільно групуються навколо прямої.

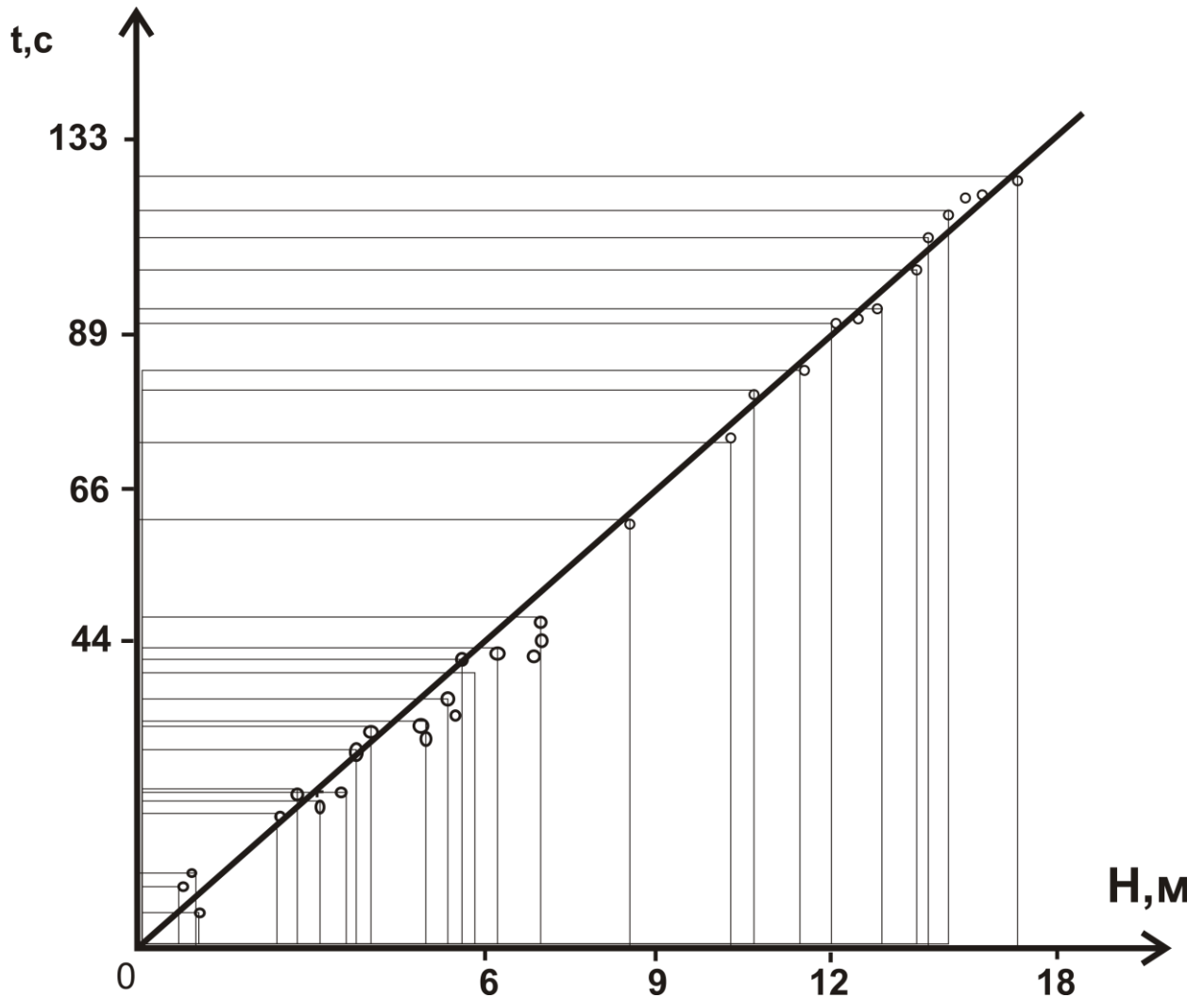


Рисунок 2.4 – Експериментальні дані про швидкість підйому бульбашок в об'ємі рідини [57, 58].

Провівши ряд розрахунків згідно з формулою (2.5) було обчислено час підйому аерозольних бульбашок із дна резервуара:

Таблиця 2.1

Час проходження бульбашок аерозолію в резервуарах з різними висотами

№ з/п	Горюча рідина	Час проходження бульбашки при заданих висотах, с			
		6 м	9 м	12 м	18 м
1.	Бензин	44	66	89	133

№ з/п	Горюча рідина	Час проходження бульбашки при заданих висотах, с			
		6 м	6 м	6 м	6 м
2.	Етиловий спирт	44	66	89	133
3.	Толуол	46	70	93	139
4.	Бензол	47	70	93	140
5.	Ацетон	44	67	89	133
6.	Уайт-спірит	44	65	87	131
7.	Етилацетат	47	70	94	141

Отже, беручи до уваги час підймання аерозолі можна помітити, що в найнижчих резервуарах із підшаровою установкою аерозольного гасіння початок вогнегасної дії відбувається через 44-47 с, а в найвищих 133-141 с.

### 2.3.2. Взаємодія вогнегасного аерозолі зі спиртами

При взаємодії з горючою рідиною потік аерозолі може частково захоплювати цю рідину у вигляді дрібних крапель. Багатофазна система, що утворюється, таким чином є нестабільною.

При барботажі аерозолі крізь шар рідини відбувається розрив оболонок бульбашок, що виходять на поверхню, і утворення при цьому дрібних крапель (40 мкм – 2 мм) в деякій мірі впливає на процес горіння. Адже в зону повітря поступає додаткова порція пального (рис. 2.5). Вивчивши процес підйому аерозольного потоку крізь товщу резервуара встановлено, що при значенні коефіцієнту виносу крапель на поверхню рідини  $(6-9) \cdot 10^{-3} \%$  вагомими змінами в механізмі гасіння можна знехтувати [58].

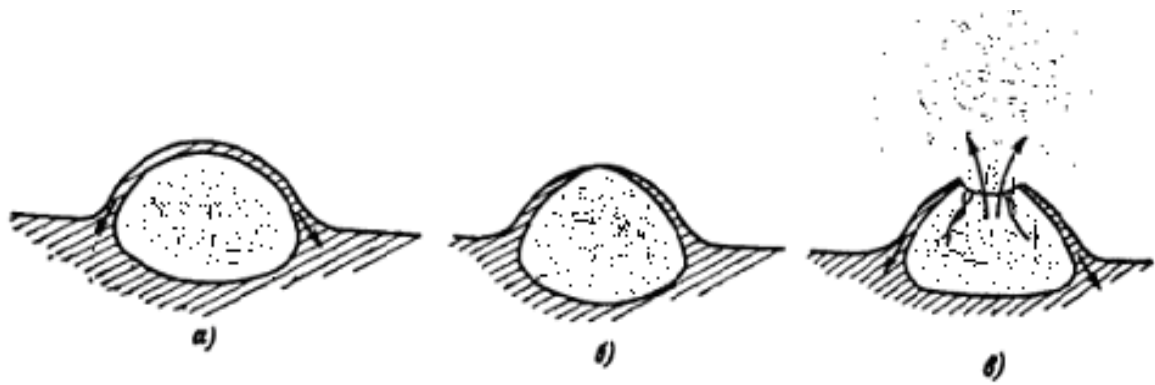


Рисунок 2.5 – Послідовність фаз розриву бульбашки на поверхні чистої рідини

Тверді частинки аерозолів не реагують із рідинами. Частинки із середньою і хорошою змочуваністю можуть реагувати із змочуючими рідинами лише при активному перемішуванні. Тому аерозольний потік, підіймаючись на поверхню, практично не буде втрачати своїх вогнегасних властивостей.

Аерозоль — нестійка система. Він схильний до постійних змін. З часом в аерозолі відбувається злипання завислих частинок. Цей процес носить назву – коагуляції (агрегація, агломерація); він відбувається в результаті взаємодії частинок під впливом різноманітних фізичних чинників. Аерозолі мають тільки седиментаційну стійкість, агрегативна стійкість у них відсутня, і кожне зіткнення їх частинок призведе до злипання. На відміну від ліозолів в аерозолях частинки мають різні заряди, можуть відрізнятись навіть знаком. При цьому заряд частинки дуже малий і постійно змінюється. В аерозолях не існує електронейтральності системи в цілому, вони можуть мати значний статичний заряд [59]. Найбільша роль в коагуляції належить молекулярним силам і силам електричного тяжіння. Знаючи об'єм, швидкість утворення вогнегасного аерозолу, час його надходження до зони горіння, швидкість руху частинок і їх розміри, ми можемо вирахувати коефіцієнт коагуляції –  $K$ . Враховуючи, що загальне число дрібних частинок в об'ємі аерозолу рівномірне, отримуємо формулу для обчислення коефіцієнта коагуляції (2.6).



$$K = 8kT/3\eta, \quad (2.6)$$

де:  $\eta$  - в'язкість середовища, для тиску від 10 до 100 Па дорівнює  $(2-5)10^{-6}$  кг/мс;

$kT$  – температурний коефіцієнт.

Коагуляція відбуватиметься тим інтенсивніше, чим більша частота зіткнення аерозольних частинок. Ця вірогідність збільшується під дією вказаних вище чинників. Дрібні частинки більш схильні до коагуляції, ніж великі. Прискорюється також коагуляція при підвищенні концентрації дрібних частинок у газовому середовищі.

Швидкість коагуляції аерозольних частинок вимірюється згідно з законом (2.7):

$$1/n - 1/n_0 = K_k, \quad (2.7)$$

де:  $n$  – концентрація частинок в деякий момент часу,  $1/м^3$ ;

$n_0$  – початкова концентрація частинок,  $1/м^3$ ;

$K_k$  – константа коагуляції,  $м^3/с$ .

Швидкість зниження розрахункової концентрації частинок в результаті процесу коагуляції визначається з виразу (2.8):

$$N = - dn/dt = - K_k \cdot n_1, \quad (2.8)$$

де:  $N$  – швидкість коагуляції, відповідає числу зустрічей частинок в одиниці об'єму в одиницю часу,  $1/с$ ;

$n_1$  – концентрація частинок через визначений момент часу,  $1/м^3$ .

Здебільшого коефіцієнт коагуляції буде становити 10%, це звісно негативно впливає на вогнегасні властивості аерозолів, однак допустимо для швидкого припинення горіння над поверхнею горючої рідини.

При підшаровому гасінні цей коефіцієнт практично не збільшується. Не зважаючи на повільніший час поступлення вогнегасного аерозолу в зону горіння, позитивний вплив на зменшення коефіцієнту коагуляції здійснює охолодження аерозолу під час його підйому через рідину. Розплавлені солі,

що утворились внаслідок горіння аерозольутворюючої суміші таким чином охолоджуються і практично не злипаються, при чому їх охолодження буде забезпечуватись внаслідок контакту газових бульбашок з холодною рідиною. Відповідно, чим дрібніші бульбашки, тим ефективніше буде охолоджуватись аерозоль. Таким чином зменшення розмірів бульбашок призведе до декількох позитивних факторів, а саме:

- 1) більш ефективно перемішування рідини та її охолодження;
- 2) інтенсивніше охолодження самого аерозолю;
- 3) зменшення коагуляції частинок аерозолю всередині бульбашок.

Солі лужноземельних металів, що містяться у вогнегасному аерозолі є досить корозійно-активними, особливо при взаємодії з вологою. Враховуючи час гасіння, корозійний вплив на стінки резервуара буде не значний.

#### 2.4. Теоретичне обґрунтування умов підшарового гасіння полярних горючих рідин в резервуарах

Відомо [60], що гасіння та флегматизування спиртовоповітряних сумішей найбільш ефективно при підшаровій подачі газоаерозолю. При цьому процес гасіння можна поділити на три етапи. (рис.2.6)

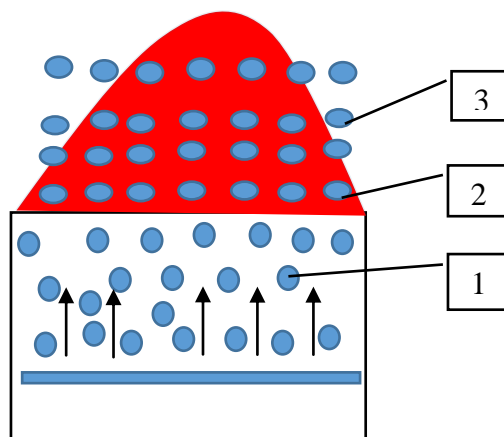


Рисунок 2.6 – Етапи підшарового аерозольного гасіння

1 – проходження газоаерозолю через шар горючої рідини; 2 – вихід аерозолю на поверхню рідини, що горить; 3 – проходження аерозолю через зону

горіння.

При проходженні аерозолі через шар спирту на ефективність гасіння впливають: густина, температура, тиск рідини, інтенсивність подачі газоаерозолі.

При виході на поверхню – вирішальними чинниками будуть зменшення швидкості випаровування, поглинання теплового випромінювання твердими частинками аерозолі.

Зрозуміло, що вогнегасний аерозоль буде проходити через шар рідини з різною швидкістю, при цьому на швидкість витоку буде впливати густина рідини, її температура та товщина шару горючої рідини. На першому етапі при виході аерозолі буде відбуватись перемішування рідини, зменшення температури поверхні рідини, яка горить, та вирівнювання температури за висотою стовпа рідини. Зменшення температури поверхні горючої рідини призводить, відповідно, до зменшення інтенсивності горіння та розмірів полум'я (рис. 2.6).

На другому етапі після виходу аерозолі з шару рідини та потрапляння його на поверхню відбувається зменшення концентрацій компонентів горючої суміші, екранування променевого випромінювання із зони горіння та обмеження його впливу на поверхню рідини, яка горить, та борти резервуара.

На третьому етапі при потраплянні аерозолі в зону горіння відбувається реалізація наступних вогнегасних чинників: інгібування, флегматизування, охолодження та частково зміна фізичних параметрів, таких як: збільшення тиску та об'єму. Найсуттєвіший з них – інгібування ультрадисперсними частинками аерозолі –  $\text{KOH}$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$  та іншими. Загалом вогнегасну інтенсивність подавання вогнегасного аерозолі можна визначити експериментально відповідно до маси заряду та часу його горіння – подавання. Відомо, [61] що вогнегасна концентрація аерозолі для вуглеводневого пального зростає по мірі збільшення довжини вуглецевого скелету молекули пального. Отже, можна зробити висновок, що вогнегасна

концентрація аерозолію для етанолу буде меншою, ніж при гасінні бензино-дизельної суміші. Автором роботи [62] було визначено, що вогнегасна інтенсивність подавання аерозолію при гасінні стандартного вогнища 21В на відкритому просторі становила 8 г/с.

Крім зазначених вище, одним з вагомих чинників впливу, як було вказано, є перемішування шарів рідини при виході аерозолію на поверхню. Це призводить до зменшення температури на поверхні палаючої рідини, інтенсивності випаровування та горіння, а, відповідно, і випромінювання. Щодо температури більш глибоких шарів рідини, то по мірі виходу аерозолію вона буде вирівнюватись і це, в свою чергу, забезпечить зменшення температури поверхневого шару рідини, яка горить, та зниження інтенсивності випаровування і, як наслідок, зменшення розмірів полум'я. Таким чином, при підшаровому аерозольному гасінні будуть одночасно реалізовуватись зазначені чинники, [63] сумарна дія яких призведе до швидкого та ефективного гасіння.

Оскільки аерозоль є засобом об'ємного гасіння, то його застосування на відкритих просторах та умовно герметичних об'ємах потребує обґрунтованого підходу щодо можливості його підшарової подачі. Відомо, [6] що пожежі на об'єктах з виробництва переробки та зберігання спирту часто починаються з вибуху спиртоповітряної суміші. Водночас швидкість поширення полум'я становить до 10 м/с з досягненням значних температур в межах 1000 °С. Також у результаті виникнення пожежі може статись вибух, що є наслідком теплового впливу на сусідні резервуари, так і в результаті утворення горючих спиртоповітряних сумішей. Зважаючи на вказані вище чинники гасіння таких пожеж є проблемним, оскільки на даний час не існує універсального засобу гасіння, який поєднував би в собі переваги порошкових, газових та, деякою мірою, охолоджувальних засобів гасіння. Вогнегасний аерозоль об'єднує в собі переваги кожного з вищезазначених вогнегасних засобів, а саме: чинить, подібно до газів та порошоків, об'ємну вогнегасну дію, забезпечує тривалий час збереження вогнегасної

концентрації – до 30 хвилин. Враховуючи вищевказане, слід зауважити, що аерозоль одночасно буде інгібітором, флегматизатором та охолоджувачем зважаючи на його склад (дрібнодисперсні солі калію, воду в вигляді аерозолі та газу, які утворюються в процесі горіння здебільшого –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  та інші). Поєднання їх в одній системі призведе до підсилення вогнегасного ефекту внаслідок синергізму, що показано в роботі [64].

Підшарова подача вогнегасного аерозолі передбачає його подачу з нижнього або середнього рівня на поверхню рідини, яка горить. При цьому реалізуються наступні чинники впливу, які наведені далі. На виході з сопел відбувається розширення аерозолі та його часткове охолодження при контакті з холодними масами горючої рідини. Далі – при підніманні вогнегасного аерозолі буде відбуватись захоплення ним холодної рідини та її підйом на поверхню горіння. Це спричинить охолодження верхнього нагрітого шару рідини та зменшення інтенсивності випаровування рідини та, відповідно, зменшення швидкості горіння інтенсивності теплового випромінювання і розмірів полум'я. Після виходу аерозолі на поверхню відбувається охолодження та розбавлення зони парів і газів в дифузійному полум'ї. Це призведе до звуження області займання та збільшення енергії активації. Подальше проникнення вогнегасного аерозолі в зону горіння забезпечує інгібування реакції горіння, її охолодження дисперсним аерозолем, розбавлення газами флегматизаторами –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ . Подальше надходження вогнегасного аерозолі з відповідною інтенсивністю в зону горіння забезпечить зменшення інтенсивності горіння за рахунок вищезазначених факторів, які призведуть, при необхідній інтенсивності, до затухання дифузійного полум'я.

Отже, враховуючи вищевказане, слід зазначити, що ефективність гасіння від підшарової подачі носитиме комплексний характер і на різних етапах виходу аерозолі з горючої речовини будуть працювати різні чинники впливу. Їх можна розділити на фізичні та хімічні, а також ті, які працюють синергічно разом з іншими, та підсилюють дію один одного. Для більш

повного розуміння взаємодії чинників необхідно зобразити взаємозв'язок на блок – схемі (рис. 2.7).

Для визначення дії чинників, які призведуть до підвищення ефективності гасіння таких рідин, необхідно розглянути кожен з них окремо.

Потрапляючи в зону реакції горіння аерозолева суміш знижує концентрацію молекул горючого та окисника  $\varphi_g$  і  $\varphi_o$  в одиниці об'єму суміші, що призводить до зменшення кількості їх молекул в об'ємі. Зменшення температури в зоні горіння відбуватиметься внаслідок розбавлення холодними масами аерозолю та інгібування, що призводить до зменшення інтенсивності теплоутворення та, відповідно, кінцевого значення енергонасичення системи – температури.



Рисунок 2.7 – Блок-схема відображення комплексного характеру вогнегасного ефекту від підшарової подачі аерозолю з підшару горючої рідини.

У результаті аналізу процесу гасіння спирту та спиртовмісних сумішей різними вогнегасними засобами було теоретично обґрунтовано високу ефективність підшарового гасіння газоаерозольними сумішами спиртів.

Перевагами такого способу гасіння є: значний період експлуатації, висока вогнегасна ефективність (від 8 г/м<sup>3</sup>), простота в обслуговуванні та використанні.

### 2.5. Математична модель впливу концентрації аерозолі та густини горючої рідини на час ліквідації горіння за умови підшарового гасіння

Для підтвердження достовірності експериментів встановимо функцію відгуку у вигляді лінійної поліноміальної математичної моделі досліджень впливу концентрації вогнегасного аерозолі  $C$  та густини горючої рідини  $\rho$  на час гасіння полум'я при умові підшарового гасіння. Межі зміни технологічних і конструктивних чинників та результати експериментів наведені в таблиці 2.2:

Таблиця 2.2

#### Результати експериментів

Вид основної емпіричної залежності від технологічних і конструктивних чинників	Межі зміни технологічних і конструктивних чинників	Тип факторного плану	Результати спостережень		
			№ з/п	$t_1$ , с	$t_2$ , с
$t = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i$	$C = 15 - 35 \text{ г/м}^3$ $\rho = 760 - 860 \text{ кг/м}^3$	$2^2$	1	10,4	10,9
			2	11,5	12,0
			3	11,8	12,4
			4	12,5	13,0

1. Кодування факторів.

Результати кодування факторів зведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

## Кодування факторів

Інтервал варіювання та рівень факторів	Концентрація аерозолю, г/м <sup>3</sup>	Густина рідини, кг/м <sup>3</sup>
Нульовий рівень $X_i = 0$	30	810
Інтервал варіювання $\Delta_i$	5	50
Нижній рівень $X_i = -1$	10	760
Верхній рівень $X_i = +1$	35	860
Кодове позначення	$X_1$	$X_2$

2. Складання план-матриці експерименту.

План-матриця для даного експерименту ( $2^2$ ) наведена в таблиці 2.4:

Таблиця 2.4

## План-матриця експерименту

Дослід	$X_1$	$X_2$
1	-1	-1
2	+1	-1
3	-1	+1
4	+1	+1

3. Рандомізація дослідів

Під рандомізацією розуміють випадковий порядок виконання дослідів у часі.

Умови та результати дослідів зведено до наступної таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

## Рандомізація дослідів

Дослід	$X_1$	$X_2$	$x_1 \cdot x_2$	$Y_1$	$Y_2$	$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2}{2}$
1	-1	-1	+1	10,4	10,9	10,65



2	+1	-1	-1	11,5	12,0	11,75
Дослід	$X_1$	$X_2$	$x_1 \cdot x_2$	$Y_1$	$Y_2$	$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2}{2}$
3	-1	+1	-1	11,8	12,4	12,00
4	+1	+1	+1	12,5	13,0	12,75

#### 4. Перевірка відтворюваності дослідів

Відтворюваність процесів при однаковому числі паралельних дослідів перевіряють за критерієм Кохрена (G) (2.9).

$$G = \frac{S_{i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_e)}; \quad (2.9)$$

$S_{i \max}^2$  обираємо з  $S_i^2$  (2.10).

$$S_i^2 = \frac{(y_{i1} - y_{i2})^2}{2}; \quad (2.10)$$

$$S_1^2 = \frac{(10,4 - 10,9)^2}{2} = 0,125;$$

$$S_2^2 = \frac{(11,5 - 12,0)^2}{2} = 0,125;$$

$$S_3^2 = \frac{(11,8 - 12,4)^2}{2} = 0,18;$$

$$S_4^2 = \frac{(12,5 - 13,0)^2}{2} = 0,125;$$

$$G = \frac{0,125}{0,125 + 0,125 + 0,18 + 0,125} = 0,225 \leq G_{(0,05; 4; 1)} = 0,9065;$$

де,

$f_n$  – кількість дослідів. У даному випадку ми проводимо 4 дослідів

$f_B$  – число ступенів вільності кожної оцінки.

Оскільки ми проводимо 2 паралельні досліди, то число ступенів вільності, відповідно, буде рівним  $f_B = 1$ .

З таблиці додатку для заданих значень вибираємо значення критерію Кохрена:

$$G_{(0,05;4;1)} = 0,9065;$$

Отже, відтворюваність дослідів виконується.

Визначимо похибку дослідів:

$$S_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{N} = \frac{0,125 + 0,125 + 0,18 + 0,125}{4} = 0,139$$

Визначимо коефіцієнти регресії:

$$y = \theta_0 + \theta_1 \cdot x_1 + \theta_2 \cdot x_2 + \theta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$\theta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i}{n} = \frac{10,65 + 11,75 + 12,0 + 12,75}{4} = 11,788$$

$$\hat{a}_1 = \frac{10,65 \cdot (-1) + 11,75 \cdot (+1) + 12 \cdot (-1) + 12,75 \cdot (+1)}{4} = 1,85$$

$$\hat{a}_2 = \frac{10,65 \cdot (-1) + 11,75 \cdot (-1) + 12,0 \cdot (+1) + 12,75 \cdot (+1)}{4} = 2,35$$

$$\hat{a}_{1-2} = \frac{10,65 \cdot (+1) + 11,75 \cdot (-1) + 12 \cdot (-1) + 12,75 \cdot (+1)}{4} = 0,35$$

Отже,

$$y = 11,788 + 1,85 \cdot \tilde{\alpha}_1 + 2,35 \cdot \tilde{\alpha}_2 + \hat{a}_{1-2} \cdot x_1 \cdot x_2$$

## 5. Перевірка адекватності моделі за допомогою критерію Фішера.

Адекватність буде обґрунтованою, якщо виконується нерівність (2.11,2.12):

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_g^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_n)}; \quad (2.11)$$

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \bar{y}_i - y_i \right)^2}{n - m - 1}; \quad (2.12)$$

Для перевірки адекватності зробимо допоміжну таблицю 2.6.

Таблиця 2.6

Допоміжна таблиця

№ досліду	$\bar{y}_i$	$y_i$	$(\bar{y}_i - y_i)^2$
1	10,65	10,4	0,0625
2	11,75	11,5	0,0625
3	12,00	11,8	0,0400
4	12,75	12,5	0,0625

Визначимо  $S_{ad}^2$ :

$$S_{ad}^2 = \frac{0,0625 + 0,0625 + 0,04 + 0,0625}{4 - 2 - 1} = 0,2275$$

$$F = \frac{0,2275}{0,114} = 2 \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_n)} = 7,71$$

Отже, адекватність нашої математичної моделі є обґрунтована.

#### 6. Оцінка значимості коефіцієнтів регресії.

Дану оцінку проводимо за допомогою критерію Стюдента. Якщо коефіцієнт незначимий, то це означає, що даний чинник не впливає на параметр оптимізації.

Умова значимості має вигляд (2.13):

$$|\epsilon_i| \geq \Delta\epsilon_i = t_{(0,05;f_n)} \cdot \frac{S_\epsilon}{\sqrt{n}}; \quad (2.13)$$

$$\Delta\hat{a}_i = 2,78 \cdot \frac{\sqrt{0,114}}{\sqrt{4}} = 0,47;$$

$$|\epsilon_1| = 1,85 \text{ – } \epsilon \text{ значимим,}$$

$$|\epsilon_2| = 2,35 \text{ – } \epsilon \text{ значимим,}$$

$$|\hat{a}_{1-2}| = 0,35 \text{ – не } \epsilon \text{ значимим.}$$

Представимо рівняння з кодovими значеннями з натуральними змінними:

$$t = 11,788 + 1,85 \cdot \frac{\tilde{N} - 30}{5} + 2,35 \cdot \frac{\rho - 810}{50},$$

$$t = 0,37\tilde{N} + 0,047\rho - 37,38.$$

## 2.6. Висновки

1. Теоретично обґрунтовано умови ефективної подачі вогнегасного аерозолю, які полягають в тому що найбільша ефективність гасіння буде спостерігатись при подаванні аерозолю з дна ємності зі спиртом. Це забезпечуватиме рівномірний розподіл бульбашок з аерозолем та подрібнення великих бульбашок на більш дрібні.

2. Теоретично обґрунтовано, що зменшення розміру бульбашок аерозолю повинно призвести до збільшення вогнегасної ефективності підшарового гасіння за рахунок більш повного перемішування спирту, зниження температури на його поверхні та, відповідно, зменшення інтенсивності випаровування спирту. Виявлено, що основними явищами, які сприятимуть підвищенню ефективності пожежогасіння в процесі виходу вогнегасного аерозолю на поверхню, буде захоплення бульбашками аерозолю холодних мас спирту та винесення його на поверхню, що забезпечуватиме зниження її температури та інтенсивності випаровування

3. Теоретично встановлено, що висока ефективність аерозольного підшарового гасіння забезпечуватиметься внаслідок одночасного впливу багатьох факторів, а саме: зменшення температури поверхні спирту, що горить, збільшення концентрації частинок вогнегасного аерозолу в зоні парів і газів дифузійного полум'я та, відповідно, флегматизування горючої суміші в ній. Далі, після надходження вогнегасного аерозолу в зону горіння він буде забезпечувати інгібуючий вплив та гальмування реакції горіння. Зроблено припущення, що одночасна дія всіх цих факторів на полум'я повинна призвести до зменшення розмірів полум'я внаслідок зменшення швидкості горіння та його загасання.

4. Змодельовано процес проходження аерозолу через шар спирту. Встановлено параметри, які впливають на швидкість руху бульбашок, основними з яких є густина, температура та розмір бульбашок аерозолу.

5. Обґрунтовано умови підшарового гасіння спиртів та описано синергічний взаємозв'язок чинників, які мають комплексний характер, та забезпечують успішність гасіння.

6. Розроблено математичну модель впливу концентрації аерозолу та густини горючої рідини на час ліквідації горіння при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолу. Отримано оцінку значущості критерію Стьюдента та отримано рівняння з кодовими значеннями у вигляді

$$t = 0,37C + 0,047\rho - 37,38$$

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН (СПИРТІВ) У РЕЗЕРВУАРАХ ВОГНЕГАСНИМ АЕРОЗОЛЕМ

#### 3.1. Методика визначення ефективності гасіння об'ємним способом вогнегасним аерозолем пожеж у резервуарах із спиртами

Як було розглянуто та обґрунтовано в попередньому розділі горіння полярної рідини на відкритій поверхні є доволі складним процесом, під час перебігу якого відбуваються як хімічні, так і фізичні процеси. Досліджувати такі процеси необхідно виходячи з властивостей вогнегасного аерозолю та його вогнегасних характеристик. Аналіз експериментальних методик з визначення вогнегасної ефективності аерозолів, показав, що необхідно дослідити ряд параметрів, які загалом забезпечують ефективне гасіння спиртів, а власне: його об'ємну вогнегасну ефективність, поширення в об'ємі, вплив на температурні характеристики процесу горіння спиртів, підтвердження можливості подавання через шар рідини, визначення зміни температури рідини при подаванні аерозолю через шар рідини, визначення швидкості проходження аерозолю через шар рідини, визначення часу гасіння та концентрації вогнегасного аерозолю та їх бінарних сумішей над поверхнею рідини.

Зрозуміло, що для експериментального визначення вогнегасної ефективності підшарового аерозольного гасіння необхідно визначити вогнегасну об'ємну ефективність при гасінні спиртів.

Для проведення експерименту було використано лабораторну методику та установку з визначення об'ємної вогнегасної ефективності аерозолю автора [64].

Беручи до уваги точність зважування АУС, швидкість рівномірного розподілу в об'ємі та задовільну відтворюваність результатів було обрано для проведення лабораторних досліджень камеру об'ємом 11,7 л. Вона

виготовлена у формі паралелепіпеда із листової сталі ( $29,6 \times 20 \times 19,8$  см) товщиною  $\delta=1$  мм. Одна сторона камери була виготовлена із силікатного скла, приклеєного до каркасу камери. У верхній, нижній та боковій поверхнях є отвори ( $d=30$  мм) під гумові корки. У нижню частину камери встановлювалось електричне джерело запалювання АУС – нагрівальна свічка від дизельного двигуна. В якості макетного осередку вогню використовували металевий тигель об'ємом 200 мл.

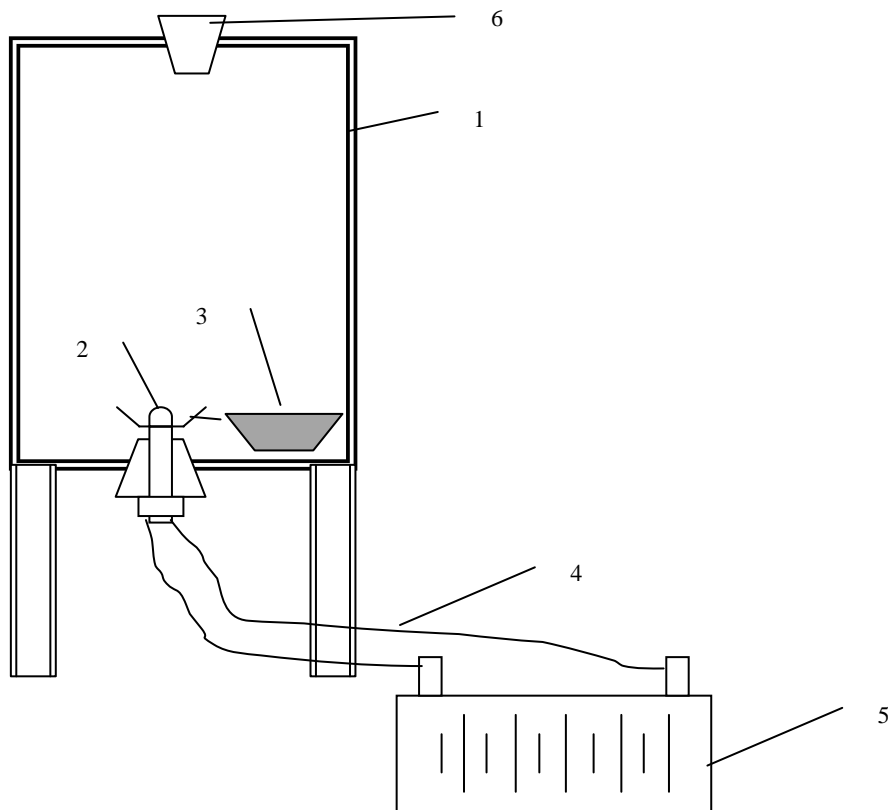


Рисунок 3.1 – Схема установки для визначення мінімальної вогнегасної маси АУС при гасінні спиртів.

1. Камера. 2. Свічка накаливання. 3. Тигель з горючим. 4. Електричні проводи. 5. Електричне джерело живлення. 6. Продувочний отвір.

Порції АУС зважували з точністю до  $0,0001$  г на електронних аналітичних терезах марки WPS-60/c/2.

Зразки АУС готували змішуючи попередньо дисперговані відповідні порції окислювачів та палива. З одержаної маси формували циліндрики і витримували до їх повного затвердження. Зразки АУС готували методом глухого пресування попередньо змішаних порцій окислювачів і пального.

Сутність методики полягає у визначенні мінімальної вогнегасної порції АУС, при згорянні якої у камері об'ємом 11,7 л проміжок часу горіння, внесеного у камеру попередньо запаленого спеціального спиртового вогнища, не перевищує значення 2 с.

Експериментальне визначення вогнегасної ефективності проводили наступним чином.

1. На вагах зважували декілька порцій аерозольутворюючих сполук, масу яких вибирали відповідно до передбачуваної вогнегасної ефективності, але на декілька грам більше.
2. У камеру вносили тигель зі спиртом і підпалювали його. Для встановлення стійкого горіння спирту витримували час 1 хв.
3. Після 1 хв включали джерело запалювання та підпалювали порцію АУС.
4. Після згорання АУС фіксували час гасіння або негасіння спиртового вогнища. За вдалу спробу гасіння вважалось гасіння протягом 20 секунд після спалювання АУС.
5. Покази результатів – гасіння чи негасіння заносили в таблицю.
6. Фіксували тривалість горіння. Якщо тривалість горіння перевищувала значення 20 с, дослід повторювали з більшою масою АУС; у випадках, коли тривалість горіння була меншою за 20 с, повторювали дослід із меншою масою АУС. Таким чином, за результатами 3 дослідів визначали масу АУС при спалюванні якої тривалість горіння паливника становила не більше 20 с. Значення МВК ( $\text{г/м}^3$ ) розраховували за формулою:

$$MBK = \frac{M_n}{V_k} \cdot 1000 \text{ г/м}^3, \quad (3.1)$$



де  $M_n$  – мінімальна маса порції АУС (г), за якої час гасіння попередньо запаленого метанового пальника при внесенні його в камеру з продуктами її згоряння становив 2 с;

$V_k$  – об'єм камери, який в дослідах дорівнював 11,7 л.

Похибка результатів визначення не перевищувала значення  $\pm 5\%$ .

Результати експерименту вносили в таблицю 3.1.

### 3.2. Експериментальне визначення ефективності об'ємного гасіння аерозолем полярних горючих рідин

Як видно з таблиці 3.1, об'ємні вогнегасні концентрації є досить незначні і вже при концентрації аерозолю в  $10 \text{ г/м}^3$  є вогнегасними для етанолу. Для пропанолу та інших спиртів зазначені концентрації є дещо вищими, та становлять 14-18  $\text{г/м}^3$  в умовах випробувальної установки.

Зважаючи на отримані результати можна сказати, що для об'ємного гасіння не потрібно значних концентрацій вогнегасного аерозолю.

Таблиця 3.1

Об'ємні вогнегасні концентрації аерозолю при гасінні спиртів

№ з/п	Горюча речовина	Аерозоль, $\text{г/м}^3$	Час гасіння, с
1	Етанол	10	10
2	Бутанол	14	12
3	Пропанол	14	9
4	Ізоаміловий спирт	16	9

Отримані значення дають змогу оцінити можливість ефективного гасіння аерозолями спиртів та їх сумішей як в обмеженому об'ємі, так і підшаровим способом. При цьому можна сказати, що найбільш ефективним для етанолу є аерозоль.

Обговорення результатів експерименту з визначення ефективності об'ємного аерозольного гасіння спиртів

Як бачимо з результатів дослідження, об'ємна вогнегасна ефективність аерозолі при гасінні спиртів є досить значною і їх вогнегасна концентрація є меншою до 2 разів порівняно з концентрацією, яка необхідна для гасіння вуглеводневого пального. Гасіння при цьому відбувається наступним чином: полум'я спирту спочатку забарвлюється в оранжевий колір (Рис.3.2), що свідчить про те, що в зону горіння потрапляють солі вогнегасного аерозолі –  $K_2CO_3 \cdot 2H_2O$ ,  $KHCO_3$   $KOH$  та інші. Крім цього полум'я спирту, як і будь-якого дефлаграційного полум'я, починає активно охолоджуватись внаслідок інгібуючої та флегматизуючої дії компонентів. Таким чином, вогнегасна ефективність аерозолі забезпечує комплексну дію на полум'я. Враховуючи, що інтенсивність випромінювання при горінні спиртів є незначною, слід зауважити, що горіння спирту зменшуватиметься активніше при потраплянні в полум'я аерозолі, що забезпечить синергічну вогнегасну дію та ефективне подавлення полум'я.

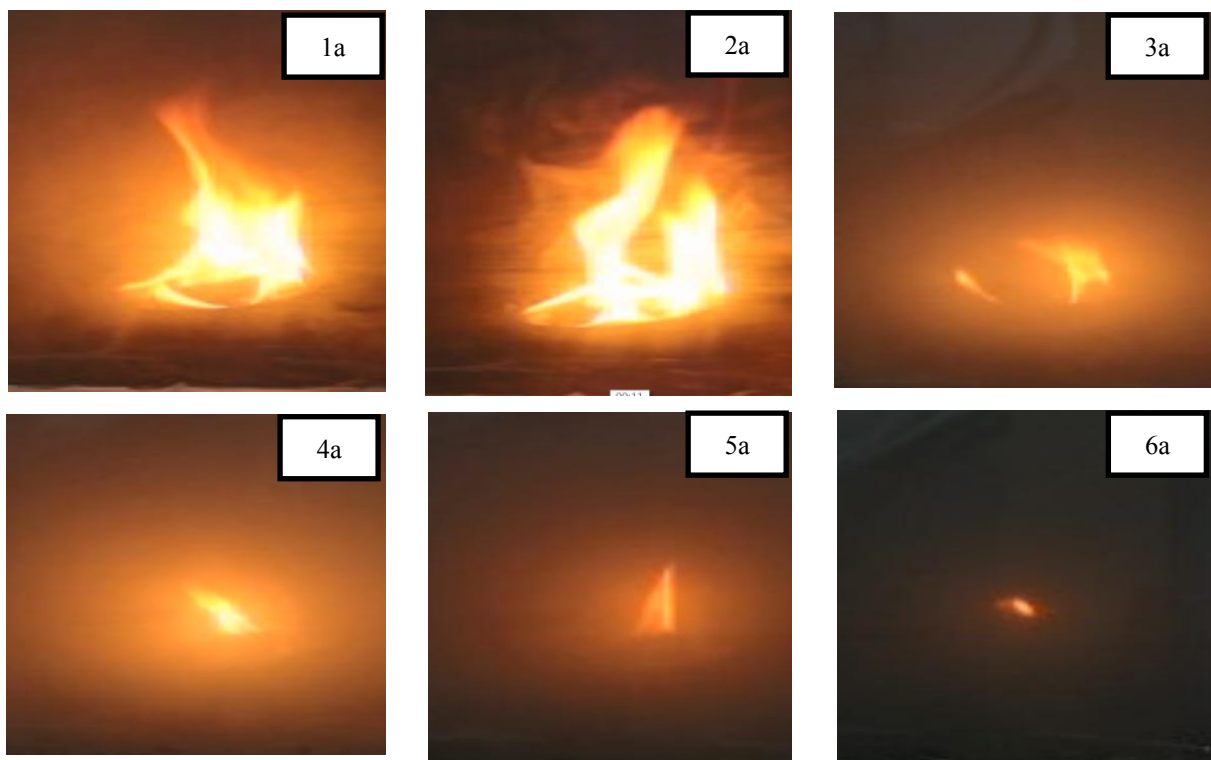


Рисунок 3.2 – Розкадрування процесу об'ємного гасіння вогнегасним аерозолем, утвореного з АУС «Багр-1» етанолу (Метод «Камери»).

Як видно із розкадрування, об'ємне гасіння спирту відбувається за подібним принципом як і у випадку з гасінням вуглевоневого пального. При цьому полум'я гасне наступним чином: спочатку відбувається його додаткове забарвлення та деяке зменшення в розмірах (Рис.3.2. позиції 1а-2а). Через 12 секунд його розміри зменшуються (Рис. 3.2. позиції 3а-4а). Далі через 5 секунд відбувається ще більше зменшення розмірів полум'я та його затухання (Рис. 3.2. позиції 5а-6а). При цьому необхідно відмітити, що при об'ємному гасінні вогнегасна концентрація створюється рівномірно по всьому захищуваному об'єму. Таким чином вогнегасна концентрація забезпечує ефективне гасіння н-бутанолу при незначних вогнегасних концентраціях – від 10 до 16 г/м<sup>3</sup>.

### **3.3. Лабораторна методика визначення ефективності підшарового гасіння вогнегасними аерозолями**

Далі – було визначено вогнегасну ефективність аерозолю при підшаровій подачі аерозолю за розробленою методикою, а отримані результати наведено в таблиці 3.2.

Маючи на меті отримати відповіді щодо вогнегасної ефективності аерозолю при його підшаровій подачі, було розроблено установку з визначення вогнегасної ефективності. Лабораторна установка (рис.3.3) для визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння вогнегасним аерозолем представляє собою ємність із нержавіючої сталі з такими розмірами: ширина – 153 мм, довжина – 153 мм, висота – 185 мм.

Методика з визначення ефективності підшарового гасіння передбачає те, що АУС поміщається в прийомну камеру та герметизується, після чого спирт підпалюється та горить 60 секунд. Після досягнутого стабільного горіння спирту електричним запальником підпалюється АУС, який утворює аерозоль, що під тиском поступає на розподільник, який розташований на дні ємності. Далі – аерозоль барботується через шар рідини та виходить на її

поверхню, звідки він потрапляє в зону горіння. З метою забезпечення відповідної швидкості горіння АУС, був виготовлений циліндр з АУС з визначеним діаметром, що забезпечувало його відповідну масову швидкість згоряння. Масову швидкість горіння АУС визначали на вагах, де розміщували АУС відповідної конфігурації, підпалювали, та фіксували час горіння. Масову швидкість було отримано в результаті поділу маси АУС на час горіння.

В якості АУС використовували суміш сахарози (34%) та нітрату калію (66%).

Для визначення вказаних параметрів була розроблена методика проведення випробування та експериментальна установка (рис. 3.3), яка схематично показана на рис. 3.3 а та фото установки – на рис. 3.3 б.

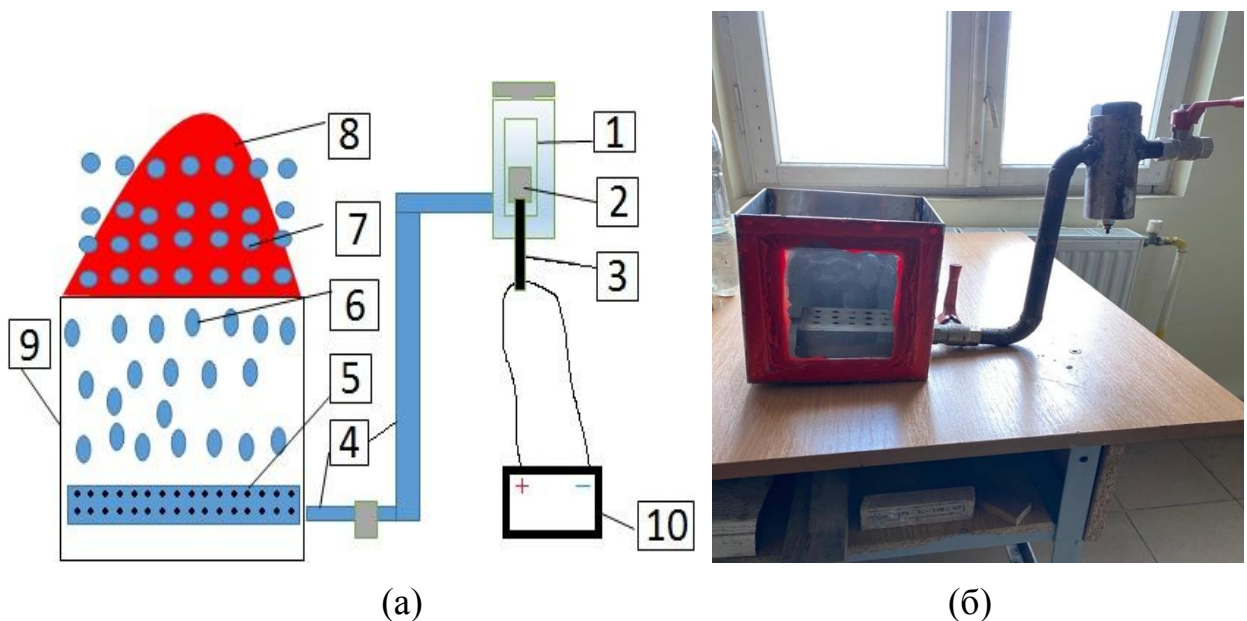


Рисунок 3.3 – Установка для визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння спиртів.

1 – Приемна камера. 2 – Заряд АУС визначеної конфігурації. 3 – Джерело запалювання. 4 – Трубопровід. 5 – Розподільник аерозолю. 6 – Бульбашки аерозолю. 7 – Частинки аерозолю в зоні горіння. 8 – Дифузійне полум'я спирту. 9 – Теплоізолятор. 10 – Джерело електричного струму.

Зрозуміло, що при подаванні аерозолю, інтенсивність подачі аерозолю доречно вимірювати в г/с, так як фіксованого об'єму в дослідженнях немає. Визначення вогнегасної інтенсивності подачі бінарної газоаерозольної суміші проводили згідно з зазначеною методикою. Витрату вогнегасного аерозолю, що забезпечує гасіння спиртів «підшаровим» способом показано в табл. 3.2.

### 3.4. Експериментальне визначення ефективності підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем

У результаті використання розробленої установки та згідно з методикою встановлено, що вогнегасна інтенсивність подачі аерозолю, утвореного з АУС на основі Сахарози (33%),  $KNO_3$  (67%), становить близько 0,8 г/с для площі 0,023 м<sup>2</sup>.

Таблиця 3.2

Витрата вогнегасного аерозолю, що забезпечує гасіння спиртів підшаровим способом

№ з/п	Горюча рідина	Аерозоль				Час гасіння, с	
		Витрата, що забезпечує гасіння під час подавання підшаровим способом, г/с		Повна маса АУС, г			
		А	В	А	В	А	В
1	Метанол	1,8	3,3	36	33	20	10
2	Етанол	1,2	2,3	25,2	23,7	21	11
3	Бутанол	1	1,375	26.6	22	26	16
4	Ізопропанол	0.9	1,59	24	25	26	16
5	Ізоаміловий спирт	0.9	1,07	20,5	23	22.7	21.5

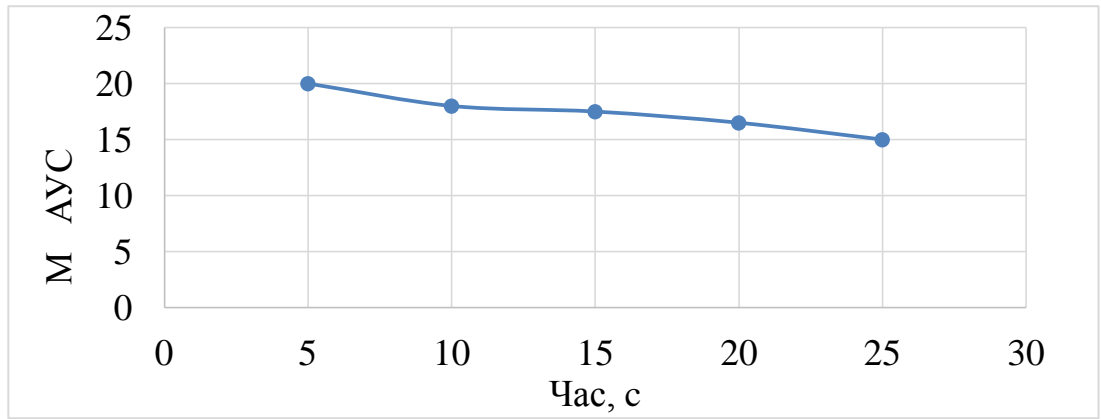


Рисунок 3.4 – Залежність часу підшарового гасіння бутанолу від маси АУС

Як видно, вогнегасний аерозоль при підшаровій подачі ефективно забезпечує гасіння дифузійного полум'я спиртів. При цьому вогнегасні концентрації аерозолу є дещо нижчими, ніж для вуглеводневого пального, що можна порівняти з результатами роботи [65].

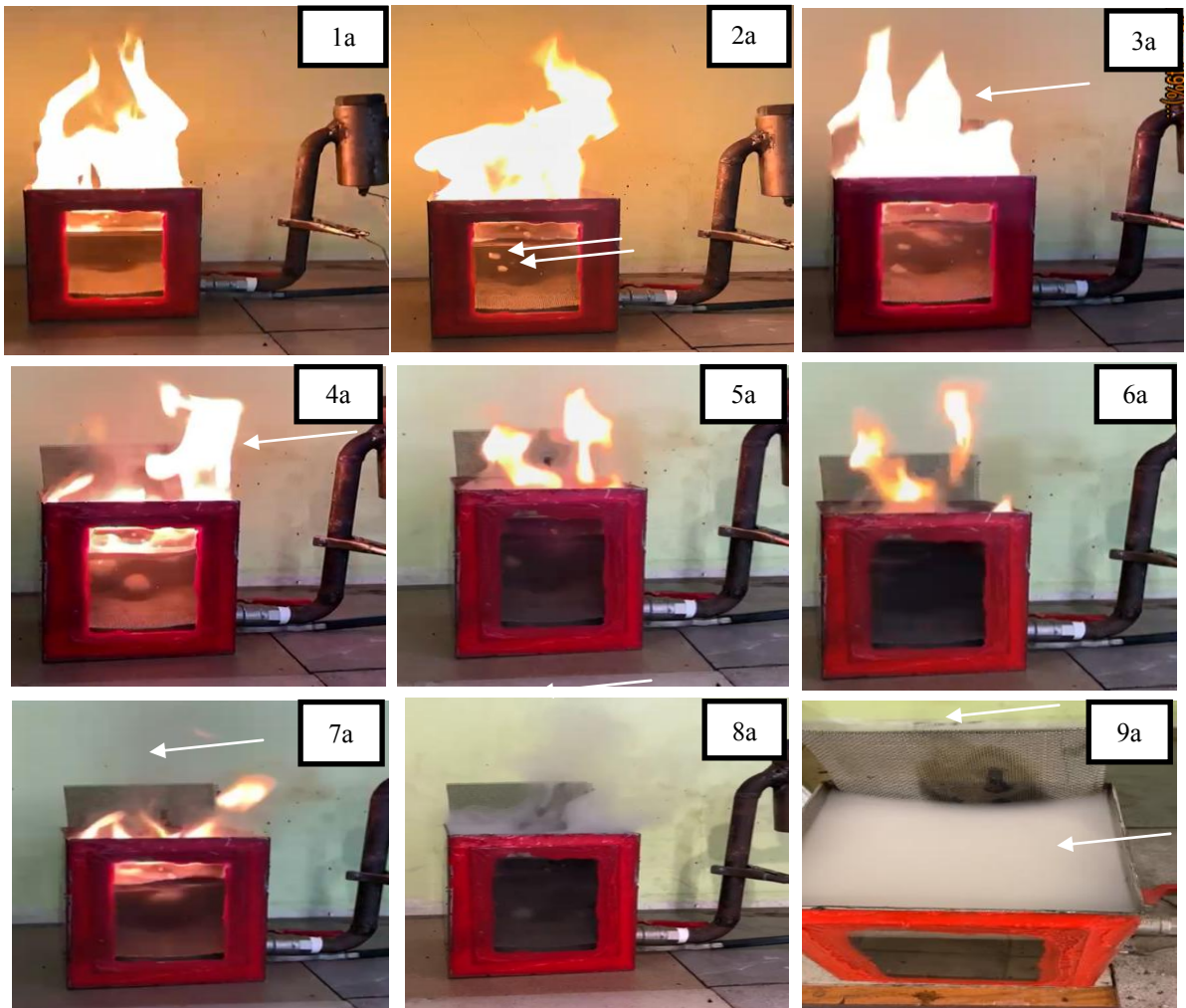


Рисунок 3.5 – Розкадрування підшарового гасіння вогнегасним аерозолем бутанолу на лабораторній установці

Так, наприклад, об'ємна вогнегасна концентрація аерозолю для н-гептану становить  $18 \text{ г/м}^3$ , а для етанолу –  $10 \text{ г/м}^3$ . З результатів експерименту випливає, що повний час гасіння спирту становить в середньому 19 с.

На 2 етапі відбувається проникнення аерозолю в зону парів і газів, де відбувається його змішування з горючою сумішшю, що забезпечує попередню флегматизацію горючої суміші, яка має поступити в зону горіння. Таким чином, це забезпечує ефективне придушення горіння ще на етапі поступлення горючої суміші в зону горіння.

На рисунку 3.5, позиція 1а відбувається горіння бутанолу з часом 15 секунд, після чого починається подача вогнегасного аерозолю на 16 секунд, що видно по утворенню бульбашок (вказано стрілками поз. 2а). Від позиції 3а до 4а полум'я зменшується в розмірах та починається його фрагментація (вказано стрілками). Далі відбувається різке зменшення розмірів полум'я та, відповідно, руйнування його структури, що видно на рис. 3.5, позиції 5а та 6а. Час від початку гасіння до моменту настання позиції 7а становив від 10 до 30 секунд. Після цього на поверхні горючої рідини залишався шар аерозолю, який був стійким до 65 секунд (позиція 8а та 9а). Наступним етапом з визначення вогнегасної ефективності підшарової подачі аерозолю було визначення температурних характеристик такого гасіння. Далі було проведено визначення особливостей гасіння ізопропілового спирту. Умови проведення експерименту – аналогічні до вищевказаних.

Як показано на рис. 3.6 (поз. 1а) горіння спирту продовжувалось 30 секунд і аерозоль починали подавати підшарово на 30-34 секунд вільного горіння. Момент виходу вогнегасного аерозолю показано на поз. 2а. Полум'я при цьому починає збільшуватись в об'ємі (поз. 3а-4а) та змінювати колір з червоного на фіолетовий, що свідчить про потрапляння в зону горіння солей калію.

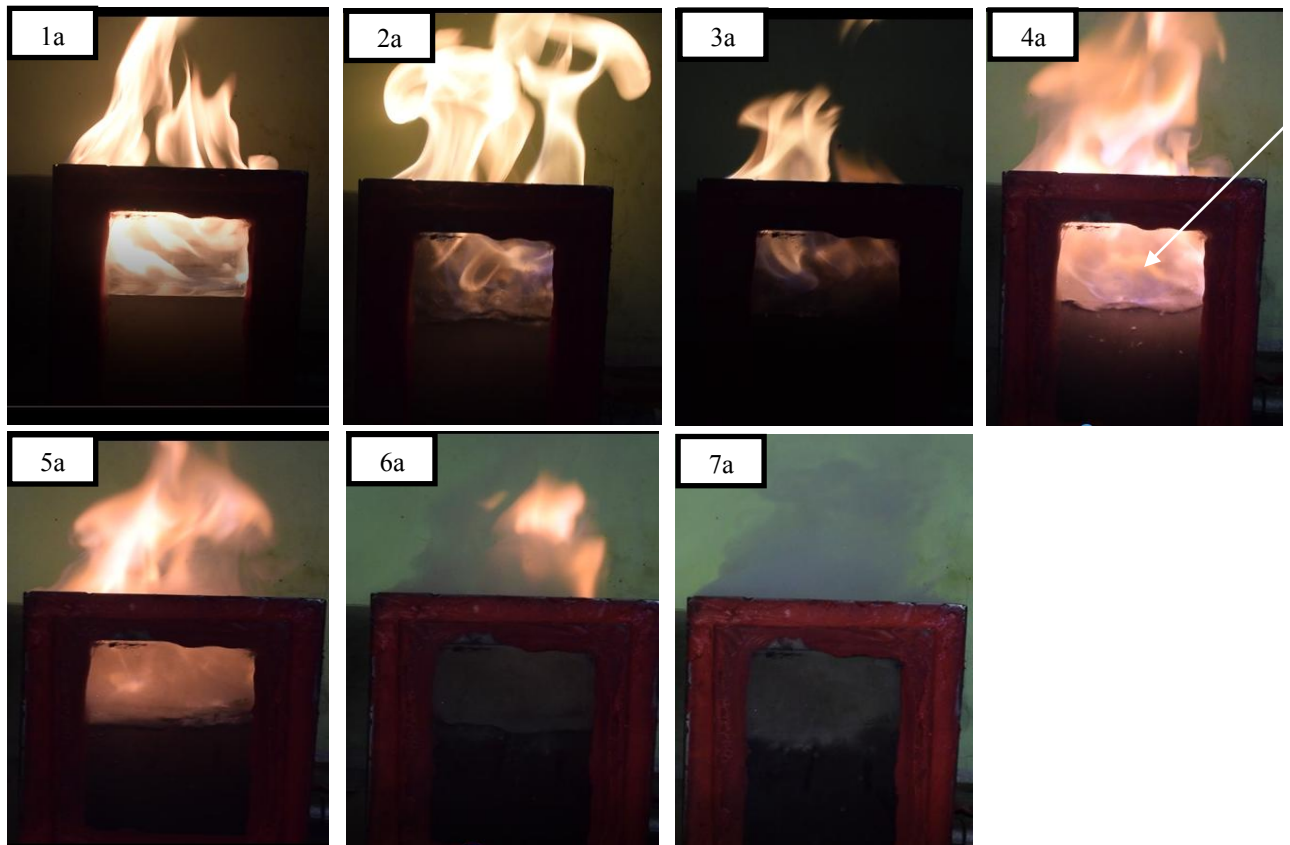


Рисунок 3.6 – Розкадрування підшарового гасіння вогнегасним аерозолем ізопропілового спирту на лабораторній установці

Далі – внаслідок інгібування неорганічними солями калію відбувається зменшення розмірів полум'я (поз. 5a) та подальше збільшення фіолетового забарвлення, що добре видно в зоні парів і газів (помічено стрілкою поз. 4a). Після чого розміри полум'я різко зменшуються (поз. 6a) і воно, гасне (поз. 7a). Як видно з розкадрування підшарова подача вогнегасного аерозолу забезпечує ефективне гасіння в проміжку часу від 10 до 30 секунд.

### **3.5. Експериментальне визначення температурних характеристик процесу підшарового гасіння спиртів аерозолем**

З робіт [5, 66] відомо, що горіння спирту в резервуарі є доволі складним процесом, під час перебігу якого відбуваються хімічні та фізичні процеси. Досліджуючи такі процеси, необхідно брати до уваги властивості



вогнегасного аерозолю та умови його подачі. Аналіз експериментальної методики [60] з визначення вогнегасної ефективності аерозолів та їх бінарних сумішей вказав на те, що слід визначити ряд параметрів, які забезпечують ефективне гасіння полярних рідин, а зокрема – можливість подавання аерозолю через шар рідини.

З метою експериментального визначення зазначених параметрів було використано лабораторну установку (рис. 3.3). Для визначення температурних параметрів горіння спирту дану установку було дообладнано термопарами, що розташовані на бортах ємності та дзеркалі рідини (рис. 3.6). На дні резервуара встановлено розподільник, який представляє собою об'ємну пластину з отворами 5 та 12 мм по всій її площі, для рівномірного розподілення аерозолю всередині посудини. Схематично установку зображено на рисунку 3.3а.

Згідно із зазначеною методикою, АУС поміщають в приймальну камеру та герметизують, потім спирт підпалюють і він горить 60 секунд.

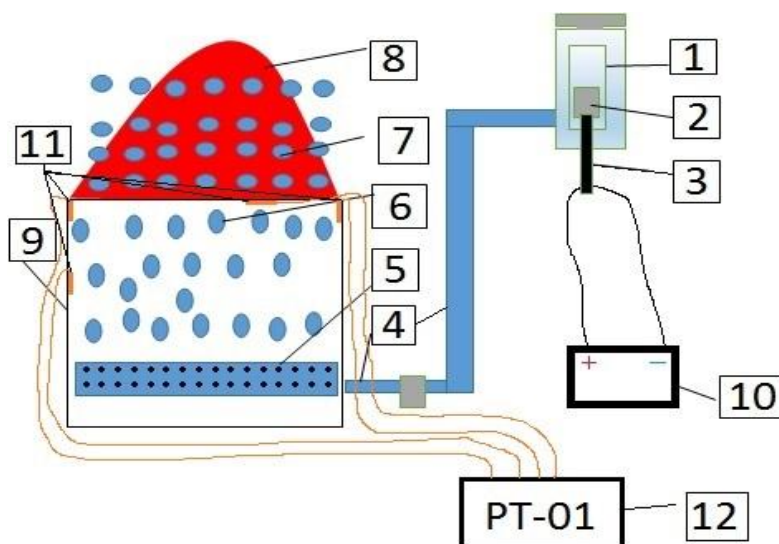


Рисунок 3.7 – Установка для визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння спиртів, додатково обладнана термопарами

1. Приемна камера. 2. Заряд АУС визначеної конфігурації. 3. Джерело запалювання. 4. Трубопровід. 5. Розподільник аерозолю. 6. Бульбашки

аерозолі. 7. Частинки аерозолі в зоні горіння. 8. Дифузійне полум'я спирту. 9. Теплоізолятор. 10. Джерело електричного струму. 11. Термопари. 12. Перетворювач РТ-01.

Після досягнутого стабільного горіння спирту, запальником підпалюють АУС, який утворює аерозоль, що подається на розподільник, розташований на дні посудини. Далі – аерозоль барботується через шар рідини та виходить на її поверхню, звідки потрапляє в зону горіння. З метою забезпечення відповідної швидкості горіння АУС, було виготовлено циліндр з АУС визначеного діаметру, що сприяло його відповідному часу горіння.

Для визначення впливу на вогнегасну ефективність розміру бульбашок було проведено експеримент з двома видами розподільників з діаметрами отворів 5 та 12 мм, які, відповідно, повинні відтворювати початкові бульбашки з розміром 5 та 12 мм. Під час підйому аерозолі на поверхню його бульбашки диспергуються (подрібнюються) та стають меншими за розмірами.

Насамперед було визначено швидкість зміни температури поверхні палаючого спирту при виході аерозолі за час горіння різних спиртів (пропанолу, етанолу, метанолу). Результати експерименту при виході бульбашок аерозолі через розподільник з діаметром отворів 5 мм відображені на графіку (рис 3.8).

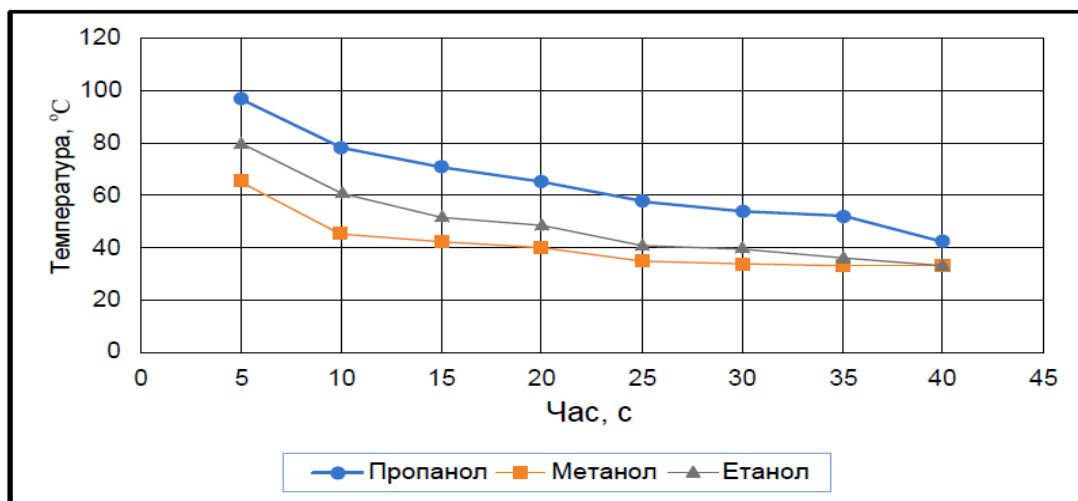


Рисунок 3.8 – Графік зміни температури поверхні спиртів при виході

аерозолію на поверхню через розподільник з отворами 5 мм.

Потім було проведено визначення параметрів при виході бульбашок аерозолію через розподільник з діаметром отворів 12 мм (рис 3.9).

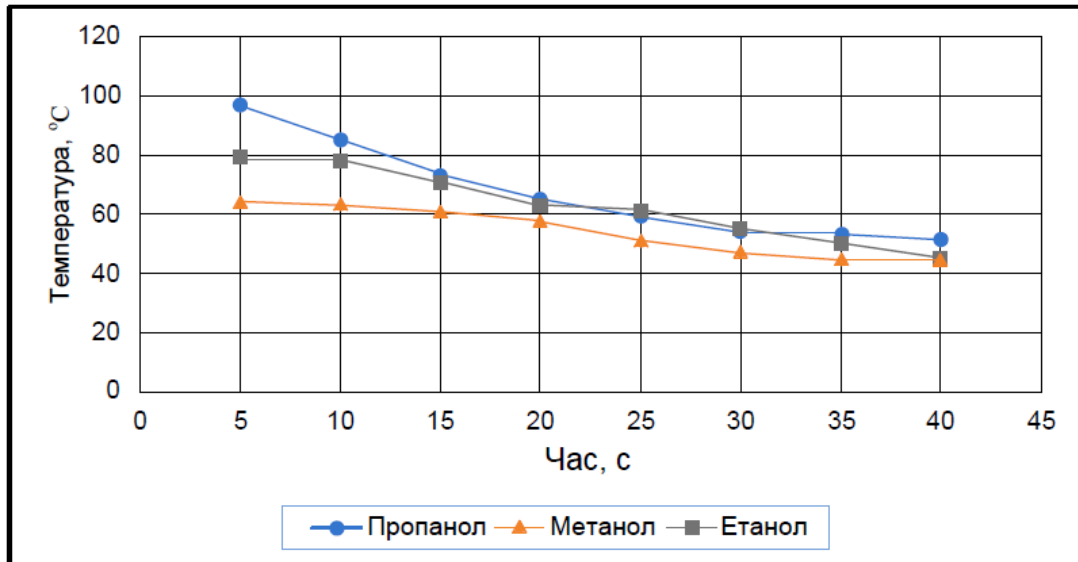


Рисунок 3.9 – Графік зміни температури поверхні спиртів при виході аерозолію на поверхню через розподільник з отворами 12 мм.

Як бачимо на графіку, при виході аерозолію на поверхню палаючого спирту, його температура різко зменшується в часовому діапазоні від 5 до 20 секунд.

Діапазон зменшення температури при цьому для кожного із спиртів менший від температури кипіння на 30-40 °C. Зменшення температури відбувається приблизно з однаковою швидкістю і сповільнюється до кінця виходу аерозолію. Збільшення діаметру отворів розподільника призвело до певного збільшення температури в діапазоні часу від 20 до 40 секунд.

Наступним параметром, який визначали, була зміна температури полум'я від часу подавання аерозолію в зону парів та газів до його виходу. Термопары встановлювались на висоті формування зони парів та газів і в зоні горіння. При виході аерозолію на поверхню покази термопары фіксувались

регулятором – вимірювачем РТ-01. Результати експерименту відображені на графіку (рис. 3.10).

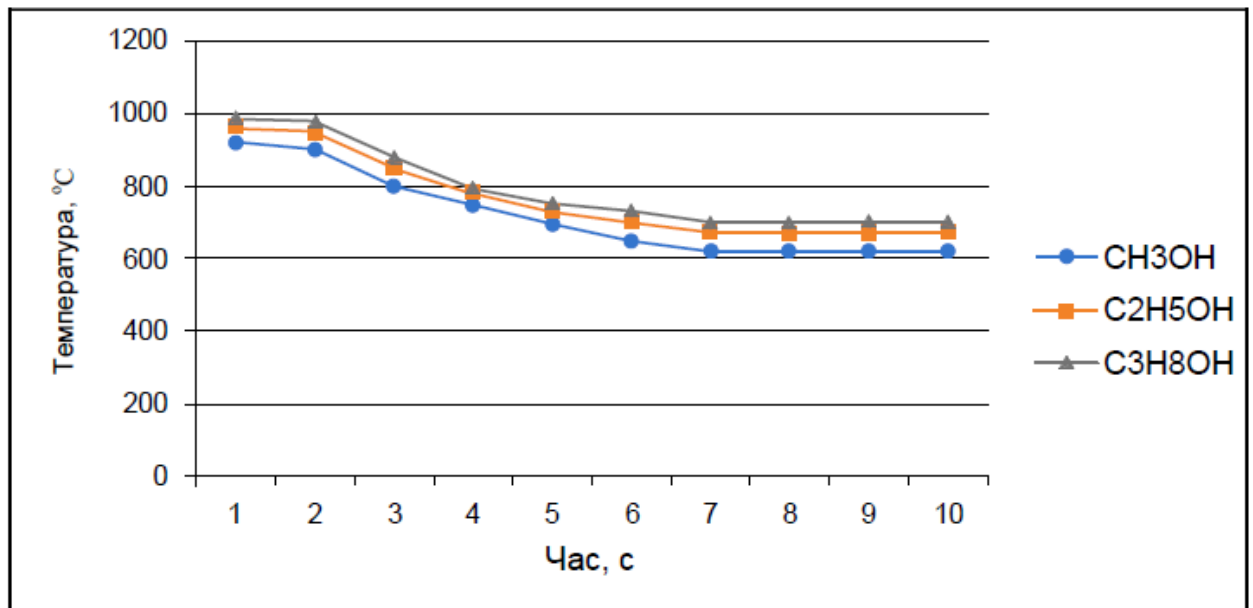


Рисунок – 3.10 – Зміна температури полум'я спиртів при підшаровій подачі аерозолу.

Як видно з графіка, при потраплянні аерозолу в полум'я температура останнього починає активно зменшуватись і через 60 секунд знижується до 560-720 °C. Полум'я при цьому набуває оранжевого забарвлення, що свідчить про те, що в зоні горіння відбувається термічна дисоціація неорганічних солей калію ( $K_2CO_3$ , KOH,  $KH_2CO_3$ ,  $NH_4HCO_3$ ), розміри його зменшуються через скорочення надходження парів спирту разом з аерозолем, який потрапляє в зону горіння та, відповідно, забезпечує її одночасне флегматизування, інгібування та охолодження, що збігається з висновками робіт [67, 68, 69], де розглядали подібні процеси на прикладі гептану.

Причому, після зростання інтенсивності подавання аерозолу відбувається спочатку збільшення яскравості полум'я, а потім зменшення його розмірів та затухання.

Далі – визначаємо температуру бортів резервуара, які при тривалому горінні спирту можуть нагріватись, подеколи, до значної температури – 180-

200 °C і вище. Це може стати причиною повторного займання при настанні моменту, коли гасіння відбулось, але борти залишились нагрітими до температури, вище самозаймання спиртів. Дослідження зазначеного параметру проводили, встановивши термомпари біля зрізу бортів резервуара. Результати відображені на рисунку 3.11.

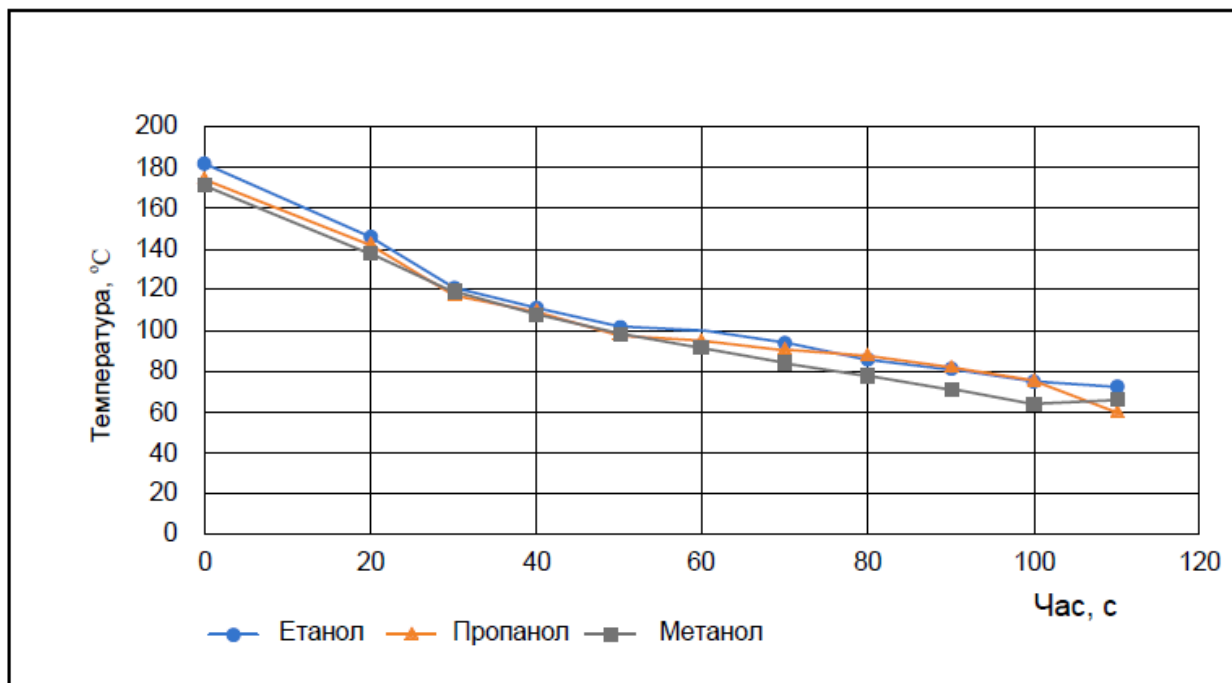


Рисунок 3.11 – Зміна температури бортів резервуара при підшаровому подаванні аерозолу для гасіння спиртів  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8\text{OH}$ .

Як бачимо, температура бортів резервуара знижується, після чого настає гасіння. Зниження температури в цьому випадку можна пояснити значною теплоємністю матеріалу стінок, на які потрапляє спирт та інтенсивно випаровується, знижуючи при цьому їхню температуру. Після 40 с відбувається гасіння і далі – значення температури вже повільніше знижуються.

Що стосується впливу розміру отворів на швидкість зміни температури, то необхідно зазначити, що при виході аерозолу з отворів розподільника відбувається його диспергування та зменшення розмірів його частинок. Таким чином, до поверхні доходить полідисперсна фаза з розмірами бульбашок в діаметрі близько 5 мм – 40%, 2 мм – 30%, менше 2 мм – 30%

(рис. 3.5 та 3.6). Зазначений розподіл забезпечує активне перемішування спирту, [70] його охолодження та подальше гасіння.

Таким чином, встановлено величини зменшення температури полум'я та його поведінку при потраплянні аерозолу в полум'я. Також визначено, що при цьому температура полум'я починає активно зменшуватись і до 40 секунд становить близько 600 °С. Також виявлено, що полум'я при цьому набуває оранжевого забарвлення, що свідчить про те, що в зоні горіння відбувається термічна дисоціація солей калію, розміри його зменшуються, що свідчить про зменшення надходження парів спирту в зону горіння. Крім цього визначено швидкість вистигання бортів резервуара при виході аерозолу з різних за величиною отворів і встановлено, що величина вистигання борта резервуара є дещо більшою при менших діаметрах отворів з рівномірніший розподілом аерозолу на поверхні. Діапазон зменшення температур рідини та бортів при цьому для кожного зі спиртів менший від температури кипіння на 30-40 градусів °С. Зменшення температури відбувається приблизно з однаковою швидкістю і сповільнюється до кінця виходу аерозолу.

Таким чином, проаналізувавши результати експерименту, можна сказати, що вперше визначено температурні характеристики підшарового аерозольного гасіння при різних розмірах бульбашок аерозолу та встановлено, що при менших розмірах бульбашок температура поверхневого шару рідини зменшується до 15%, розподіл аерозолу поверхнею рідини є більш рівномірним, а на поверхні утворюється гетерогенна система, яка містить одночасно як аерозольні тверді частинки ( $K_2CO_3$ ,  $KOH$ ,  $KHCO_3$ ,  $NH_4HCO_3$ , газу –  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ , пари спирту), так, власне, і сам спирт в рідкій фазі, що забезпечує різке зниження його температури завдяки розбавленню, випаровуванню та переміщуванню.

### **3.6. Експериментальне визначення інтенсивності теплового випромінювання під час підшарового гасінні пожеж в резервуарах з полярними горючими рідинами**

З метою визначення інтенсивності теплового випромінювання та його вплив на процес підшарового гасіння спиртів аерозолями було використано описану в роботі [60] установку для підшарового гасіння. В якості спиртів було обрано етанол, ізопропанол та н-бутанол, зважаючи на їх характеристики та спосіб горіння. Етанол горить майже прозорим блакитним полум'ям, ізопропанол та н-бутанол – червоним полум'ям без виділення кіптяви. Методика визначення інтенсивності теплового потоку від вогнища полягала в наступному.

Розроблена лабораторна установка (рис. 3.11) – це прямокутна посудина з нержавіючої сталі з такими розмірами: ширина – 153 мм, довжина – 153 мм та висота – 185 мм. На дні резервуара площею  $234 \text{ см}^2$  встановлено розподільник (пластина з отворами 5 та 12 мм) по всій її площі для рівномірного розподілення аерозолю всередині посудини.

Згідно із зазначеною методикою АУС поміщають в приймальну камеру та герметизують, потім – підпалюють спирт та дають 120 секунд на розгорання. Завчасно встановлюють та фіксують вимірювачі теплового потоку ВТП-01 на відстані 30 та 60 мм від факелу вогнища. Від моменту запалювання і до кінця процесу гасіння фіксують показники інтенсивності теплового потоку від вогнища двома ВТП-01. Після досягнутого стабільного горіння спирту (60 с), електричним запальником підпалюють АУС, який утворює аерозоль, що подається на розподільник, розташований на дні посудини. Далі – аерозоль проходить через шар рідини та виходить на її поверхню, звідки потрапляє в зону горіння. З метою забезпечення відповідної швидкості горіння АУС, виготовлялись циліндри з визначеним діаметром, що забезпечувало їх відповідну швидкість горіння.

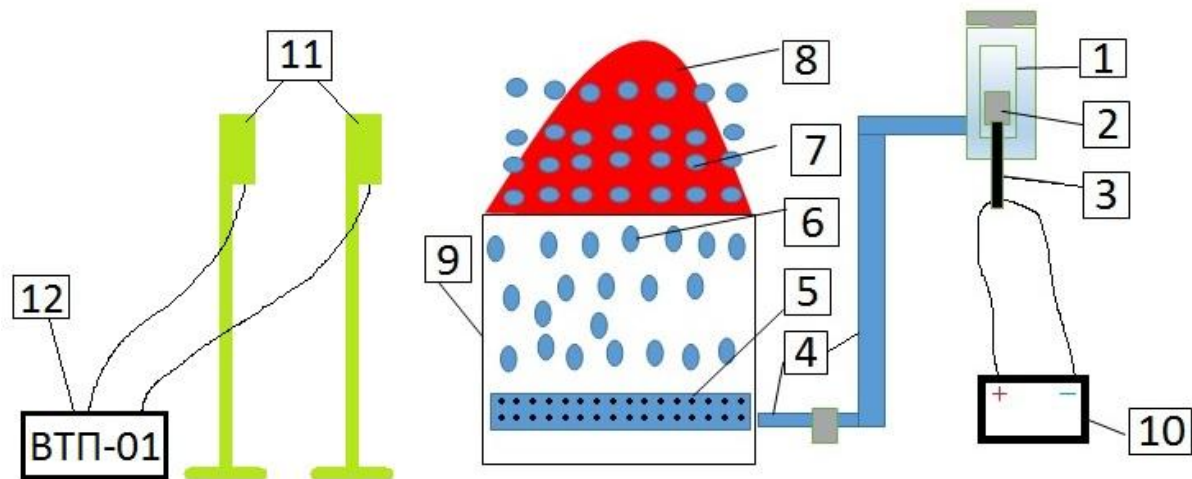


Рисунок 3.12 – Установка для визначення параметрів підшарового гасіння спиртів.

1. Прийомна камера. 2. Заряд АУС визначеної конфігурації. 3. Джерело запалювання. 4. Трубопровід. 5. Розподільник аерозолі. 6. Бульбашки аерозолі. 7. Частинки аерозолі в зоні горіння. 8. Дифузійне полум'я спирту. 9. Теплоізолятор. 10. Джерело електричного струму. 11. Вимірювач теплового потоку ВТП – 01 на відстані 30 мм та на відстані 60 мм.
12. Приймач сигналів від ВТП – 01.

Для визначення можливості подачі аерозолі підшарово було експериментально визначено інтенсивність теплового випромінювання від полум'я при горінні різних спиртів (етанол, ізопропанол, н-бутанол) на відстані 30 та 60 мм. Залежність інтенсивності теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я показано на рис. 3.13.

На кожне експериментальне значення показаної точки проводили по 2 досліди та визначали середньоарифметичне значення показників інтенсивностей випромінювання.

Результати досліджень інтенсивності теплового випромінювання при горінні та підшаровому гасінні спиртів, в умовах лабораторної установки (рис. 3.12), на відстані 30 мм та на відстані 60 мм показано на рис. 3.13 – 3.15.



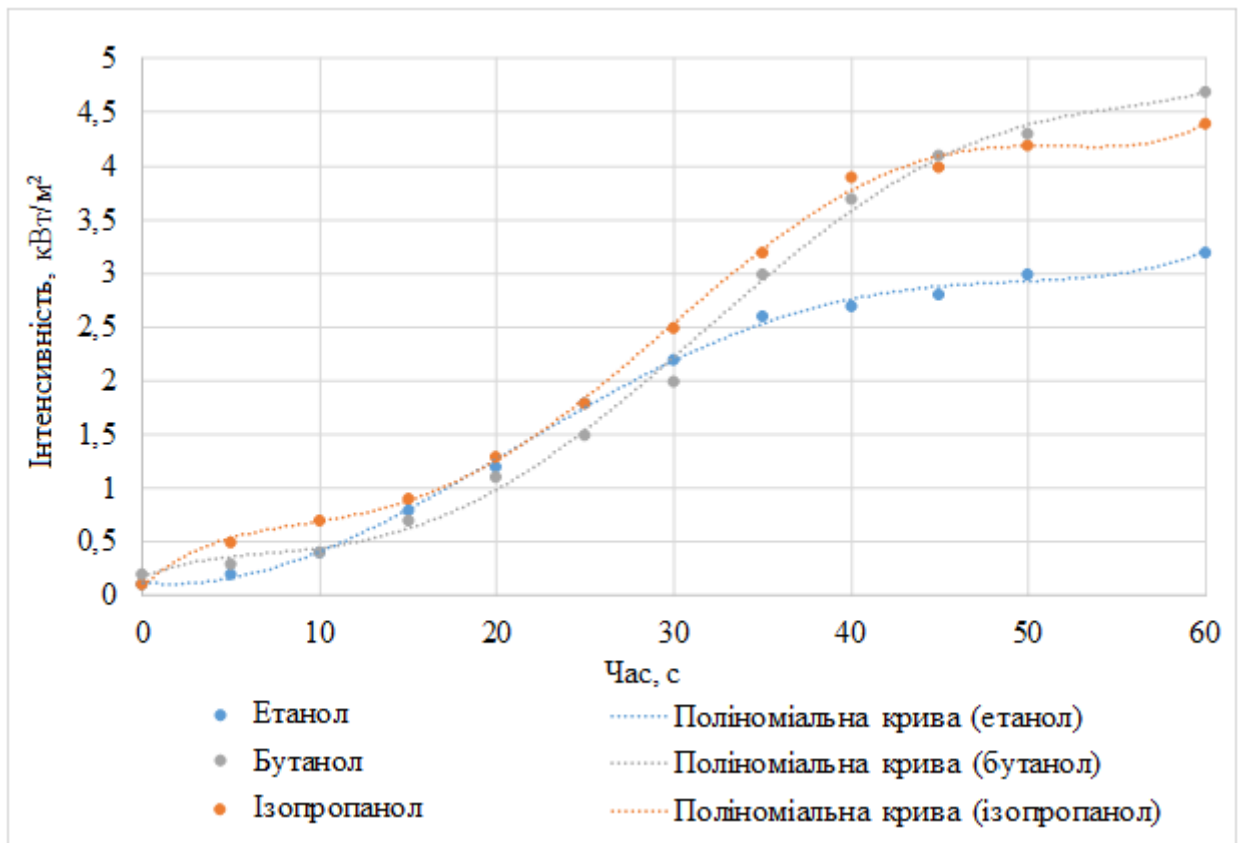


Рисунок 3.13 – Інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я.

Зважаючи, що проведення експерименту з визначення інтенсивності теплового випромінювання горіння спиртів при підшаровому подаванні аерозолі здійснювалось в лабораторних умовах, то для підтвердження достовірності результатів експерименту, дані показані на рис. 3.13 та рис. 3.14, було проаналізовано та подано у вигляді рівнянь регресії.

Дані значень графіку, поданих на рис. 3.13, показано у вигляді поліноміальних рівнянь регресії (3.2) – (3.4).

Для етанолу:

$$y=2e-08x^5-1e-06x^4-5e-05x^3+0,005x^2-0,015x+0,1164,$$

$$R^2=0,998. \quad (3.2)$$

Для ізопропанолу:

$$y=1e-07x^5-2e-05x^4+0,0009x^3-0,0166x^2+0,152x+0,0869,$$

$$R^2=0,9989. \quad (3.3)$$

Для н-бутанолу:

$$y=7e-08x^5-1e-05x^4+0,0006x-0,0089x^2+0,0696x+0,1693,$$

$$R^2=0,9968. \quad (3.4)$$

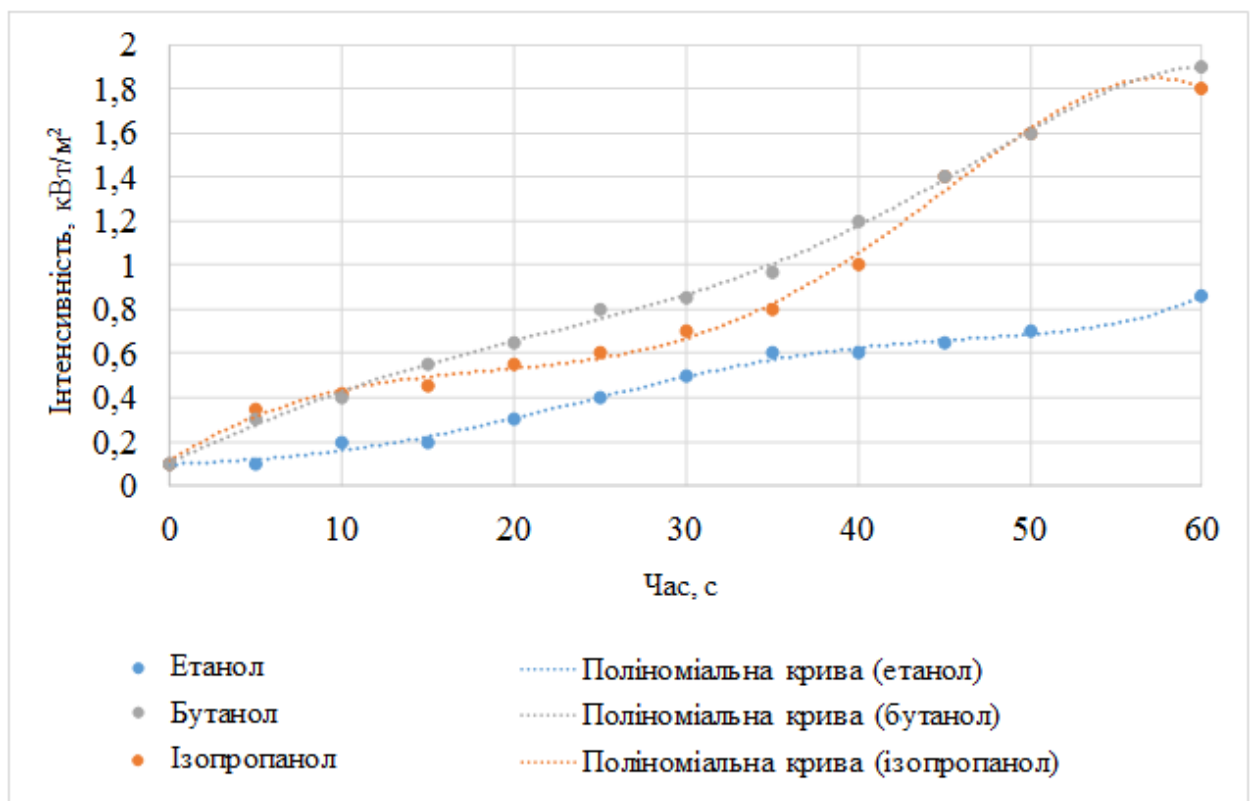


Рисунок 3.14 – Інтенсивність теплового випромінювання на відстані 60 мм від поверхні спиртового полум'я.

Далі – було отримано поліноміальні рівняння регресії (3.5)–(3.7) для кривих показаних на рис. 3.14.

Для етанолу:

$$y=1e-08x^5-1e-06x^4+4e-05x^3-9e-05x^2+0,0043x+0,0967,$$

$$R^2=0,9937. \quad (3.5)$$

Для ізопропану:

$$y=-2e-08x^5+2e-06x^4-8e-06x^3-0,0017x^2+0,0486x+0,1127,$$

$$R^2=0,9956. \quad (3.6)$$

Для н-бутанолу:

$$y=-1e-08x^5+2e-06x^4-5e-05x^3+,0002x^2+0,0339x+0,1067,$$

$$R^2=0,9983. \quad (3.7)$$

Було проведено експериментальне визначення параметрів зміни інтенсивності випромінювання при горінні спиртів при підшаровому подаванні аерозолі.

### **3.7. Експериментальне визначення параметрів зміни інтенсивності випромінювання при горінні спиртів під час підшарового подавання вогнегасного аерозолі**

Залежність інтенсивності теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я при подаванні підшарово вогнегасного аерозолі наведено на рисунку 3.15.

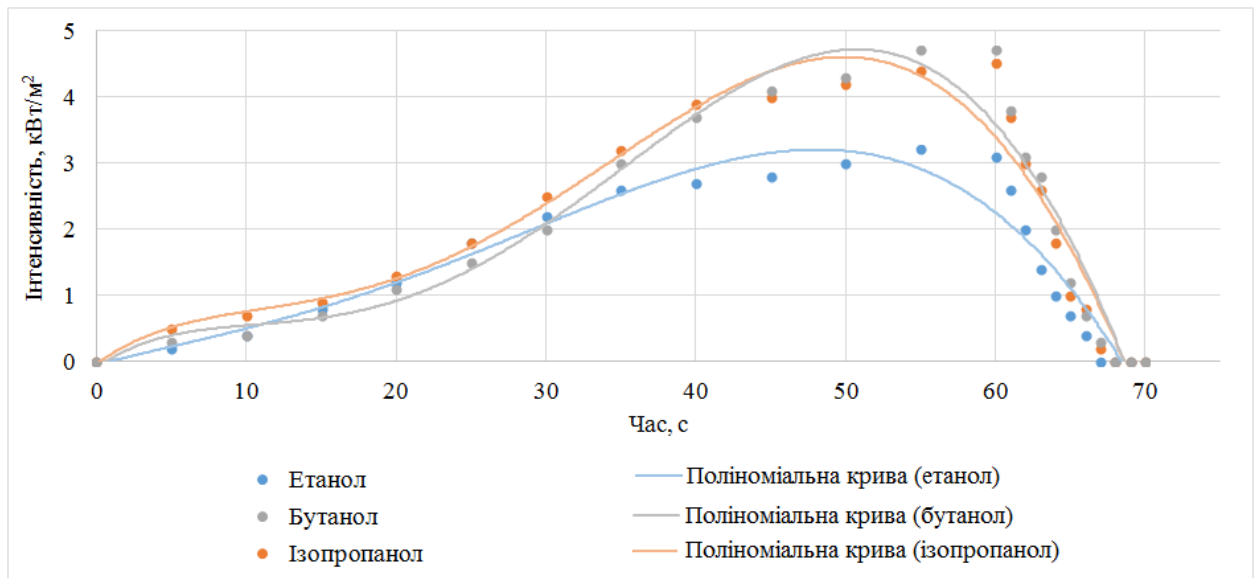


Рисунок 3.15 – Інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я при підшаровому гасінні вогнегасним аерозолем.

Результати обробки значень графіку показаних на рисунку 3.15, подано у поліноміальних рівняннях (3.8)–(3.10).

Для етанолу:

$$y=7e-09x^5-2e-06x^4+0,0001x^3-0,0014x^2+0,0595x-0,0476,$$

$$R^2=0,9153. \quad (3.8)$$

Для ізопропану:

$$y=4e-08x^5-9e-06x^4+0,0006x^3-0,0138x^2+0,1657x-0,0344,$$

$$R^2=0,9317. \quad (3.9)$$

Для н-бутанолу:

$$y=4e-08x^5-1e-05x^4+0,0007x^3-0,0151x^2+0,1569x-0,0862,$$

$$R^2=0,9351. \quad (3.10)$$

Далі – було визначено залежність інтенсивності випромінювання при горінні спиртів від інтенсивності подавання вогнегасного аерозолю, яку показано на рис. 3.16.

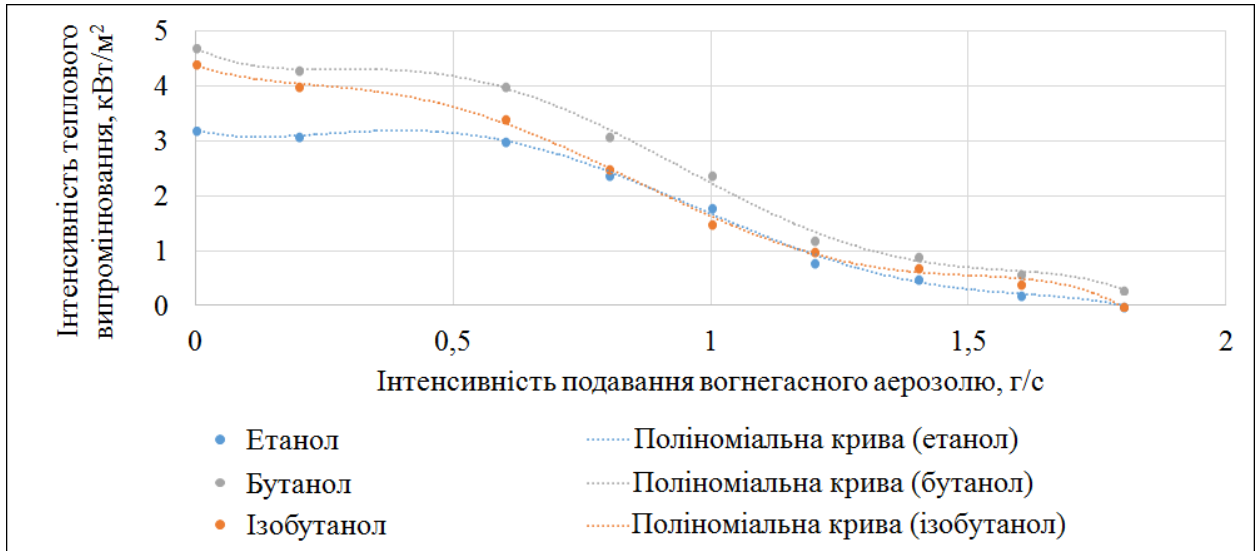


Рисунок 3.16. Інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я при подаванні підшарово вогнегасного аерозолю.

Математична обробка значень інтенсивності теплового випромінювання на відстані 30 мм від поверхні спиртового полум'я при подаванні підшарово вогнегасного аерозолю (рис. 3.16) показала наступні результати, які подані в поліноміальних рівняннях (3.11)–(3.13).

Для етанолу:

$$y = -3,6401x^5 + 17,231x^4 - 26,951x^3 + 14,285x^2 - 2,4532x + 3,2023,$$

$$R^2 = 0,9971. \quad (3.11).$$

Для ізобутанолу:

$$y = -4,6172x^5 + 19,929x^4 - 28,084x^3 + 13,468x^2 - 3,455x + 4,3862,$$

$$R^2 = 0,9979. \quad (3.12)$$

Для н-бутанолу:

$$y = -5,2003x^5 + 24,197x^4 - 37,659x^3 + 21,057x^2 - 4,8597x + 4,6988,$$

$$R^2 = 0,9969. \quad (3.13)$$

Як бачимо, значення  $R^2$  на графіках (рис. 3.13–3.16) досить близьке до одиниці, що пояснює високу відтворюваність даних в отриманих рівняннях.

Отримання вищевказаних даних дозволить прогнозувати поведінку та ефективність підшарового гасіння вогнегасним аерозолем при різних значеннях інтенсивності його подавання.

### **3.8. Обґрунтування чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання у разі підшарового гасіння спиртів вогнегасними аерозолями та їх взаємозв'язок**

За результатами отриманих рівнянь (3.2) – (3.13) було вибудовано логічну схему синергічних взаємозв'язків чинників аерозольного підшарового гасіння спиртів, які забезпечують блокування та зменшення теплового потоку на всіх етапах гасіння спиртів (рис. 3.17).

З практичної точки зору введення аерозолу в зону дифузійного горіння забезпечує його ефективне подавлення за рахунок зниження інтенсивності та екранування теплового випромінювання, як основного чинника хімічної реакції горіння. Також аерозоль ефективно зменшує інтенсивність теплового потоку ззовні від полум'я, що забезпечує охолодження оточуючих горючих матеріалів та попередження їх займання, що дозволяє визначати умови ефективного застосування в технології підшарового пожежогасіння спиртів.

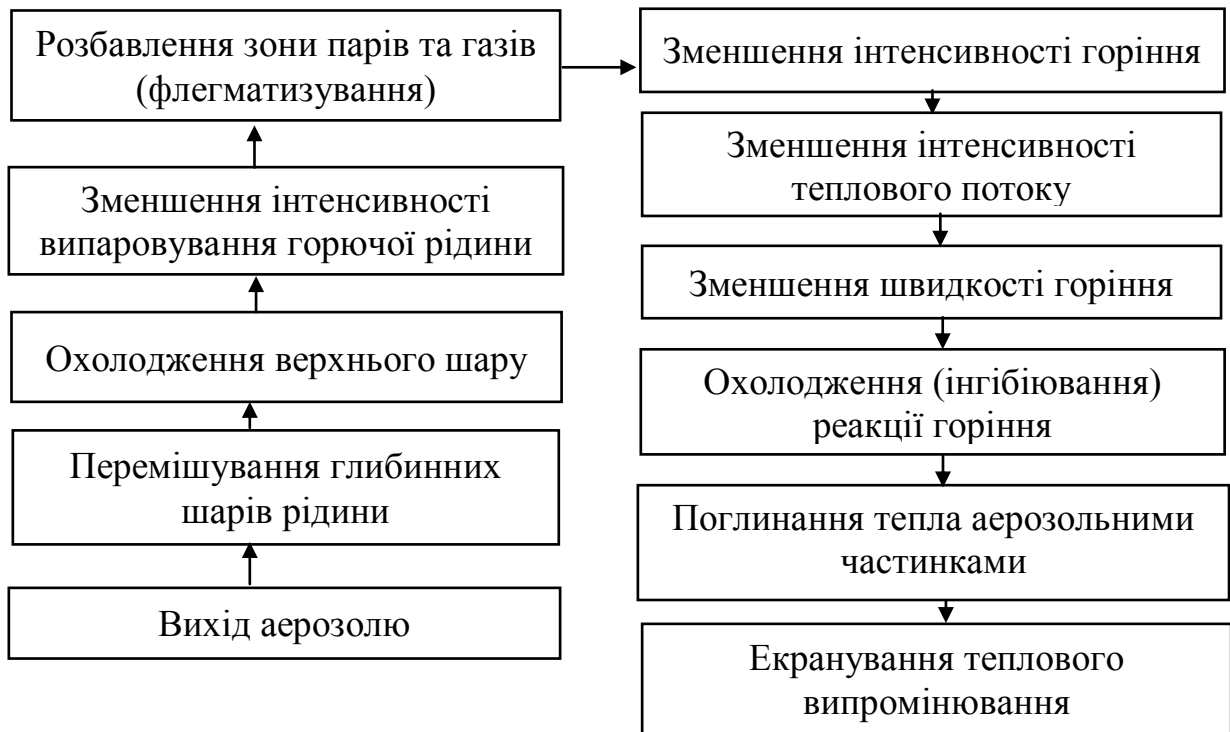


Рисунок 3.17 – Чинники, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання, при підшаровому гасінні спиртів вогнегасними аерозолями.

Таким чином, на блок–схемі (рис. 3.17) показано взаємозв’язок чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів вогнегасними аерозолями.

### 3.8.1. Обговорення результатів досліджень інтенсивності теплового випромінювання під час підшарового гасіння спиртів

Відомо, що яскравість полум’я визначається кількістю кисню в складі молекули спирту. Так, молярні маси спиртів становлять  $M(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})=46$  г/моль,  $M(\text{C}_3\text{H}_7\text{OH})=60$  г/моль,  $M(\text{C}_4\text{H}_9\text{OH})=74$  г/моль. При цьому в складі молекули етанолу міститься приблизно 35 % атомів  $\text{O}_2$ , в ізопропанолі – 26 %, та в н-бутанолі – 21 %. Високий вміст кисню в етанолі забезпечує його горіння майже без виділення світла та, відповідно,

тепловий потік буде мати невеликі значення, що спостерігається на рис. 3.13, 3.14.

Горіння етанолу забезпечує утворення слабшого теплового потоку, на відміну від ізопропанолу та н-бутанолу, які горять полум'ям з більш інтенсивним випромінюванням. Червоне забарвлення полум'я спиртів надається за рахунок надлишку карбону, частинки якого повністю не згорають та випромінюють теплову енергію в діапазоні жовтого кольору. Це забезпечує випромінювання теплової енергії подеколи більш інтенсивно, ніж при горінні деякого вуглеводневого пального. Пояснюється це тим, що в даному випадку не утворюється сажа та дим, які теж активно розсіюють теплове випромінювання. Відповідно до сказаного вище на графіках (рис. 3.13, 3.14) криві теплового випромінювання для ізопропанолу та н-бутанолу лежать вище за криву випромінювання етанолу.

При гасінні вогнищ зазначених спиртів аерозолем відбувалось різке зниження інтенсивності теплового випромінювання через поглинання тепла частинками вогнегасного аерозолу та, відповідно, їх нагрівання, інгібування, охолодження, далі – розклад і винесення разом з продуктами горіння із зони горіння.

Цей процес призводить до різкого зменшення інтенсивності теплового випромінювання за дуже короткий час по всьому об'єму та площі горіння. Цього не спостерігається при гасінні піною, де для досягнення ефекту гасіння потрібне проведення так званої «пінної атаки», метою якої є забезпечення відповідної інтенсивності подавання піни для запобігання її руйнування.

Як видно з рис. 3.13, 3.14, значної інтенсивності теплового випромінювання, а відповідно, і горіння, спирти набувають на 30–40 секундах та сягають максимуму на 60 секунд. Це збігається з висновками авторів роботи [71], де вказано, що горіння вуглеводневого пального є максимальних розмірів в перші 60 секунд. При цьому за недостатньої інтенсивності подавання аерозолу гасіння не досягається, але інтенсивність випромінювання значно знижується.



Для визначення параметрів, які обґрунтовують інтенсивність теплового випромінювання при горінні спиртів, було проаналізовано деякі аспекти випромінювання від пожеж в розливі, які описано в роботі [72]. З цього можна зробити висновок, що ефект гасіння горючої рідини досягається в результаті декількох етапів та синергічної взаємодії деяких чинників. Першим етапом є охолодження поверхні рідини при барботуванні аерозолу через шар рідини. Далі – йде охолодження та флегматизування зони парів і газів горіння інертними компонентами аерозолу ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , твердими частинками аерозолу:  $\text{KCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{CO}_3$  та ін.). Наступним етапом є інгібування реакції горіння зазначеними компонентами, що призводить до зменшення виділення тепла та охолодження зони горіння. Зменшення інтенсивності горіння спричиняє також і розбавлення зони горіння парами спирту та газодисперсними продуктами, які утворюються при термічному розкладі частинок аерозолу. Це підтверджується результатами експерименту, які показані на графіку (рис. 3.15), з якого видно, що інтенсивність теплового потоку різко зменшується після подавання вогнегасного аерозолу підшарово. Інтенсивність випромінювання від зони горіння значно зменшується на відстані і вже при 60 мм від полум'я ці значення зменшуються вдвічі. Але, як видно з графіків, значення інтенсивності теплового випромінювання є вищими для спиртів, які містять у своїй молекулі більше атомів карбону. Збільшення кількості карбону в складі молекули спирту забезпечує перетворення хімічної енергії на теплову та її випромінювання, через те, що він не повністю згорає. Обмеження теплового потоку до поверхні горючої рідини призведе до зменшення температур у всіх зонах дифузійного полум'я та, відповідно, до різкого зменшення швидкості реакції горіння і теплового випромінювання. Отримані результати з підшарової подачі вогнегасного аерозолу вказують на синергічний ефект всіма чинниками, які виникають при потраплянні аерозолу в зону парів і газів дифузійного полум'я. Це призводить до екранування теплового потоку та зменшення температури поверхні спирту і, відповідно, зменшення

інтенсивності випаровування спирту та кількості парів спирту, які будуть потрапляти в зону горіння для згорання.

Навіть при незначних інтенсивностях подавання аерозолу в полум'я спиртів відбувається його теплова взаємодія з виділенням та поглинанням теплової енергії. Як видно з графіку (рис. 3.16), інтенсивність випромінювання від поверхні полум'я на відстані 30 мм, при подаванні вогнегасного аерозолу підшарово з витратою близько 0,2 г/с, починає знижуватись, особливо для етанолу. Пояснити це можна тим, що аерозоль як полідисперсна система, більшість частинок якої має розміри 0,05–1 мкм [72, 73, 74], здатна ефективно інгібувати полум'я вже при незначних добавках. У цьому випадку це відбувається за рахунок інгібування твердими частинками аерозолу ( $K_2O$ ,  $KOH$ ,  $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$  та іншими сполуками калію), що збігається з висновками авторів роботи [73], які вказують, що добавка 0,1 %  $KHCO_3$  призводить до зниження швидкості горіння в 2 рази. Зважаючи на те, що вказані речовини є основними компонентами вогнегасного аерозолу, це ще раз підкреслює їх екологічну прийнятність. Це ж стверджують автори роботи [75,76], які вказують на синергізм між хімічними та фізичними компонентами аерозолу. Це забезпечує значне зниження швидкості горіння, що підтверджується подальшим збільшенням інтенсивності подавання аерозолу, яке призводить до більш значного зниження інтенсивності теплового потоку. Зниження інтенсивності горіння відбувається при значеннях інтенсивності подавання аерозолу від 1,2 г/с. При зазначеній інтенсивності подавання аерозолу для етанолу відбувається його гасіння в діапазоні 30–50 секунд від початку дії аерозолу.

Необхідно зазначити, що даним дослідженням властиві обмеження для великих вогнищ, де значення інтенсивності випромінювання можуть бути більшими, та з іншими показниками інтенсивності. Але, відповідно до отриманих залежностей можна зазначити, що загалом кількість, взаємозв'язок чинників та їх дія будуть однаковими як для малих, так і для великих вогнищ. Таким чином, можна апроксимувати результати щодо

отриманих математичних залежностей та отримати значення інтенсивності випромінювання для великих вогнищ.

Отже, отримані результати показують значне зменшення інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому подаванні аерозолі. Це пояснюється кінцевим синергічним ефектом ланцюга взаємопов'язаних чинників, які виникають при підшаровому гасінні аерозолем. Прикладним аспектом використання отриманого наукового результату є можливість створення технології підшарового гасіння спиртів як більш ефективної та низько вартісної, яку можна впровадити на вітчизняних підприємствах.

У процесі розвитку зазначеної технології використання вогнегасного аерозолі можна зіткнутись із проблемою його подавання з більш глибоких шарів горючої рідини. Ця проблема потребує подальшого дослідження через математичне моделювання та експериментальне підтвердження отриманих результатів.

Загалом, розвиток зазначеної технології є передумовою для визначення нових та ефективних умов підшарового гасіння спиртів.

### **3.9. Висновки**

1. Результати проведених досліджень засвідчили, що підшарове аерозольне гасіння є засобом пожежогасіння, який володіє високою вогнегасною ефективністю. При підшаровій подачі аерозолі для гасіння спиртів забезпечується одночасно як об'ємне гасіння, так і флегматизування горючої пароповітряної суміші, яка утворюється в результаті випаровування спирту над поверхнею рідини.

2. Встановлено інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 та 60 мм від поверхні спиртового полум'я площею 234 см<sup>2</sup>. Визначено, що значення інтенсивності теплового випромінювання для вказаних спиртів становить від 0,8 до 4,7 кВт/м<sup>2</sup>, а інтенсивність випромінювання максимально збільшується від 30 до 40 секунд горіння, що пояснюється

нагріванням поверхні спирту і збільшенням інтенсивності його випаровування.

3. Експериментально встановлено, що інтенсивність теплового випромінювання для етанолу спочатку незначно зменшується при добавлянні аерозолу з інтенсивністю до 0,2 г/с, та значно зменшується при інтенсивностях подавання аерозолу від 1,2 г/с. При збільшенні інтенсивності подавання аерозолу інтенсивність випромінювання починає зменшуватись, ймовірно, за рахунок зменшення швидкості горіння в зоні горіння. При цьому полум'я спочатку зменшується в розмірах до 2 разів, а потім – до 3 секунд гасне.

З результатів роботи зроблено висновок, що основним фактором, який впливає на лінійну швидкість вигорання спирту, є інтенсивність випромінювання, що забезпечує нагрівання поверхні рідини та стінок резервуара. Використання вогнегасного аерозолу для підшарового гасіння спиртів забезпечує реалізацію декількох чинників, які синергічно взаємодіють та забезпечують почергове зменшення інтенсивності випаровування, далі – горіння та, відповідно, теплового випромінювання.

4. Теоретично обґрунтовано та показано взаємозв'язки чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів вогнегасними аерозолями. Встановлено, що підшарове подавання вогнегасного аерозолу реалізовує ряд чинників, які синергічно забезпечують зниження інтенсивності теплового випромінювання за рахунок охолодження спирту, флегматизування зони парів і газів, інгібування зони реакції горіння та розсіювання тепла разом з нагрітим аерозолем. Крім цього винесення аерозолу разом з продуктами горіння із зони реакції горіння забезпечує екранування навколишнього простору від теплового випромінювання полум'я.

## РОЗДІЛ 4

### ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

#### 4.1. Особливості проектування системи аерозольного підшарового гасіння

Систему аерозольного підшарового гасіння (далі – АПГ) слід проектувати відповідно до конструкції самого резервуара, та рідини, що в ньому зберігається. Також до уваги слід брати ступінь заповнення резервуара горючими речовинами.

Необхідно зауважити, що впровадження АПГ на об'єктах по зберіганню спиртів потребує комплексного наукового розроблення, практичних випробувань та розроблення нормативних документів. Тільки за умови індивідуальних технічних рішень і проектів, що можуть бути погоджені із Департаментом запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС України й підтверджуються результатами випробувань, методики проведення яких розробляються фахівцями, можливе ефективне використання АПГ.

Конструктивні рішення та виконання обладнання, в тому числі ГВА, повинні відповідати вибухонебезпечним класам зон відповідно до ПУЕ та вимогам НПАОП 40.1-1.32-01. Тобто, бути вибухозахищеними. Корпуси системи пожежогасіння повинні бути заземлені для унеможливлення самовільного спрацювання системи при виникненні статичного струму [77, 78].

Відповідно до результатів роботи [79] системи підшарового аерозольного пожежогасіння варто розміщувати поза резервуаром, адже таким чином забезпечується висока ймовірність того, що система гасіння не буде пошкоджена в результаті вибуху. Для підшарової подачі генератор вогнегасного аерозолю необхідно використовувати разом з камерою згорання аерозольутворюючої суміші, з'єднаної з резервуаром за допомогою трубопроводу зі зворотнім і запірним клапанами. Таким чином охолодження нагрітого аерозолю буде здійснюватися внаслідок барботування аерозолю

через шар горючої рідини. У такий спосіб можна ефективно гасити полум'я як у закритих, так і у відкритих резервуарах з легкозаймистими і горючими рідинами.

Введення трубопроводу в резервуар необхідно розташовувати в його нижній частині, та з'єднувати з кільцем розподілення аерозолі, що представляє собою трубопровід з різним діаметром відповідно до об'єму резервуара.

Важливим елементом механізму припинення пожежі на поверхні горючої рідини є зниження інтенсивності горіння внаслідок перемішування шарів рідини. Адже, як було обґрунтовано в попередніх розділах, барботуючи крізь товщу рідини, вогнегасний аерозоль перемішує верхні нагріті шари з нижніми холодними, тим самим забезпечуючи зниження температури верхнього шару пального. Це є досить важливим фактором, тому проектуючи систему аерозольного підшарового гасіння слід відповідним чином розміщувати випускні отвори для виходу вогнегасного аерозолі, щоб досягнути інтенсивної циркуляції рідини в резервуарі.

Введення вогнегасного аерозолі підшарово у резервуарах з низьким рівнем заповнення є також ефективним, адже аерозоль буде заповнювати повністю основу зони парів та газів і забезпечуватиме флегматизування внутрішнього об'єму резервуара зі спиртом.

#### **4.2. Розробка системи підшарової подачі аерозолі**

У попередніх розділах в результаті проведених теоретичних напрацювань та експериментальних досліджень було обґрунтовано та експериментально підтверджено високу вогнегасну ефективність запропонованого способу аерозольного підшарового гасіння, який крім цього володіє високими експлуатаційними, технологічними, екологічними характеристиками та має невисоку вартість.

Установка підшарового аерозольного гасіння складається з генератора вогнегасного аерозолю, що представляє собою корпус, виготовлений з листа металу товщиною 2 мм (рис. 4.1).

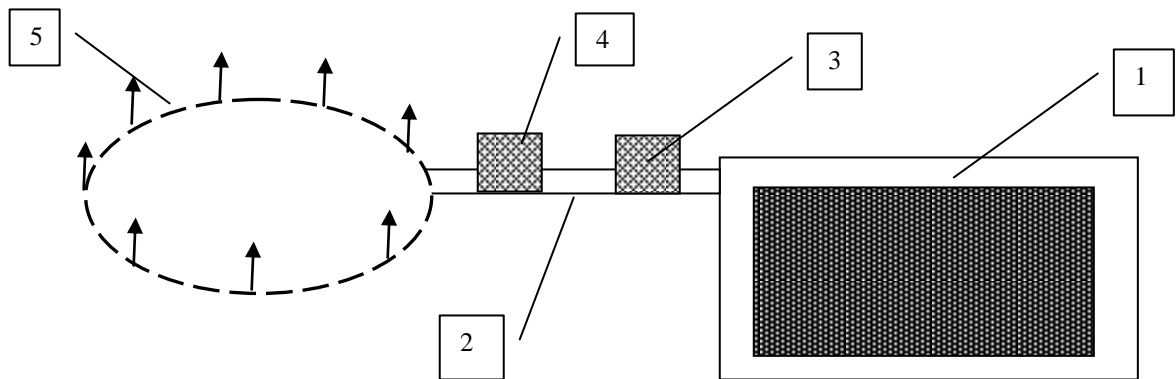


Рисунок 4.1 – Структурна схема установки для підшарового гасіння спиртів.

1. Генератор вогнегасного аерозолю.
2. Трубопровід.
3. Запірний пристрій.
4. Зворотній клапан.
5. Кільце розподільник.

Запропонована конструкція такої системи підшарового гасіння забезпечує утворення вискоєфективного вогнегасного аерозолю, без застосування охолоджуючих пристроїв, та виключає можливість перетворення форсу нагрітого аерозолю на джерело запалювання. Основною перевагою описаної системи підшарового аерозольного гасіння є можливість її встановлення за межами резервуара та кільця – розподільника на дні резервуара, що забезпечує значно вищий захист системи від дії вибуху. Принцип роботи системи полягає в тому що, генератор в результаті згоряння в ньому АУС забезпечує утворення вогнегасного аерозолю, що призводить до підвищення тиску всередині генератора та виштовхування аерозолю через трубопровід у розподільник та подальший вихід аерозолю через шар рідини на поверхню. Зрозуміло, що при великих діаметрах резервуарів буде відбуватись нерівномірний розподіл аерозолю розподільником та його нерівномірний вихід внаслідок дії тиску рідини. Враховуючи це, необхідно

передбачати два та більше вводів для подавання аерозолю в резервуар з нижньої його частини.

Таким чином, розглянувши особливості проектування системи аерозольного підшарового гасіння, були розроблені рекомендації щодо вибору форми заряду, яка забезпечує оптимальну тривалість роботи ГВА при заданому значенні масової витрати для генераторів з різною масою заряду АУС.

Відповідно до аналізу методик та результатів експериментів, згаданих у розділі 3, було зроблено висновок, що в генераторах з масою заряду до 0,5 кг доцільно використовувати циліндричний заряд, що горить з бічної сторони. Сфера застосування таких генераторів – захист резервуарів до 5 м<sup>3</sup>. Для захисту об'ємів 5 м<sup>3</sup>, за умови створення відповідної інтенсивності подавання аерозолю до 50 г/с, маса заряду АУС в генераторі повинна становити 2,5 кг. При цьому, за 1 секунду утворюється та викидається в об'єм резервуара відповідно 50 г х 5 л = 250 л вогнегасного аерозолю, що забезпечує ефективне гасіння та флегматизування на поверхні спирту.

Для прикладу розглянемо експериментальну установку в полігонних умовах із шаром спирту в 10 см, необхідний захищений об'єм якої становитиме 26 л. Тож при згорянні від 20 до 50 грам АУС за 1 секунду на поверхню вийде від 100 до 250 літрів вогнегасного аерозолю, що в 5-10 разів перевищує мінімальний необхідний об'єм для забезпечення вогнегасної концентрації.

Згідно з результатами попередньо проведених експериментальних досліджень було виявлено залежність, яку показано на графіку (рис 4.2). При цьому розрахунок АУС проводився за умови його трьохкратного запасу.



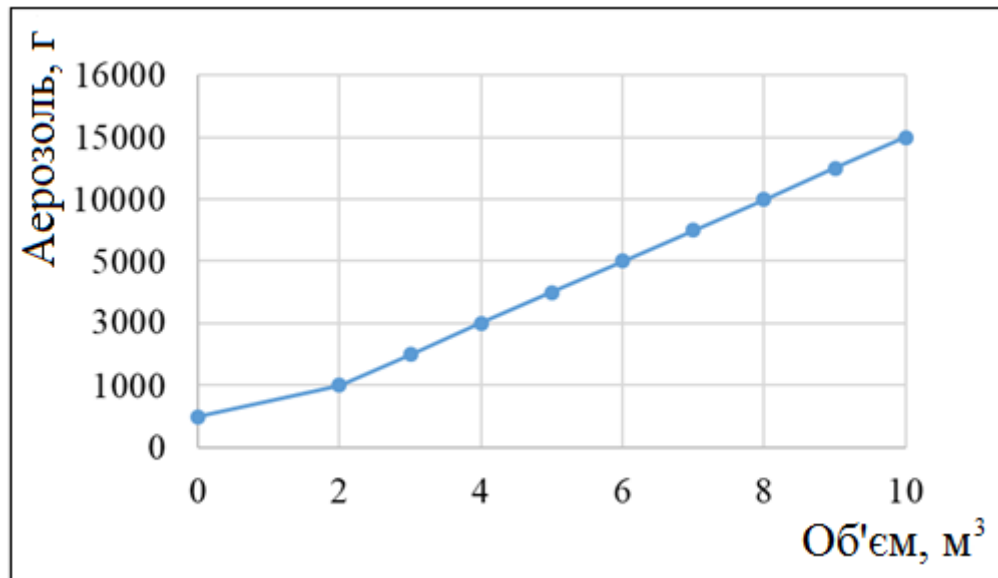


Рисунок 4.2 Залежність маси АУС в генераторі від об'єму резервуара.

Виготовлення дослідного зразка системи підшарового аерозольного гасіння здійснювалось на основі результатів теоретичних обґрунтувань та експериментів.

Для забезпечення спрацювання системи підшарового аерозольного пожежогасіння використовувався електрозапальник.

Згенерований аерозоль характеризується: екологічністю (ГДК продуктів згорання не менше  $1000 \text{ мг/м}^3$ ), низькою температурою на виході з генератора ( $80\text{-}200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і високою вогнегасною здатністю ( $10\text{-}45 \text{ г/м}^3$ ) до всіх основних класів пожеж, в тому числі горючих газів [64].

Спрацювання системи відбувається після подачі електричного імпульсу у разі виникнення горіння в резервуарі, спершу – на електрозапальник, а далі – передається на заряд АУС. Час роботи генератора вогнегасного аерозолу становить 30-35 с. При запуску ГВА всередині корпусу наростає тиск і через 12-17 с відбувається викид вогнегасного аерозолу в зону горіння над поверхнею спирту. Таким чином, вихід вогнегасного аерозолу здійснюється конусоподібно біля стінок резервуара, що показано на рис. 4.3.

Такий спосіб виходу вогнегасного аерозолу на поверхню призведе до

знищення біля бортів резервуара так званого кільця запалювання та, відповідно, проникнення аерозолю разом з повітрям в зону горіння та її гасіння. Схематично вихід аерозолю та розподіл вогнегасного аерозолю на поверхні спирту показано на рисунку 4.4.

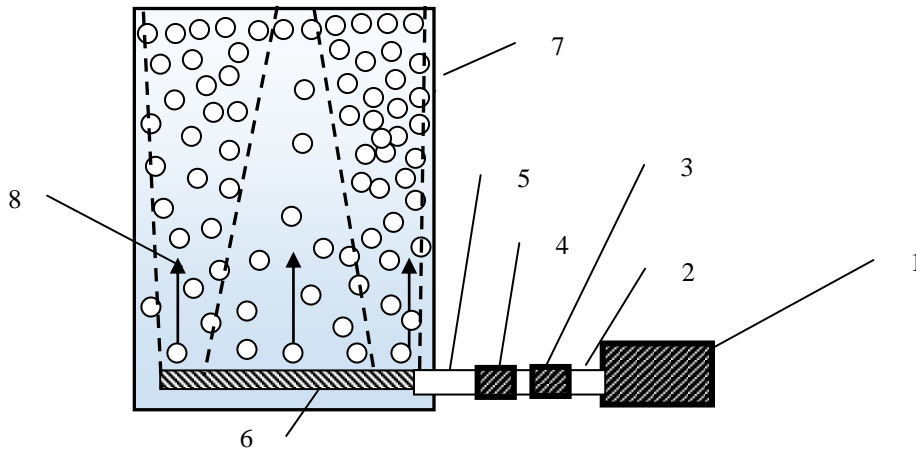


Рисунок 4.3 – Установка подачі вогнегасного аерозолю.

1. Генератор вогнегасного аерозолю.
2. Трубопровід.
3. Запірний пристрій.
4. Зворотній клапан.
5. Трубопровід.
6. Кільце розподільник.
7. Резервуар.

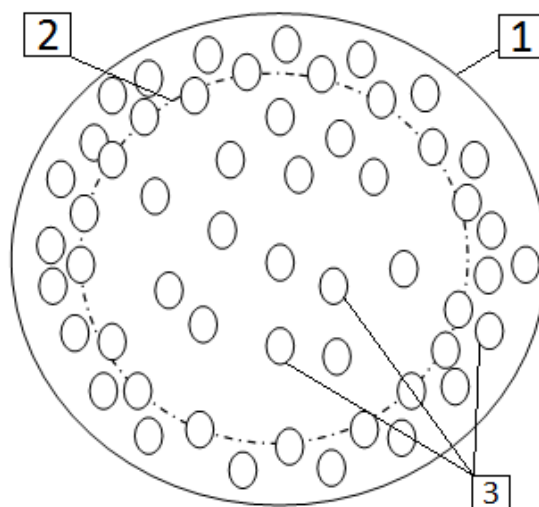


Рисунок 4.4 – Розподіл вогнегасного аерозолю при виході його з кільцевого розподільника.

1. Стінка резервуара.
2. Розташування кільця розподільника.
3. Бульбашки аерозолю.

Як бачимо з рисунку 4.4 більша кількість аерозолу буде виходити біля стінок резервуара, що призведе до його додаткового охолодження.

#### **4.3. Техніко-економічні дослідження ефективності установки підшарового аерозольного гасіння**

Проблема боротьби з пожежами в розвинутих індустріальних країнах стає все більш актуальною. Щорічні матеріальні витрати та кількість жертв від пожеж і вибухів неухильно зростають і досягають таких значних величин, що боротьба з ними набуває важливого державного значення [80, 81].

Матеріальні збитки від аварій та пожеж на об'єктах зберігання горючих рідин становлять мінімум 100 млн. дол. США, левову частку з яких складають витрати на процес ліквідації аварії (вартість піноутворювача, інших вогнегасних засобів, пально-мастильних матеріалів, залучення різних служб).

В середньому, на гасіння однієї статистичної пожежі [81] витрачається 20 – 40 тонн піноутворювача, вартість якого становить 18 – 89,2 тис. грн/т, тобто затрати складатимуть від 54 до 80 млн. гривень. Так, наприклад, вартість піноутворювача SOFIR AFFF AR 6% для гасіння пожеж класу В2 становить 68,00 грн/1 л [82 – 86 ].

Майже на кожну велику пожежу через постійний дефіцит, піноутворювач доставляється із сусідніх підприємств, міст чи навіть областей, що, відповідно, формує великі затрати за доставку та його кінцеву вартість. Для прикладу на пожежу, яка виникла 8 червня 2015 року на нафтобазі «БРСМ-Нафта» біля села Крячки Васильківського району Київської області, під час гасіння якої лише через 4 години від початку повідомлення про пожежу було проведено першу пінну атаку. На початковому етапі пожежі для проведення пінної атаки було недостатньо сил та засобів, а також недостатньо запасу піноутворювача.

Зважаючи на найбільш поширені джерела займання на спиртових підприємствах [90] а саме: іскроутворення механічного походження, що виникає у разі ударів металевих частин обладнання (вентилятори тощо), потрапляння металевих предметів у дробарки та інше технологічне обладнання, падіння інструменту на металеві поверхні або бетонну підлогу, відкрите полум'я техобладнання (топки), паяльні лампи, місця спалювання відходів, сірники і непогашені цигарки, електрозварювальні роботи, теплове проявлення електричного струму, іскри або дуги короткого замикання, розряди статичної та атмосферної електрики, перегрів підшипників у випадку неправильного застосування змащувального матеріалу, їх несправність, спрацювання або забруднення, недбале поводження з промасленими ганчірками та іншими [87 – 93]. Беручи до уваги вищезазначене можемо сказати, що вогнегасний аерозоль буде набагато ефективніше та основне швидше попереджати та ліквідовувати такі джерела із недопущенням поширення полум'я на весь об'єм горючого.

Крім цього, середня кількість піноутворювача, який використовується для гасіння пожежі в резервуарі, наприклад, об'ємом 5000 м<sup>3</sup>, становить близько 21000 л, води – 350000 л, пально-мастильних матеріалів – щонайменше 300 л. Якщо врахувати загальну вартість всіх цих матеріалів, то стає очевидним, що в економічному аспекті гасіння пожеж класу В пінними засобами є доволі витратним процесом та, крім цього, вимагає багато часу на акумуляцію ресурсів і підготовку до гасіння.

Тому, дуже актуальною є проблема зменшення витрат на процес ліквідації пожежі. Як альтернативу, для гасіння резервуарів з горючими рідинами було запропоновано використовувати вогнегасні порошки та інертні розріджувачі, але жоден з них не знайшов широкого застосування, оскільки при вибуху резервуар, як правило, руйнувався і створювалися умови, що ускладнюють, а то й унеможливають, гасіння пожежі. Відповідно до отриманих експериментальних результатів з визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння вогнегасними аерозолями та

порівнюючи його з пінним, можна сказати, що підшарове аерозольне гасіння є ефективнішим і дешевшим порівняно з пінним підшаровим гасінням. Особливості горіння АУС та подальшого утворення аерозолю дає можливість подавати вогнегасний аерозоль на гасіння підшаровим способом, що є значною перевагою, адже запропонована система пожежогасіння має більшу ймовірність залишитись неушкодженою внаслідок вибуху. До того ж вогнегасний аерозоль на відміну від піни легко проникає в порожнини та так звані «кишені», що значно пришвидшує ліквідацію пожежі.

Що ж до характеристик АУС, то варто зазначити, що з 1 г АУС утворюється до 5 л вогнегасного аерозолю з відповідним фазовим складом, а з 10 кг АУС – до 50000 л вогнегасного аерозолю [31]. Час захисної дії вогнегасного аерозолю в умовно герметичному об'ємі становить 25 хв, що цілком достатньо для унеможливлення подальшого продовження горіння. За цей час всі нагріті металеві частини встигнуть охолотитись нижче температури самоспалахування спирту.

Беручи до уваги те, що більшість резервуарів є металевими, відповідно, було проведено оцінку вартості витратних матеріалів (АУС), на гасіння пожеж з різними ступенями їх заповнення, а результати наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Дані про орієнтовну вартість АУС для гасіння резервуарів типу РВС

Об'єм резервуара, м <sup>3</sup>	Приблизна вартість системи аерозольного підшарового гасіння, тис. грн	Приблизна вартість піноутворювача спеціального призначення, (разом із запасом), тис. грн
30	51	107
20	44	71
10	30	36
5	22	25

Отже вартість системи аерозольного пожежогасіння нижча за вартість самого піноутворювача, не враховуючи повну вартість системи з насосами, трубопроводами та іншим устаткуванням. До того ж проектування самої системи подачі вогнегасного аерозолу вимагає набагато менше матеріальних затрат, ніж, наприклад, системи підшарового гасіння піною, оскільки в цих системах відсутні ємності для зберігання піноутворювача, пінозмішувачі, патрубки для під'єднання рукавів генераторів піни і т.д.

#### **4.4. Методика досліджень та експериментальна установка з визначення параметрів підшарового гасіння в полігонних умовах**

Експериментальна установка для полігонних випробувань (рис. 4.5) – це циліндрична ємність висотою 878 мм та діаметром 585 мм. Зазначені розміри ємності було обґрунтовано відповідно до пропорцій співвідношень реальних резервуарів, в яких діаметр, як правило, менший в 1,5-2,5 рази за його висоту. У випадку експериментальної установки виходить співвідношення 1,5 разів, що відповідає зазначеним критеріям.

Утворення вогнегасного аерозолу відбувалось в генераторі вогнегасного аерозолу, який розташований вище рівня в ємності, та з'єднаний з резервуаром подаючим трубопроводом, який містить вентиль та вихідні патрубки на кінці.

Аналіз процесу гасіння горючих рідин показав, що високу вогнегасну ефективність підшарового гасіння можна досягти завдяки сукупності чинників, які синергічно взаємодіють та підсилюють дію один одного. З урахуванням вказаних параметрів було розроблено установку та методику дослідження вищеназваних параметрів. Для проведення експерименту було підібрано матеріали, а саме: таку ж аерозольутворюючу суміш, що і при проведенні лабораторних досліджень, маса якої становила від 5 до 1000 г. Маса аерозольутворюючої суміші підбирали з розрахунку гасіння полум'я в умовно герметичному об'ємі, з трьохкратним запасом, тобто в об'ємі,

більшому ніж незаповнена частина резервуара. В якості пального було використано суміш бензину та бутанолу.

Методика з визначення можливості та ефективності підшарового гасіння вогнегасним аерозолем полягала у наступному:

1. Аерозольотворюючий заряд з запалом розташовують в генераторі вогнегасного аерозолю, який під'єднаний до подаючого трубопроводу.

2. В ємність заливали 30 л суміші бензину з бутанолом на водній подушці. Суміш підпалювали та чекали 60 секунд, після чого подавали електричний імпульс на аерозольотворюючий заряд, який підпалювався та утворював аерозоль.

3. Утворений аерозоль подавався на нижній рівень резервуара через подаючий трубопровід з перекирвним вентилям і зворотнім клапаном, яким потік аерозолю направлявся через розподільник резервуаром та виходив через вихідні сопла під шар рідини.

4. Після початку виходу аерозолю з палаючого спирту фіксували час гасіння або, відповідно, не гасіння полум'я на поверхні спирту.

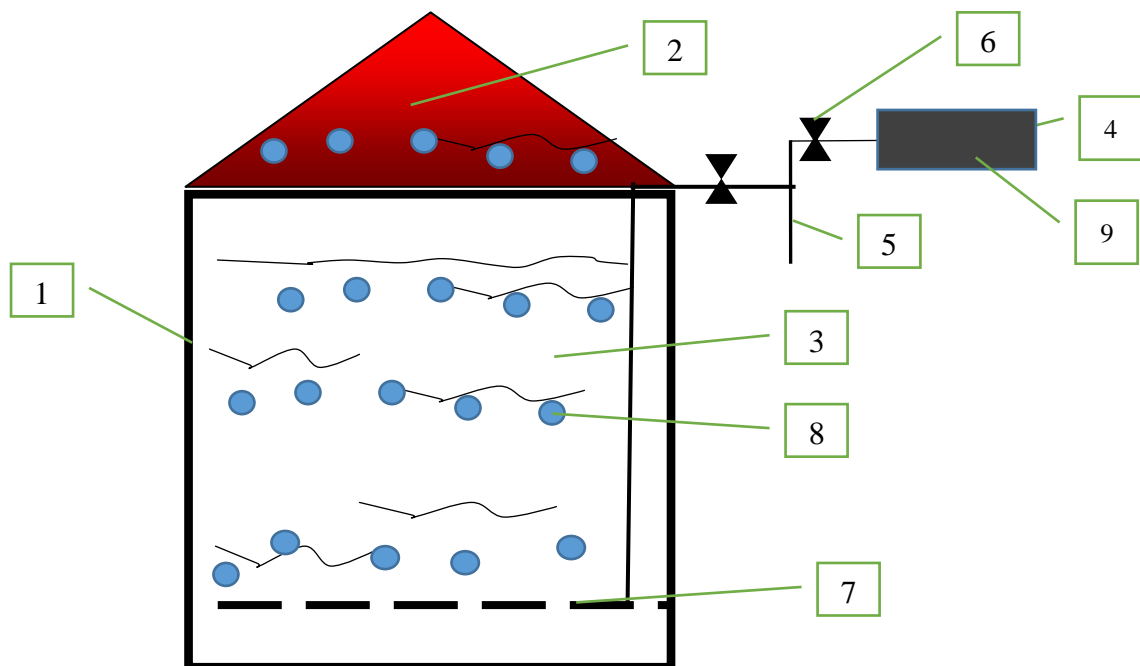


Рисунок 4.5. Експериментальна установка для визначення ефективності параметрів підшарового гасіння.

1. Резервуар.
2. Полум'я.
3. Горюча рідина.
4. Генератор вогнегасного аерозолу.
5. Трубопровід.
6. Перекривний вентиль.
7. Вихідні патрубки.
8. Бульбашки аерозолу.
9. Заряд АУС.

З метою спрощення подавання аерозолу підшарово, генератор АУС було перенесено вище рівня рідини в резервуарі (рис 4.5). Як було показано вище, експеримент з визначення вогнегасної ефективності при подаванні аерозолу підшарово в резервуарі проводили таким чином. Горючу суміш в ємності підпалювали та давали час на горіння, як було зазначено раніше – 60 с, чого цілком достатньо для відтворення теплових процесів пожежі та досягнення відповідної температури стінок резервуара та верхнього шару рідини, досягнення лінійної швидкості вигорання і забезпечення прогрівання шару пального. Після подання електричного струму на запальник запалювався АУС, після чого вогнегасний аерозоль за рахунок надлишкового тиску (близько 60 Атм) подавався до кільця виводу. Вихід аерозолу на поверхню та час гасіння фіксувався за допомогою секундоміра. Процес гасіння полум'я було зафіксовано відеокамерою, а розкадрування наведено на рисунку 4.6.

#### **4.5. Результати полігонних досліджень та їх обговорення**

Результати експерименту показали, що гасіння було досягнуто в усіх випадках, крім випадків з масою АУС до 25 грамів. У випадку, коли використовувалось до 25 г (табл. 4.2) аерозольутворюючої сполуки, гасіння при подаванні аерозолу з придонного рівня з першої спроби не відбулось, але було досягнуто з другої спроби. У решті випадків гасіння було досягнуто (табл. 4.2).

Вільне горіння суміші бензину з бутанолом в ємності відбувалось близько 50 секунд, що видно на розкадруванні (рис. 4.6, позиція 1а). Аерозоль починали підшарово подавати на 50 секунді горіння. При цьому



аерозоль над поверхнею горючої рідини видно не відразу, а лише на 4 секунді подавання аерозолю (рис. 4.6, позиції 3а-5а) починається вихід аерозолю на поверхню, де видно, що аерозоль піднімається вгору разом з полум'ям.



Рисунок 4.6. Розкадрування процесу підшарового гасіння аерозолем.

При цьому, на цих фото видно, що розміри полум'я значно зменшуються, зокрема на фото 6а та 7а полум'я вже заледве помітне. Майже повне гасіння відбувається при зменшенні розмірів полум'я та повному заповненні поверхні рідини аерозолем (8а). Як видно на рис. 4.6, поз. 8а вогнегасний аерозоль зависає над поверхнею рідини щільним шаром, що забезпечує додаткове ефективне флегматизування шару над поверхнею рідини та унеможлиблює повторне спалахування від бортів резервуара. Це відповідає теоретичним висновкам, наведеним в 2 розділі, де вказується, що вогнегасний аерозоль забезпечує ефективне флегматизування та додаткове охолодження бортів внаслідок контактно-конвективного газообміну. Кінцеве гасіння відбувається після повного заповнення поверхні вогнегасним аерозолем (рис. 4.6, поз. 8а-10а). При цьому гасіння триває близько 4 секунд

(рис. 4.6, поз. 5а-8а). Технічні характеристики проведеного експерименту наведено в табл. 4.2.

Як бачимо з фото (рис. 4.6) при виході аерозолю з шару горючої рідини відбувалась спочатку інтенсифікація процесу горіння, після чого зменшення розмірів полум'я, але в подальшому гасіння не спостерігалось. При подаванні аерозолю підшарово з придонного рівня, що утворювався в результаті горіння 25, 50 та 75 г аерозольутворюючої суміші відбувалась спочатку інтенсифікація горіння завдяки розбризкуванню рідини через вихід бульбашок та збільшенню площі випаровування. Відразу після виходу аерозолю на поверхню температура стінок резервуара починала різко зменшувалась. Результати зміни температури показані на рис. 4.7.

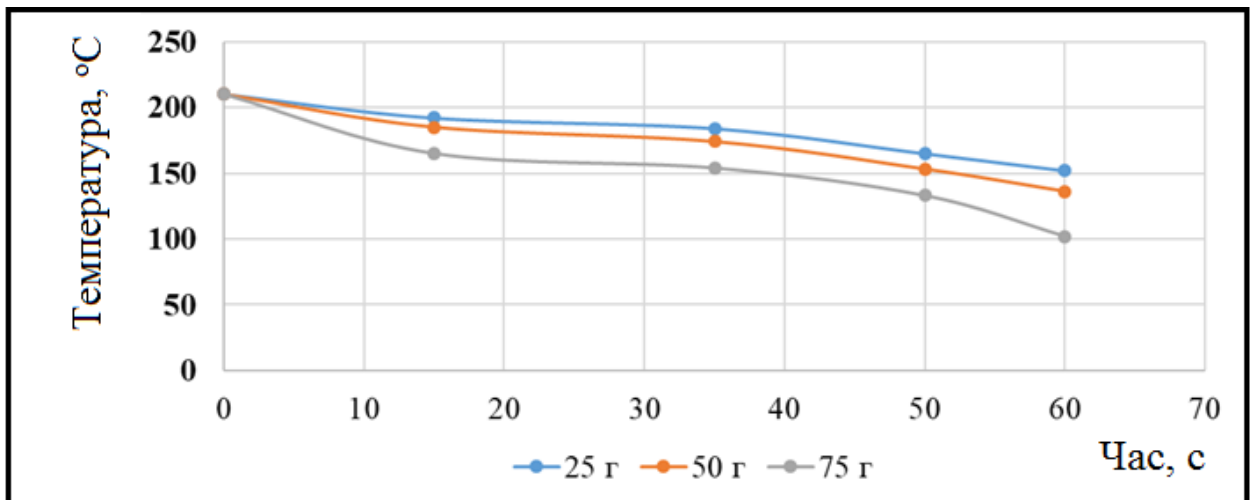


Рисунок 4.7. Графік зменшення температури стінок резервуара при підшаровому гасінні спирту аерозолем.

Параметри експерименту з визначення вогнегасної ефективності наведені в таблиці 4.2. При подаванні аерозолю з придонного рівня час від початку гасіння до повного припинення горіння становив в середньому 12 с. Крім цього аерозоль після виходу утримувався над поверхнею горючої рідини до 2 хвилин після припинення горіння, що унеможливорює повторне займання пального. При використанні АУС з масою 25-75 г час гасіння зменшується, але при цьому відбувається розбризкування палаючої рідини, що призводить до зменшення температури стінок резервуара за рахунок

випаровування спирту на них. Щодо механізму підшарового гасіння [84, 94-97], то системою державних норм та відомчих актів передбачається захист виробничих приміщень, працівників, та довкілля від дії небезпечних і шкідливих факторів та їх захисту від впливу виробництв. Забезпечити вищий рівень захисту може вогнегасний аерозоль за умови, коли він потрапляє в зону парів і газів, а пізніше в зону горіння та разом з горючою парою рідини забезпечує повне проникнення аерозолю в зону горіння, що значно підвищує ефективність гасіння. Підвищення ефективності гасіння відбувається за рахунок того, що дисперсні частинки аерозолю не відносяться від полум'я конвективними потоками, а горюча пара вже попередньо флегматизується аерозолем, що зменшує швидкість горіння та значно збільшує енергію активації. Вказане вище збігається з результатами робіт [52, 67].

Таблиця 4.2.

## Параметри підшарового аерозольного пожежогасіння

№ з/п	Маса заряду АУС, г	Час горіння АУС, с	Час гасіння при підшаровій подачі, с	Примітка
1	5	12	-	Зменшення розмірів полум'я
2	10	12	-	Зменшення розмірів полум'я
3	15	14	-	Зменшення розмірів полум'я
4	25	14	-	Зменшення розмірів полум'я
5	25	15	17	Зменшення розмірів полум'я
6	40	15	18	Розбрикування
7	50	17	16	Розбрикування
8	75	18	14	Розбрикування

Отже, подавання вогнегасного аерозолю підшарово через рідину призводить до реалізації наступних явищ, що сприяють її гасінню:

- перемішування рідини, що горить, та зменшення температури на поверхні рідини, а відповідно, і швидкості пароутворення при цьому;
- зменшення кількості горючої пари, яка проникає у зону горіння та зменшення розмірів полум'я;
- охолодження бортів резервуара;
- екранування теплового потоку із зони горіння на поверхню горючої рідини;
- збільшення об'єму полум'я та зменшення його теплонапруженості за рахунок введення додаткового об'єму аерозолу в полум'я;
- відрив полум'я від поверхні за рахунок швидкості потоку аерозолу, яка є більшою за швидкість поширення полум'я;
- відрив полум'я за рахунок зменшення швидкості поширення полум'я внаслідок його інгібування аерозолем.

Для більш чіткого розуміння механізму підшарового гасіння аерозолем етапи гасіння показано на рис. 4.8.

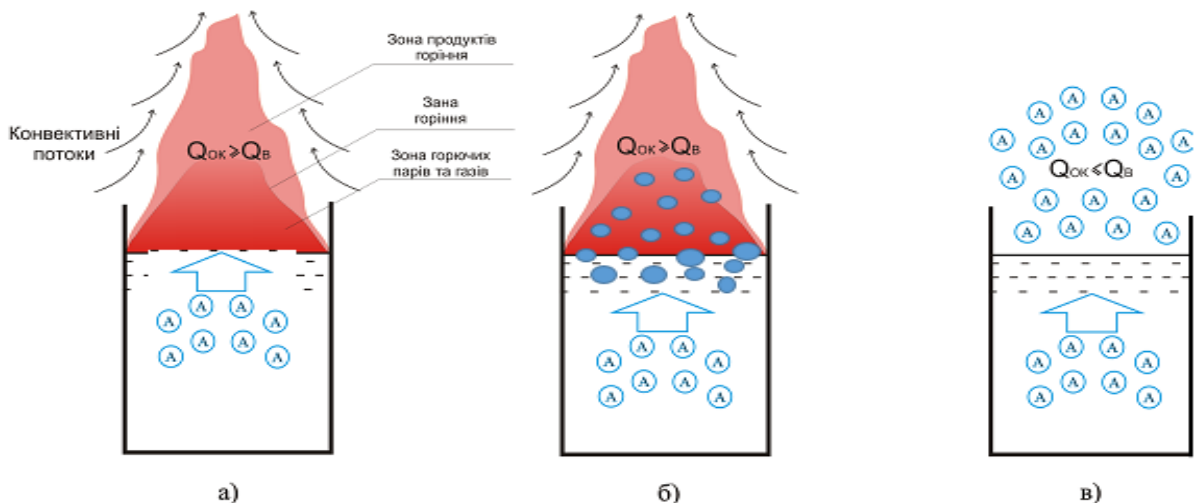


Рисунок 4.8 – Етапи підшарового гасіння спирту вогнегасним аерозолем.

Загалом процес підшарового гасіння аерозолем можна поділити на 3 етапи. На першому етапі (рис. 4.8, поз. а) вогнегасний аерозоль барботує через шар рідини, де відбувається його перемішування та вирівнювання температури в об'ємі рідини, що в свою чергу призводить до охолодження

поверхні та незначного нагрівання решти об'єму спирту, і як результат забезпечує зменшення інтенсивності пароутворення.

На другому етапі (рис. 4.8, поз. б) відбувається вихід аерозолу з шару рідини та подальше потрапляння в зону парів і газів, що призводить до збільшення об'єму полум'я за рахунок введення аерозолу.

На третьому етапі (рис. 4.8, поз. в) киснево-відновлювальна реакція припинялася за рахунок виконання умови  $Q_{ок} \leq Q_{в}$ . Завдяки термічному розкладанню твердих частинок аерозолу відбувалося часткове охолодження полум'я, паралельно його інгібування, що призводить до припинення реакції горіння.

Отже отримані результати підтвердили ефективність використання вогнегасних аерозолів на основі неорганічних солей калію для гасіння горючих рідин у резервуарах. Порівняно з попередніми способами гасіння, цей спосіб забезпечує ефективніше та надійніше гасіння полум'я, адже аерозоль подається з глибини резервуара. Тобто гасіння буде відбуватися відразу після виходу аерозолу на поверхню, що забезпечує реалізацію основних параметрів, зокрема: ефективність, швидкість та чистоту гасіння.

Отже бульбашки, піднявшись на поверхню, вивільняли вогнегасний аерозоль і відбувався процес припинення горіння. Час горіння спирту фіксувався за допомогою секундоміра.

Час від початку гасіння до повного припинення горіння становив 12 с. Крім того аерозоль утримувався над поверхнею горючої рідини ще протягом 20 хв. Такий проміжок часу унеможлиблює повторне займання горючого.

Отримані дані в результаті експерименту подано в таб. 4.3.

Результати експерименту з підшарового гасіння  
спирту вогнегасним аерозолем

№ з/п	Параметр	Значення		
1.	Габарити резервуара Н × d, м	0,86 × 0,585		
2.	Розташування установки	На рівні 30см від дна резервуара		
3.	Маса аерозольотворюючої суміші, кг	0,07		
4.	Тиск аерозолю на виході з генератора, Атм	3,0		
5.	Час вільного горіння рідини, с	60		
6.	Марка АУС	БАГР -1		
7.	Розхід АУС, г/с	5,832		
8.	Час гасіння пожежі за результатами експерименту, с	Номер експерименту		
		1	2	3
		12,0	11,6	11,5

Отож отримані результати підтвердили ефективність використання вогнегасних аерозолів на основі неорганічних солей калію для гасіння спиртів у резервуарах. Порівняно з іншими видами гасіння даний метод забезпечує значно менший час гасіння пожежі.

#### 4.6. Рекомендації щодо застосування вогнегасного аерозолю для підшарового гасіння спиртів у резервуарах

Зважаючи на новизну використання АУС для гасіння резервуарів зі спиртами, чітких рекомендацій щодо проектування даних систем на документальному рівні немає [85]. Тому, наведені нижче дані –

підтверджуються лише результатами теоретичних обґрунтувань та експериментальних досліджень.

Аерозольні вогнегасні речовини та генератори вогнегасного аерозолію на території України підлягають обов'язковій сертифікації. Контроль якості ГВА здійснюється відповідно до Норм пожежної безпеки (ДСТУ 4490:2005. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтування та експлуатування та ДСТУ 4442:2005 Пожежна техніка. Установки аерозольного пожежогасіння. Генератори вогнегасного аерозолію. Загальні технічні вимоги та методи випробування), у яких викладені загальні технічні вимоги до даних видів пожежно-технічної продукції, показники, отримані при випробуваннях, методи випробувань, деякі вимоги безпеки і охорони навколишнього середовища [97].

Попри вогнегасну здатність, важливою характеристикою вогнегасних аерозолів вважається токсичність (ступінь хімічної шкідливості), токсична небезпека. Тому, проектуючи систему аерозольного гасіння на об'єкті слід використовувати аерозольотворюючу суміш із допустимими показниками токсичності [86, 98 – 103]. Аерозольні засоби гасіння представляють собою деяку небезпеку у порівнянні із хладонами [101], з погляду на їх помірну токсичність, зважаючи на те, що в їх складі містяться в незначній кількості чадний та вуглекислий газ, аміак, оксиди азоту, також (з погляду на токсичність) можна сказати і про інертні розріджувачі [102,103]. Загалом експерименти проведені по дослідженню токсичної небезпеки, зокрема із дослідними щурами в роботах авторів [104-109] показали, що більшість відомих аерозолеутворюючих сполук забезпечують 100 % виживаності піддослідних тварин без будь-яких побічних наслідків, після дії на них компонентів аерозолію.

Конструктивні рішення та виконання обладнання (у тому числі ГВА), електропроводок, що входять до складу автоматичних установок аерозольного пожежогасіння, повинні відповідати вибухонебезпечним зонам згідно з вимогами ПУЕ, НПАОП 40.1-1.32-01 та ВСН 13-81. Тобто бути

вибухозахищеними. Корпус генератора та сухотруб повинні бути заземленні для унеможливлення самовільного спрацювання системи у разі виникнення розряду статичної електрики.

На об'єкті, де використовується захист резервуарів системами аерозольного пожежогасіння, варто передбачати відповідальну особу за стан утримання системи аерозольного пожежогасіння, яка повинна мати відповідні навички та пройти курс навчання з питань пожежної безпеки [110]. При виникненні пожежі в резервуарі слід негайно викликати підрозділи ОРС, адже потрібно забезпечити охолодження стінок та попередити поширення вогню на сусідні резервуари.

Вводи вогнегасного аерозолю слід проектувати з розрахунку один на  $10 \text{ м}^2$ . У разі, коли вони передбачаються під шаром рідини, то їх слід розміщувати таким чином, щоб забезпечувати інтенсивне перемішування горючої рідини.

#### **4.7. Висновки**

1. Обґрунтовано схему конструкції установки підшарового аерозольного гасіння спиртів. Розглянуто особливості проектування системи аерозольного пожежогасіння та встановлено, що кільце розподільник необхідно встановлювати в нижній частині резервуара з метою забезпечення більш ефективного перемішування спирту. За обґрунтованою схемою виготовлено дослідні зразки системи аерозольного підшарового гасіння, основними елементами якого є: генератор вогнегасного аерозолю, трубопровід, запірний пристрій, зворотній клапан, кільце-розподільник. Система пожежогасіння має незначні розміри та вагу, при цьому систему розраховано на підтримання проектної концентрації вогнегасної речовини, з метою недопущення повторного займання не менше 15 хвилин;



2. Розроблено методику досліджень та виготовлено систему підшарового аерозольного гасіння спирту в полігонних умовах. Проведено експериментальні дослідження та отримано результати полігонних натурних випробувань, які полягали в тому, що для гасіння спирту в ємності висотою 878 мм та шириною 585 мм необхідно 25 г АУС. У результаті підшарового подавання аерозолю відбувається спочатку розбризкування рідни, зменшення розмірів полум'я та, відповідно, подальше гасіння. Підтверджено високу вогнегасну ефективність запропонованого способу гасіння.

3. Проведно техніко-економічні дослідження способу підшарового аерозольного гасіння та визначено, що вартість зазначеного способу є меншою порівняно з вартістю пінного гасіння спирту поверхневим способом в середньому на 30%. Розроблено рекомендації щодо проектування та застосування системи підшарового аерозольного пожежогасіння для протипожежного захисту резервуарів для зберігання спиртів. Системою підшарового аерозольного пожежогасіння захищено резервуар з етанолом об'ємом 5 м<sup>3</sup> на об'єкті ТзОВ «Гуральня Бруницьких».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є закінченим науковим дослідженням, розв'язано актуальну науково-технічну задачу: розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння спиртів у резервуарах при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолю, як наукового підґрунтя підвищення ефективності систем підшарового пожежогасіння резервуарів зі спиртами. При цьому отримано такі основні наукові і практичні результати:

1. За результатами аналізу сучасного стану розроблення та застосування систем підшарового та аерозольного пожежогасіння встановлено, що одним із способів підвищення ефективності гасіння пожеж у резервуарах зі спиртами є подавання вогнегасного аерозолю підшарово з дна резервуара.

2. Теоретично обґрунтовано можливість підвищення ефективності систем підшарового гасіння спиртів у резервуарах шляхом підшарового подавання вогнегасного аерозолю з дна резервуара. Обґрунтовано, що при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолю ефективність гасіння спиртів забезпечується сумарною дією чинників, які виникають в момент виходу, проходження через шар рідини та потрапляння аерозолю на поверхню спирту.

3. Розроблено методика та проведено експериментальні дослідження з виявлення впливу чинників на ефективність процесу припинення горіння у разі підшарового подавання аерозолю з дна резервуара зі спиртом.

4. Виявлено ефект синергізму чинників при підшаровому подаванні вогнегасного аерозолю з дна резервуара через кільцевий розподільник, який розташований біля бортів, сутність якого полягає у зниженні часу гасіння до 2 разів, порівняно з тим, коли подавання вогнегасного аерозолю здійснюється по центру резервуара.

5. Виявлений ефект синергізму полягає у безпосередньому одночасному забезпеченні охолоджуючого ефекту при перемішуванні спирту та охолодженні верхнього киплячого шару спирту та стінок резервуара внаслідок виходу аерозолі на поверхню рідини. При цьому експериментально встановлено, що зменшення розміру бульбашок (1-5 мм) забезпечує більш рівномірний вихід та ефективне гасіння спирту за рахунок утворення пінистого гетерогенного шару на поверхні спирту, який складається з бульбашок та спирту.

6. Експериментально встановлено інтенсивність теплового випромінювання на відстані 30 та 60 мм від поверхні спиртового полум'я площею 234 см<sup>2</sup>. Встановлено, що значення інтенсивності теплового випромінювання для зазначених спиртів становить від 0,8 до 4,7 кВт/м<sup>2</sup>, а інтенсивність випромінювання максимально збільшується від 30 до 40 секунд горіння, що пояснюється нагріванням поверхні спирту і збільшенням інтенсивності його випаровування. Також експериментально встановлено, що інтенсивність теплового випромінювання для етанолу значно зменшується при витраті вогнегасного аерозолі 1,2 г/с, що забезпечує зменшення полум'я до 2 разів і, відповідно, призводить до подальшого гасіння. При цьому встановлено, що основним фактором, який впливає на лінійну швидкість вигорання спирту, є інтенсивність випромінювання, яка забезпечує нагрівання поверхні рідини та стінки резервуара.

7. Теоретично обґрунтовано та показано взаємозв'язки чинників, що призводять до зниження інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів вогнегасними аерозолями. Встановлено, що підшарове подавання вогнегасного аерозолі реалізовує ряд чинників, які синергічно забезпечують зниження інтенсивності теплового випромінювання за рахунок охолодження спирту, флегматизування зони парів і газів, інгібування зони реакції горіння та розсіювання тепла разом з нагрітим аерозолем. Крім цього винос аерозолі разом з продуктами згорання із зони

реакції горіння забезпечує екранування навколишнього простору від полум'я.

8. Обґрунтовано вихідні дані для проектування системи підшарового аерозольного пожежогасіння з виходом вогнегасного аерозолю на поверхню через кільце розподільник. Також розроблено схематичну конструкцію системи аерозольного підшарового гасіння. Розроблено технічну документацію, виготовлено дослідний зразок системи аерозольного підшарового гасіння, проведено випробування в полігонних умовах, а також напрацьовано рекомендації щодо їх застосування для протипожежного захисту об'єктів з можливістю виникнення пожеж класу В з горінням спиртів.

9. Результати досліджень впроваджено в системі підшарового аерозольного пожежогасіння для протипожежного захисту резервуара із спиртом, а також у вигляді установки та методики випробувань у науково – випробувальній лабораторії Львівського державного університету безпеки життєдіяльності та лекційних матеріалах під час викладання дисципліни «Теорія розвитку та припинення горіння».

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. У Збаражжі стався вибух та пожежа на спиртовій базі [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/uzbarazhi-stavsja-vibukh-ta-pozhezha-na-spiritovij-bazi-2478411.html>.
2. Брест спірит [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.bbc.com/russian/rolling\\_news/2015/07/150720\\_rn\\_brest\\_spirit](https://www.bbc.com/russian/rolling_news/2015/07/150720_rn_brest_spirit).
3. Tanker truck burns in Baltimore [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pressreader.com/usa/baltimore-sun/20070514/281496451851985>.
4. В Одесі вночі згорів склад зі спиртом і цигарками, постраждалих немає - ДСНС [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ua.interfax.com.ua/news/general/641647.html>.
5. Ethanol Tank Fire Fighting Background and previous research [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sp.se/en/Sidor/default.aspx>.
6. Сенчихін Ю. М. Довідник керівника гасіння пожежі / Ю. М. Сенчихін, В. В. Сировий. – Київ: ТОВ «Літера-Друк», 2016. – 312 с.
7. ВСН-13-81 Інструкція з проектування вибухопожежонебезпечних виробництв спиртових, лікєро-горілочаних та коньячних підприємств харчової промисловості: НАПБ В.05.013-81/180. – 1981. – К.: ВБН, ВСН, 1981 – 98 с. (ВСН).
8. УкрНДШБ: «Рекомендації щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт» затверджені МНС України 22.01.2009 р.
9. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами: НАПБ 05.035 – 2004. – Чинний від 2004-02-16. – К. – Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки (УкрНДШБ) МНС України, 2004. – 89 с.

10. Баратов А. Н. Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук. – Москва: Химия, 1990.
11. Абдурагимов И. М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И. М. Абдурагимов, В. Ю. Говоров, В. Е. Макаров. – Москва: ВПТШ МВД СССР, 1980. – 225 с.
12. Спирт взлетел на воздух [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.kommersant.ru/doc/292815>.
13. Михайлюк О. П. Пожежна профілактика технологічних процесів та апаратів / О. П. Михайлюк, В. В. Олійник, Г. О. Мозговий. – Харків, 2004.
14. Котов А. Г. Пожаротушение и системы безопасности / А. Г. Котов. – Київ: Репро-Графіка, 2003. – 67 с.
15. Balanyuk V. M. Effect of ecologically safe gas-aerosolmixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane / V. M. Balanyuk, V. V. Kovalyshyn, N. M. Kozyar. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – С. 12–18.
16. Проблеми гасіння пожеж спиртів та їх сумішей. // Fire Safety. – 2018. – №33. – С. 5–9. – Режим доступа до ресурсу: <http://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB>, DOI:10.32447/207866662.33.2018.01
17. Стабников В. Н. Этиловый спирт / В. Н. Стабников, И. М. Ройтер, Т. Б. Процюк. – Москва: «Пищ. пром-сть», 1976. – 272 с.
18. Рекомендации по тушению полярных жидкостей в резервуарах – Москва: ФГУ ВНИИПО, 2007. – 58 с.
19. Hottel H. C. Certain Laws Governing Diffusive Burning Liquids / H. C. Hottel. // Fire Research Abstracts and Reviews. – 1959. – №1. – С. 41–44.
20. Burges D. Diffusive Burning of Liquid Fuels in Open Trays / D. Burges, A. Strasser, J. Grumer. // Fire Research Abstracts and Reviews. – 1961. – №8. – С. 177–192.

21. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering / [M. Hurley, D. Gottuk, J. Hall та ін.].
22. Moore T.A. Nitrogen gas as a halon replacement / T.A. Moore, N. Yamada // Halon Options Technical Working Conference, 12-14 May, 1998. – P. 330-338.
23. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А. Ф. Шароварников, В. П. Молчанов, С. С. Воевода, С. А. Шароварников. – Москва: "Калан", 2002. – 448 с.
24. Шароварников А. Ф. Тушение горючих жидкостей распылённой водой / А. Ф. Шароварников, Д. А. Корольченко. // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – №11. – С. 70–74.
25. Корольов Р. А. Аналіз способів гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами комбінованим способом / Р. А. Корольов, В. В. Ковалишин, Б. В. Штайн. // ScienceRise. – 2017. – №6. – С. 41–50. – Режим доступу до ресурсу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/texc\\_2017\\_6\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/texc_2017_6_11).
26. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань: ДСТУ 4041-2001. – Чинний від 2001-06-27. – К. : Держспоживтсандарт України, 2001. – 52 с. – (Національний стандарт України).
27. Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню (EN 1568-4:2018, IDT): ДСТУ EN 1568-4. – Чинний від 2019-01-01. – Київ. : Державний Стандарт України. – 55 с.
28. EN 1568:2008/AC:2010 (усі частини) Fireextinguishingmedia – Foamconcentrates [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Nvundipb\\_2014\\_2\\_17.pdf](http://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nvundipb_2014_2_17.pdf).

29. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. - ВБН В.2.2-58.1-94. – Чинний від 1994-04-01. – К. : ВБН, 2008. – 54 с.
30. Протипожежна техніка. Терміни та визначення основних понять. : ДСТУ 2273:2006. – Чинний від 2007-04-01. – Київ. : Державний Стандарт України. – 44 с.
31. Агафонов В. В. Установки аэрозольного пожаротушения. Элементы и характеристики проектирование монтаж и эксплуатации / В. В. Агафонов, Н. П. Копилов. – Москва: ВНИИПО, 1999. – 229 с.
32. Агафонов В.В. Влияние начальных температур среды и аэрозолей АОС на эффективность объемного аэрозольного пожаротушения / Большаков В.С., Голубчиков В.Б., Поляков Д.В. // Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции, М.: Недра, С. 87–91.
33. Пожежна техніка. Установки аэрозольного пожежогасіння. Генератори вогнегасного аерозолю. Загальні технічні вимоги та методи випробування. - ДСТУ 4442:2005. – Чинний від 2006-07-01. – Київ. : Державний Стандарт України. – 64 с.
34. Антонов В. Г. Вогнегасні речовини / В. Г. Антонов., 2004. – 176 с.
35. Баратов А. Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтехимической нефтеперерабатывающей промышленности / А. Н. Баратов, Э. Н. Иваов. – Москва: Химия, 1979. – 366 с.
36. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – ГОСТ Р 12.3.047-98. – Чинний від 2012-12-27. – Москва. – НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. – 112 с.
37. Производство спирта этилового ректифицированного и ликероводочных изделий. – СанПиН 2.3.4.704-98. – Чинний від 1998-09-01. – РФ. – Минздрав России. – 98 с.



38. Виробництво етилового спирту з харчової сировини. Терміни та визначення. – ДСТУ 3296-95. – Чинний від 1997-01-01. – Державний Стандарт України. – 165 с.
39. Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Ю. И. Дытнерский. – Москва: Химия, 1983. – 272 с.
40. Баратов А. Н. Физические и химические аспекты пожаротушения экономически эффективными системами основанными на сжигании пропеллантов. / А. Н. Баратов. – Москва: Пожаровзрывоопасность., 2001.
41. Основи теорії розвитку і припинення горіння / Г. І.Слагін, М. Г. Шкарабура, М. А. Кришталь, О. М. Тищенко. – Черкаси: ЧПБ, 2001. – 448 с.
42. Правила безпеки праці в органах та підрозділах МНС України. - наказ МНС України. – Чинний від 2007-05-07. – Київ.
43. Правила проектування, монтажу та експлуатації автоматичних установок аерозольного пожежогасіння. - НАПБ 01.038-2001. – Чинний від 2001-02-28.
44. Стрижевский И. И. Промышленные огнепреградители / И. И. Стрижевский, В. Ф. Заказнов. – Москва: Химия, 1996. – 142 с.
45. Класифікація пожеж. - ДСТУ EN 2:2014. – Чинний від 2016-01-01. – Державний Стандарт України.
46. Тарахно Е. В. АЭРОЗОЛЬНОЕ ИНГИБИРОВАНИЕ ПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ / Е. В. Тарахно, А. П. Михайлюк, И. Б. Рябова. // Проблемы пожарной безопасности. – 2000. – №7. – С. 201–205.
47. Системи протипожежного захисту. – ДБН В.2.5-56:2014. – Чинний від 2015-07-01. – Державні Будівельні Норми. – 98 с.
48. Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань. – ДСТУ 3958-2000. – Чинний від 2001-01-01. – Державний Стандарт України. – 45 с.

49. Пожежна техніка. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтування та експлуатування. Технічні вимоги. – ДСТУ 4490:2005. – Чинний від 2006-07-01. – Державний Стандарт України. – 134 с.
50. Кукуєва В. В. Теоретичне дослідження конверсії хладону  $\text{CBrClF}_2$  на екологічно безпечні речовини / В. В. Кукуєва. // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. – 2016. – №25. – С. 74–81. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/140457>.
51. Андросов А. С. Теория горения и взрыва : учебное пособие для курсантов, студентов и слушателей образовательных учреждений МЧС России / А. С. Андросов, И. Р. Бегишев, Е. П. Салеев. – Москва, 2007. – 237 с.
52. Balanyuk V. M. Extinguishment of nheptane diffusion flames with the shock wave / V. M. Balanyuk. // ВіТР. – 2016. – С. 103–111.
53. Дослідження вогнегасної дії аерозолів одержаних спалюванням твердопаливних композицій різного складу / В. М.Баланюк, О. М. Щербина, Б. Т. Грималюк, Ю. В. Кіт. // Пожежна безпека. – 2004. – №4. – С. 56–58.
54. Каримов Ф.Ф. О гомогенно-гетерогеннов механизме протекания каталетических реакций в аерозолях – Киев: Науч. произв. корпорация “Киев. ин-т автоматики”, 1996. – 44 с.
55. Минаев Н. А. Пожарно-техническое вооружение / Н. А. Минаев, М. Н. Исаев. – Москва: Стройиздат, 1974. – 372 с.
56. Копылова Н. П. алогенсодержащие пожаротушащие агенты: Свойства и применение / Н. П. Копылова. – Санкт-Петербург: ТЕЗА, 1999. – 127 с.
57. Козлов Б.К. О скорости подъема и гидравлическом сопротивлении газоздушных пузырей в жидкости. / Б.К. Козлов, М.А. Мологин // АН СССР. – 1951. – №8. – С. 47–62.
58. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем /

- С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – Москва: Энергия, 1976. – 297 с.
59. Герасимов В. В. Методичні вказівки до самостійної роботи та практичних і лабораторних занять / В. В. Герасимов, В. С. Проценко, Д. А. Сухомлин // Методичні вказівки до самостійної роботи та практичних і лабораторних занять для студентів технологічних спеціальностей денної та заочної форми навчання з курсу “Поверхневі явища і дисперсні системи”. / В. В. Герасимов, В. С. Проценко, Д. А. Сухомлин. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2012. – С. 44.
60. Баланюк В. М. Спосіб підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем. / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, А. В. Кравченко. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2019. – С. 11–15.
61. James W. Fleming, Mark D. Reed, Eric J.P. Zegers, Bradley A. Williams, Ronald S. Sheinson. Extinction studies of propane/air counterflow diffusion flames: the effectiveness of aerosols : Halon Options Technical Working Conference (Albuquerque, NM, 12–14 May 1998). Albuquerque, NM, 1998. С.403-414.
62. Баланюк В. М. Определение эффективности тушения огнетушащими аэрозолями горючих жидкостей на открытом пространстве. / В. М. Баланюк. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №5. – С. 4–11.
63. Агафонов В.В. Перспективи застосування установок аерозольного пожежогасіння. / В.В. Агафонов, А.Ф. Жевлаков, Н.П. Копилов, В.М. Ніколаев // Науковотехнічне забезпечення протипожежних і аварійно-рятувальні робіт: матеріали XII Всеросійської науково-практичної конференції, м.Москва, 1993 р. С. 161-162.
64. Баланюк В. М. Удосконалення аерозолевої вогнегасної речовини на основі солей калію та обґрунтування умов її застосування : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 / Баланюк В. М. – Київ, 2012. – 164 с.
65. Balanyuk V. M. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures / V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar,

- O. I. Garasymyuk. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2016. – С. 4–11. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399.
66. Проблеми гасіння спиртів та їх сумішей. / В. М.Баланюк, Н. М. Козяр, Ю. О. Копистинський, А. В. Кравченко. // *Fire Safety.* – 2018. – №33. – С. 5–9. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pressreader.com/usa/baltimore-sun/20070514/281496451851985>).
67. Balanyuk V. M. Specific nature of phlegmatizing air-heptan mixture using aerosol and nitrogen binary mixture / V. M. Balanyuk. // *ВіТР.* – 2016. – С. 139–149. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: DOI:10.12845/bitp.44.4.2016.11.
68. Антонов А. В. Флегматизування горючих середовищ інертними розріджувачами, інгібіторами та їх сумішами. / А. В. Антонов, В. П. Орел, Ю. В. Цапко. // *Зб. наук. пр. Севастопольського ВМІ ім. П.С. Нахімова.* – 2002. – №1. – С. 148–149.
69. Антонов А. В. Узагальнення і розвиток наукових основ розроблення та технологій застосування екологічно прийнятних вогнегасних речовин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 21.06.01 / Антонов А. В. – Київ, 2017. – 55 с.
70. Уоллис Г., Одномерные двухфазные течения, пер. с англ., М., 1972; Кутателадзе С. С, Стырикович М. А., Гидродинамика газожидкостных систем, 2 изд., М., 1976; Рамм В. А., Абсорбция газов, 2 изд.. М., 1976. В.В. Дильман.
71. Iveta Marková. Fire Size of Gasoline Pool Fires / Linda Makovická Osvaldová, Vladimír Mózer, Jozef Svetlík, Mikuláš Monoši, and Michal Orinčák1 // *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2017. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: doi:10.3390/ijerph17020411.
72. Beyler C. L. Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* / C. L. Beyler., 2016.

- [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0\_66.
73. The premixed methane/air explosion inhibited by sodium bicarbonate with different particle size distributions. / [L. Zheng, Y. Wang, L. Yu та ін.]. // Powder Technology. – 2019. – №354. – С. 630–640.
74. Flame inhibition of aluminum dust explosion by  $\text{NaHCO}_3$  and  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  / [H. Jiang, M. Bi, B. Li та ін.]. // Combustion and Flame. – 2019. – №200. – С. 97–114.
75. Synergism between chemical and physical fire-suppressant agents / J. L.Lott, S. D. Christian, C. M. Slierpcevich, E. E. Tucker. // Fire Technology. – 1996. – №32. – С. 260–271.
76. Simple model of inhibition of chain-branching combustion processes. Combustion / V. I.Babushok, V. V. Gubernov, S. S. Minaev, T. P. Miroshnichenko. // Theory and Modelling. – 2017. – №21. – С. 1066–1079.
77. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – ДНАОП 0.00-1.32-01. – Чинний від 2001-06-21. Державні Нормативні Акти з Охорони Праці – 78 с.
78. «Правила улаштування електроустановок», затверджені наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476.
79. Войтович Т. М. «Вдосконалення технології "підшарового" пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами» / Войтович Т. М..
80. Ковалишин В. В. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ «ПІДШАРОВОГО» ГАСІННЯ. [Електронний ресурс] / В. В. Ковалишин, Т. М. Войтович, В. В. Чернецький – Режим доступу до ресурсу: DOI: 10.32447/20786662.34.2019.04.
81. Наказ МНС України № 1341 від 16.12.2011 «Про затвердження Методики розрахунку сил і засобів МНС України, необхідних для гасіння пожеж у будівлях і на територіях різного призначення».

82. Пенообразователи типа AFFF и AFFF AR [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://sofir.com.ua/?page\\_id=32..](http://sofir.com.ua/?page_id=32..)
83. ПЛІВКОУТВОРЮЮЧИЙ ПІНОУТВОРЮВАЧ “AFMER AFFF 6%” [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://pirena.com.ua/shop/foaming\\_agents/afmer-afff-6/](https://pirena.com.ua/shop/foaming_agents/afmer-afff-6/).
84. Товариство з Обмеженою відповідальністю «Науково-виробниче підприємство «Вогнеборець» Протипожежні послуги. Технічна діагностика та перезарядка порошкових та вуглекислотних вогнегасників. Виробництво піноутворювачів, вогнегасників водяних та водопінних [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://vogneborec.com/prajjs/>.
85. Піноутворювач PYROCOOL AR [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pyrocool.com.ua/product/pinoutvoryuvach-pyrocool-ar/>.
86. Піноутворювач плівкоутворювальний фторсинтетичний спеціального призначення "Альпен AFFF" 3%, 6% [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://alhim.com.ua/uk/produktsiia/pinoutvoryuvachi/penoobrazovatel-plenkoobrazuyushchij-alpen-afff-3-6-ftor-sinteticheskij/>.
87. Тренувальна пожежа на БРСМ-Нафта на Київщині: вогонь подолано – трагедії уникнуто. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://brsm-nafta.com/news\\_article/2711.html](https://brsm-nafta.com/news_article/2711.html).
88. Пожежа на нафтобазі "БРСМ-нафта": річниця трагедії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hlevakha.gov.ua/news/1623163954/>.
89. Опис пожежі, що сталася 8 червня 2015 року по вул. Південна, 1, в смт. Глеваха Васильківського району Київської області на території нафтобази ТОВ «Побутрембудматеріали». / [П. С. Кісільов, С. О. Майстренко, В. Л. Веремієнко та ін.], 2015.

90. СТАТУТ дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0802-18#Text>.
91. Як убезпечити підприємства виноробної промисловості від пожеж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://oppb.com.ua/articles/yak-ubezpechyty-pidpryyemstva-vynorobnoyi-promyslovosti-vid-pozhezh>.
92. Рекомендацій щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт. / [В. О. Боровиков, В. А. Нікітін, А. В. Антонов та ін.]. // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного інституту. – №1. – С. 80–85.
93. Як убезпечити підприємства виноробної промисловості від пожеж [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://oppb.com.ua/news/pozhezhna-bezpeka-na-pidpryyemstvi-nebezpeka-vynuknennya-pozhezh-na-pidpryyemstvah>.
94. Закономерности тушения нефтепродуктов в условиях интенсивного движения жидкости при подаче пены в слой горючего / [В. П. Молчанов, А. Ф. Шароварников, С. С. Воевода та ін.]. // Сб. науч. тр. Научно-техническое обеспечение деятельности государственной пожарной службы. – 1996. – С. 129 – 137.
95. Навчальний посібник «СУЧАСНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ» / [С. М. Бондаренко, О. А. Дерев'янко, В. А. Дурєєв та ін.]. – Харків, 2018.
96. Система стандартів безпеки праці в будівництві. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використанні в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. – ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007. – Чинний від 2011-12-19. (НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ).

97. Правила пожежної безпеки в Україні. – НАПБ А.01.001-2014. – Чинний від 2014-12-30. – 84 с.
98. Оценка опасности токсического воздействия огнетушащих газов и аэрозолей, применяемых для объемного пожаротушения: методическое пособие. – Москва: ВНИИПО МВД России, 2005. – 85 с.
99. Иличкин В. С. Токсическая опасность огнетушащих аэрозолей: исследования и оценки. / В. С. Иличкин, Н. П. Копылов, Б. В. Потанин. // Пожарная безопасность.. – 2003. – №5. – С. 43–54.
100. Агафонов В. В. Установки аэрозольного пожаротушения: Элементы и характеристики, проектирование, монтаж и эксплуатация / В. В. Агафонов, Н. П. Копылов. – Москва: ВНИИПО, 1999. – 232 с.
101. Бандман А. Л. Вредные химические вещества. Углеводороды. Галогенпроизводные углеводородов: Справ, изд-е / А. Л. Бандман, Г. А. Войтенко, Н. В. Волкова. – Ленинград: Химия, 1990. – 732 с. – (Пожарная безопасность.).
102. Копылов Н. П. Галогенсодержащие пожаротушающие агенты: Свойства и применение / Н. П. Копылов. – Санкт-Петербург: ТЕЗА, 1999. – 127 с.
103. Гусев И. В. Токсичность средств газового пожаротушения / И. В. Гусев, В. С. Иличкин, С. Ю. Кисельников. – Москва: ГИЦ МВД СССР, 1988. – 37 с.
104. Кондрашов В. А. Токсические свойства и ПДК в воздухе рабочей зоны некоторых озонобезопасных хладонов / В. А. Кондрашов, А. С. Радилов, И. Е. Штаева. // Токсикологический вестник. – 1996. – №3. – С. 25.
105. Standart on Clean Agent Fire Extinguishing Systems 1994 Edition. NFPA № 2001. - 1994.
106. Иличкин В. С. Токсическая опасность огнетушащих аэрозолей: исследования и оценки / В. С. Иличкин, Н. П. Копылов, Б. В. Потанин. // Пожарная безопасность. – 2003. – №5. – С. 43.



107. Гусев И. В. Показатели токсичности аэрозолеобразующих средств объёмного тушения пожаров / И. В. Гусев, П. А. Эварестов. // Актуальные вопросы пожарной безопасности на транспорте. – 1994. – С. 23.
108. Иличкин В. С. Экспериментальное определение и оценка показателей токсической опасности огнетушащих аэрозолей / В. С. Иличкин, Н. П. Копылов, Б. В. Потанин. // Пожарная безопасность. – 2002. – №4. – С. 75.
109. Иличкин В. С. Актуальность, методические основы и критерии оценки токсической опасности огнетушащего аэрозоля / В. С. Иличкин, Б. В. Потанин, Г. И. Сидорин. // Пожаровзрывобезопасность. – 2000. – №5. – С. 44.
110. Правила безпеки для спиртового та лікєро-горілчаного виробництва. – ДНАОП 1.8.10-1.11-01. – Чинний від 1997-10-01. Державні Нормативні Акти з Охорони Праці – 224 с.

## ДОДАТОК А

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Затверджую

Директор ТзОВ «ГУРАЛЬНЯ БРУНИЦЬКИХ»

Олексій СІЛЬЧЕНКОВ

«16» квітня 2021 р.



## АКТ

### Впровадження результатів дисертаційної роботи Кравченка Антона Вікторовича

Комісія в складі: голови комісії – завідувача науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД ДСНС України п. Петровського В.Л., та членів комісії – наукового співробітника лабораторії п. Пастухова П.В., директора ТзОВ «ГУРАЛЬНЯ БРУНИЦЬКИХ» п. Сільченкова О. В. склали акт про те, що виготовлена за результатами дисертаційної роботи Кравченка А.В., система аерозольного підшарового пожежогасіння, в якості експериментального зразка, встановлена в резервуарі для зберігання спирту етилового ректифікованого об'ємом 5 м<sup>3</sup> ТзОВ «ГУРАЛЬНЯ БРУНИЦЬКИХ» за адресою: Львівська обл., Городоцький р-н, селище міського типу Великий Любінь, вул. Львівська, будинок 176.

Експериментальний зразок системи підшарового аерозольного пожежогасіння полярних горючих рідин (спиртів та їх сумішей), забезпечує ефективне гасіння в зоні горіння, а особливо біля бортів резервуару, де утворюється та існує кільце запалювання. Дисперсні тверді частинки аерозолу значно довший час перебувають в контакті із зоною хімічної реакції горіння в результаті чого, відбувається реалізація своїх вогнегасних властивостей (ефективніше відбувається інгібування твердими частинками ланцюгових реакцій полум'я, поглинання тепла із зони горіння при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладі твердих частинок), що в кінцевому етапі і визначає високу ефективність ліквідації горіння. Також аерозоль безперешкодно проникає

через шар горючої рідини, що особливо актуально в разі коли відбувається гасіння пожеж у резервуарах за наявності “кишень”.

Система підшарового пожежогасіння на основі аерозольоутворювальної суміші характеризується високою надійністю, ефективністю об’ємного пожежогасіння, значно меншим часом гасіння горючої рідини (у порівнянні із іншими видами гасіння) та тривалим терміном зберігання в черговому режимі, якій не потрібні спеціальні ємності для піноутворювачів, агрегати для подачі газів під надлишковим тиском, насосне обладнання, запірні арматури, генератори пін або розпилувачі, труби розгалужувачі, складні електронні системи управління тощо.

Експлуатація та зберігання експериментальної системи підшарового аерозольного пожежогасіння є нескладною.

Голова комісії:

завідувач науково-дослідної лабораторії

 Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Члени комісії:

науковий співробітник

 Павло ПАСТУХОВ

Директор ТзОВ «Гуральня Бруницьких»

 Олексій СІЛЬЧЕНКОВ



Затверджено  
Проектом науково-дослідної роботи  
ЛДУБЖД



Кузик А.Д.

03 березня 2019 р.

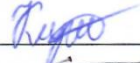
АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

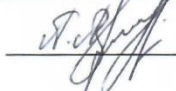
Кравченко Антона Вікторовича

Комісія в складі: голови комісії – старшого наукового співробітника відділу організації наукової діяльності к.т.н., с.н.с., Кириліва Я.Б, та членів комісії, завідувача науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУБЖД Петровського В.Л., наукового співробітника науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУБЖД к.т.н., Пастухова П.В., склали акт про те, що виготовлений за результатами дисертаційної роботи Кравченко Антона Вікторовича експериментальний взірець лабораторної установки підшарового аерозольного гасіння використовується при проведенні наукових досліджень магістрами, ад'юнктами та науково педагогічними працівниками університету у галузі пожежної безпеки.

Матеріали дисертаційної роботи також використані в лекційних матеріалах при викладанні дисципліни “Теорія розвитку та припинення горіння” на кафедрі фізики та хімії горіння навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Голова комісії  к. т. н., с.н.с. Ярослав КИРИЛІВ

Члени комісії  Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

 к.т.н. Павло ПАСТУХОВ

## ДОДАТОК Б

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ  
УСТАНОВКИ ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ НА  
ВОГНЕГАСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
 БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ  
 ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Свідоцтво про атестацію № РЛ 125/15 від 02.11. 2015 р.  
 Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

**ПРОТОКОЛ № 42/8/201026**  
 ВИПРОБУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ  
 ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ  
 НА ВОГНЕГАСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ

Львів-2021



**ПРОТОКОЛ № 42/8/201026**  
**ВИПРОБУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**  
**ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ**  
**НА ВОГНЕГАСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ**

**Дата проведення**  
**випробування:** *11.03.2021* р.

**Умови в приміщенні:**  
 температура, °С  
 атм.тиск, кПа  
 відносна вологість, %

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ:** Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУ БЖД.  
 Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

**ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ:** Установа підшарового аерозольного гасіння УАПГ-1  
 Зразок установки наданий Замовником 06.10.2021 р.

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ:**

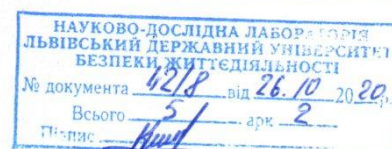
Установа підшарового аерозольного гасіння ємності з горючою рідиною розмірами 878 мм х 585 мм. Надані зразки АУС вагою від 5 до 75 г. Горюча рідина – суміш рівних частини бензину та бутанолу 30л.

Перед проведенням випробувань зразки АУС сушилися протягом 48 годин за температури повітря ( $40 \pm 2$ ) °С та відносної вологості повітря ( $50 \pm 5$ ) %.

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Установа УПГ-1 згідно з ДСТУ 8829:2019 і засоби виміральної техніки, які перелічено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Засоби виміральної техніки

№ п/п	Найменування	Діапазон вимірювання	Клас точності або похибка засобу виміральної техніки
	Секундомір СОПр	Від 0 с до 3600 с;	Кл. точн. 2
	Лінійка вимірвальна	Від 0 мм до 1000 мм	$\pm 0,5$ мм
	Ваги ТВІ - 150	Від 0.01 до 150,0 кг	Кл. точн. 4





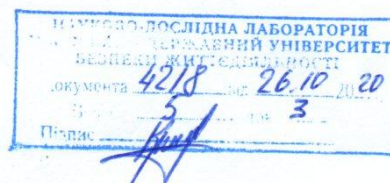
### Методика визначення вогнегасної ефективності підшарового аерозольного гасіння

Експериментальна установка підшарового аерозольного гасіння (Рис.1.) для полігонних випробувань представляє собою циліндричну ємність з висотою 878 мм та діаметром 585 мм, в якій на відстані 300 мм від дна встановлено вихідний патрубок з діаметром 30 мм, для подавання вогнегасного аерозолю. Утворення вогнегасного аерозолю відбувалось у генераторі вогнегасного аерозолю, який розташований вище рівня в ємності, та з'єднаний з резервуаром подаючим трубопроводом який містить вентиль та вихідні патрубки на кінці.

Для проведення експерименту було підібрано матеріали, а саме - аерозольотворюючу суміш на базі нітрату калію та сахарози, маса якої складала від 5 до 75 грамів. Масу аерозольотворюючої суміші підбирали з розрахунку гасіння полум'я в умовно герметичному об'ємі, з трьохкратним запасом, тобто в більшому об'ємі за об'єм незаповненої частини резервуару. В якості палива було використано суміш бензину та бутанолу.

Методика з визначення ефективності підшарового гасіння вогнегасним аерозолем полягала у наступному:

1. Аерозольотворювальний заряд з запалом розташовують у генераторі вогнегасного аерозолю, який під'єднаний до подаючого трубопроводу.
2. В ємність заливали 30 л суміші бензину з бутанолом на водній подушці. Суміш підпалювали та чекали 60 секунд, після чого подавали електричний імпульс на аерозольотворювальний заряд, який підпалювався та утворював аерозоль.
3. Утворений аерозоль подавався на нижній рівень резервуару через подаючий трубопровід з перекирвним вентилем та зворотнім клапаном, яким потік аерозолю направлявся на розпридільник по резервуару та виходив через вихідні сопла під шар рідини.
4. Після початку виходу аерозолю з палаючого спирту фіксували час гасіння, або відповідно не гасіння полум'я на поверхні спирту.



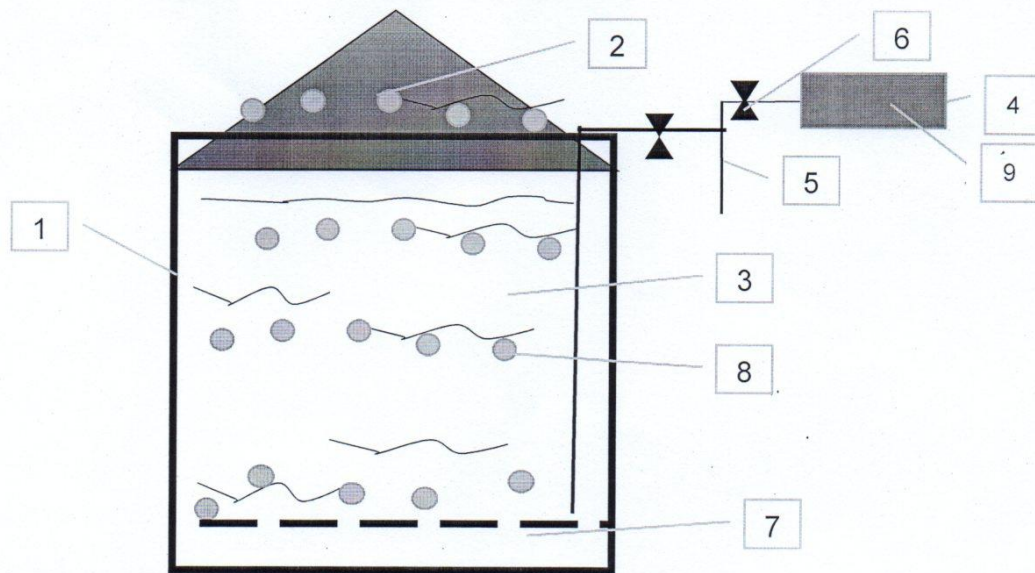


Рисунок 1. Експериментальна установка для визначення ефективності параметрів підшарового гасіння.

1 – резервуар. 2 – полум'я. 3 – горюча рідина. 4 – генератор вогнегасного аерозолу. 5 – трубопровід. 6 – перекривний вентиль. 7 – вихідні патрубки. 8 – бульбашки аерозолу. 9- Заряд АУС.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Результати випробувань на визначення ефективності підшарового аерозольного гасіння наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Параметри підшарового аерозольного пожежогасіння

№	Маса заряду АУС (г).	Час горіння АУС (с)	Час гасіння при підшаровій подачі с.	Примітка
1	5	12	-	Зменшення розмірів полум'я
2	10	12	-	Зменшення розмірів полум'я
3	15	14	-	Зменшення розмірів полум'я
4	25	14	-	Зменшення розмірів полум'я
5	25	15	17	Зменшення розмірів полум'я
6	40	15	18	розбризування
7	50	17	16	розбризування
8	75	18	14	розбризування

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
№ документа 4218 від 26.10.2020 р.  
Всього 3 арк 4  
Підпис

**ВИСНОВОК :**

Результати експерименту з визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння показали, що мінімальна вага АУС яка забезпечує гасіння спирту становить 25 грам, при цьому спостерігалось розбризкування рідини, зменшення розмірів полум'я та гасіння. Збільшення ваги АУС призводило до зменшення часу гасіння та інтенсивнішого розбризкування рідини.


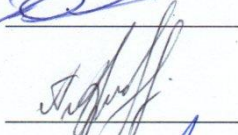

**Примітка:**

1. Протокол стосується тільки зразка експериментальної установки підшарового аерозольного гасіння УАПГ-1.
2. Всього листів 5.

Завідувач  
НДЛ ПБ ЛДУБЖД  
Науковий співробітник,  
НДЛ ПБ ЛДУБЖД



Ад'юнкт ЛДУБЖД

Віталій ПЕТРОВСЬКИЙ

Павло ПАСТУХОВ

Антон КРАВЧЕНКО

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ	
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ	
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	
№ документа <u>4218</u>	від <u>26.10</u> 20 <u>20</u> р.
Всього <u>5</u>	арк <u>5</u>
Підпис 	

## ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ НА  
ЛАБОРАТОРНІЙ УСТАНОВЦІ



ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ  
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Свідоцтво про атестацію № РЛ 125/15 від 02. 11. 2015 р.  
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

**ПРОТОКОЛ № 43/8/201026**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ**  
**ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ**  
**НА ЛАБОРАТОРНІЙ УСТАНОВЦІ**

Львів-2021

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ	
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ	
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	
№ документа <u>43/8</u>	від <u>26.10</u> 20 <u>20</u>
Всього <u>5</u>	арк <u>1</u>
Підпис: <u>[Signature]</u>	

**ПРОТОКОЛ №43/8/201026**  
**ВИПРОБУВАНЬ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ**  
**ПІДШАРОВОГО АЕРОЗОЛЬНОГО ГАСІННЯ**  
**НА ВОГНЕГАСНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ**

**Дата проведення**

**випробування:** 11.03.2020р.

**Умови в приміщенні:**

температура, °С

атм.тиск, кПа

відносна вологість, %

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ:** Теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії пожежної безпеки ЛДУ БЖД.  
 Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

**ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ:** Лабораторна установка підшарового аерозольного гасіння ЛУАПГ-1  
 Зразок установки наданий Замовником 11.03.2020 р.

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ:**

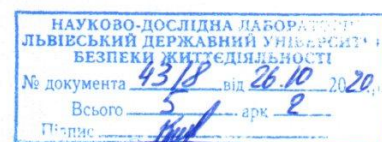
Лабораторна установка підшарового аерозольного гасіння ємності з горючою рідиною з розмірами, ширина - 153мм довжина - 153мм та висота - 185мм. Надані зразки АУС вагою від 5 до 75 г. Горючі рідини – метанол, етанол, бутанол, пропанол, ізопропанол.

Перед проведенням випробувань зразки АУС сушилися протягом 48 годин за температури повітря ( $40 \pm 2$ ) °С та відносної вологості повітря ( $50 \pm 5$ ) %.

**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:** Установка УПГ-1 згідно з ДСТУ 8829:2019 і засоби вимірювальної техніки, які перелічено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Засоби вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування	Діапазон вимірювання	Клас точності або похибка засобу вимірювальної техніки
	Секундомір СОПпр	Від 0 с до 3600 с;	Кл. точн. 2
	Лінійка вимірювальна	Від 0 мм до 1000 мм	$\pm 0,5$ мм
	Ваги ТВІ - 150	Від 0.01 до 150,0 кг	Кл. точн. 4



### Лабораторна методика визначення ефективності підшарового гасіння вогнегасними аерозолями

Лабораторна установка (рис.1) для визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння вогнегасним аерозолем представляє собою ємність з нержавіючої сталі з такими розмірами, - ширина - 153мм довжина - 153мм та висота - 185мм.

Методика з визначення ефективності підшарового гасіння полягає в тому, що АУС зважується, поміщається в прийомну камеру та герметизується, після чого спирт підпалюється та горить 60 секунд. Після досягнутого стабільного горіння спирту електричним запальником підпалюється АУС який утворює аерозоль, що під тиском поступає на розподільник який розташований на дні ємності. Далі аерозоль барботується через шар рідини та виходить на її поверхню, звідки він потрапляє в зону горіння. З метою забезпечення відповідної швидкості горіння АУС, з нього були виготовлені циліндри з визначеним діаметром, що забезпечувало його рівномірну масову швидкість згорання. Масову швидкість горіння АУС визначали на вагах де розміщували АУС відповідної конфігурації, підпалювали, та фіксували час горіння. Масову швидкість горіння або інтенсивність гасіння було отримано в результаті поділу маси АУС на час горіння.

В якості аерозольоутворювальної суміші (АУС) використовували суміш сахарози – 34% та нітрату калію -66%.

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ			
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ			
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДИЯЛЬНОСТІ			
№ документа	4318	від	26.11.2020р.
Всього	3	арк	3
Підпис	<i>[Handwritten Signature]</i>		

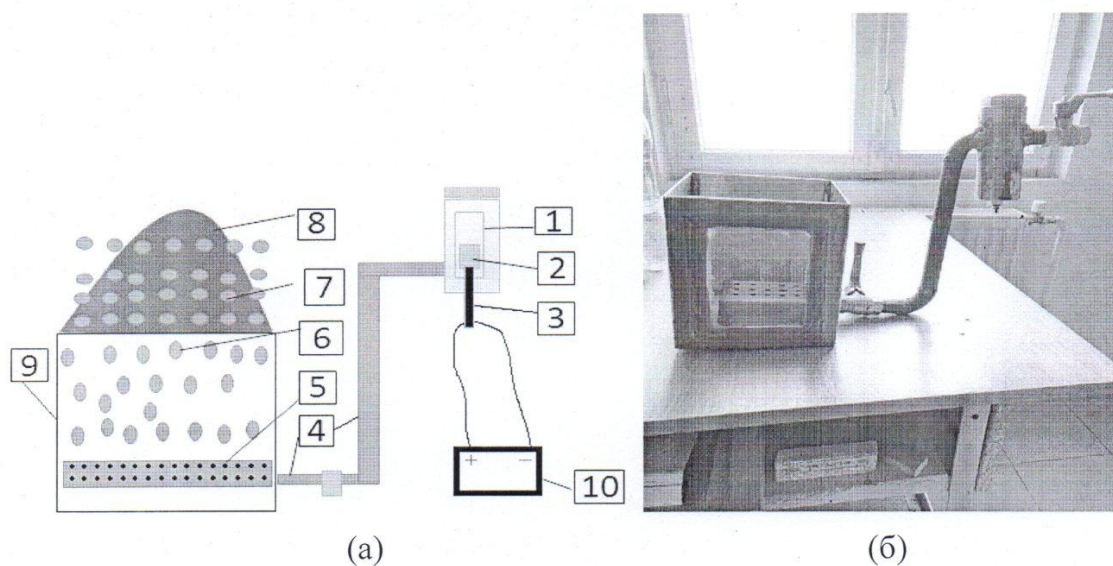


Рисунок 3.3. Установка для визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння спиртів.

1. Приймочна камера. 2. Заряд АУС визначеної конфігурації. 3. Джерело запалювання. 4. Трубопровід. 5. Розподільник аерозолю. 6. Бульбашки аерозолю. 7. Частинки аерозолю в зоні горіння. 8. Дифузійне полум'я спирту. 9. Теплоізолятор. 10. Джерело електричного струму.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ:

Результати випробувань на визначення ефективності підшарового аерозольного гасіння на лабораторній установці наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Вогнегасні інтенсивності подачі аерозолю при гасінні спиртів.

№	Горюча рідина	Аерозоль		Час гасіння, с
		Підшарова подача, г/с	Повна маса АУС, г	
1	Метанол	3,3	33	10
	Етанол	2,3	23,5	
2	Бутанол	1,375	22	16
3	Ізопропанол спирт	1,59	20	17,25
4	Ізоаміловий спирт	1,07	20,5	19

Результати фотофіксації підшарового гасіння аерозолем бутанолу наведено на рис.2





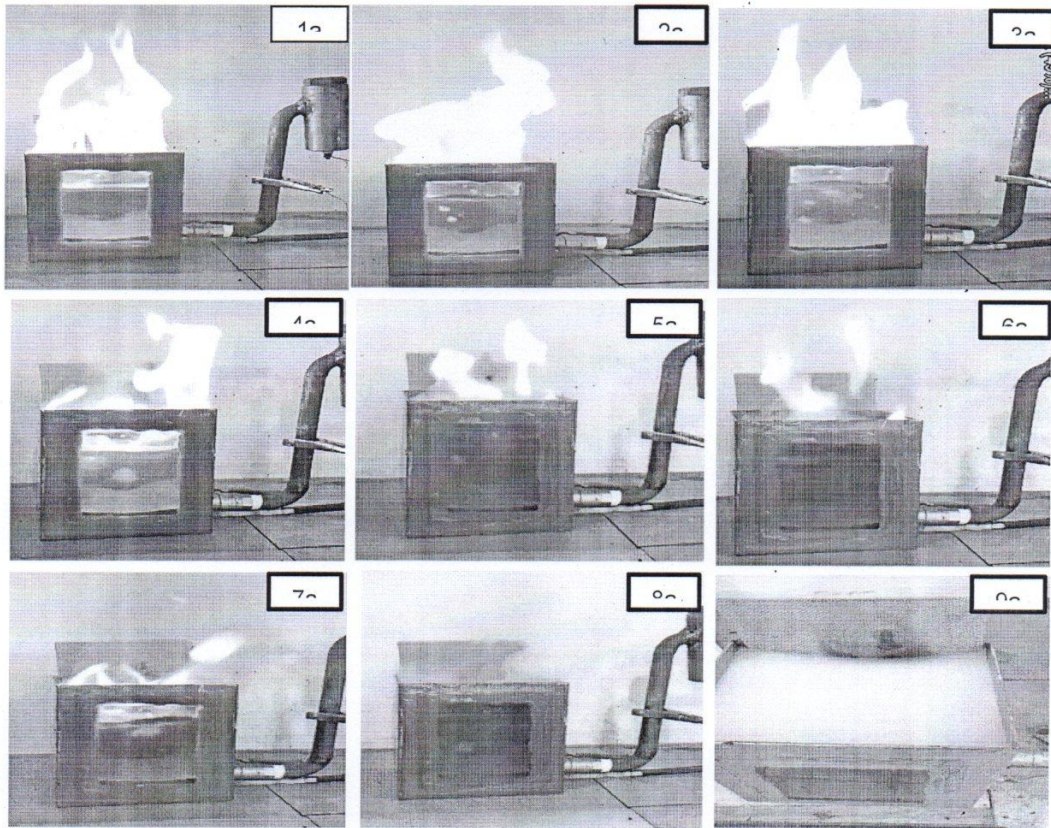


Рисунок 2. Результати фотофіксації підшарового гасіння аерозолем бутанолу на лабораторній установці ЛУАПГ-1.

### ВИСНОВОК :

Результати експерименту з визначення вогнегасної ефективності підшарового гасіння показали, що підшарове подавання вогнегасного аерозолу забезпечує ефективне гасіння спиртів, при цьому спостерігалось активне перемішування рідини, зменшення розмірів полум'я та її гасіння.

### Примітка:

1. Протокол стосується тільки зразка експериментальної установки підшарового аерозольного гасіння УАПГ-1.
2. Всього листів 5.

Завідувач

НДІ ПБ ЛДУБЖД

Науковий співробітник, кат. прія

НДІ ПБ ЛДУБЖД

Ад'юнкт ЛДУБЖД



*[Handwritten signature]*

Віталій Петровський

*[Handwritten signature]*

Павло Пастухов

*[Handwritten signature]*

Антон Кравченко

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ  
Львівський державний університет  
безпеки життєдіяльності

№ документа 4318 від 26.10 2022 р.

Всього 5 арк 5

Титул Ад'юнкт

## ДОДАТОК Г

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ****Журнал у наукометричній базі Scopus**

1. Баланюк В. М., Кравченко, А. В., Гарасим'юк, О. І. (2021). Зменшення інтенсивності теплового випромінювання при підшаровому гасінні спиртів екологічно прийнятними аерозолями. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10 (109)), 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225216>

**Наукові статті у фахових виданнях**

2. Проблеми гасіння пожеж спиртів та їх сумішей / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, Ю. О. Копистинський, А. В. Кравченко // *Пожежна безпека*. - 2018. - № 33. - С. 5-9. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.01

3. Спосіб підшарового гасіння спиртів вогнегасним аерозолем / В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, А.В. Кравченко / *Технічні науки. Scientific Journal «ScienceRise» №1(54)2019*, 11-15. 2019 DOI: 10.15587/2313-8416.2019.156097

4. Перспективи аерозольного підшарового гасіння спиртів / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, А. В. Кравченко // *Пожежна безпека*. 35, 5-9. DOI: 10.32447/20786662.35.2019.01

5. Підшарове гасіння спиртів бінарними сумішами вогнегасного аерозолю та CO<sub>2</sub> / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, А.В. Кравченко, О.І. Гарасим'юк // *Пожежна безпека*. 36, 5-9. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.01

6. Деякі температурні характеристики підшарового аерозольного гасіння спиртів / В. М. Баланюк, Н. М. Козяр, А.В. Кравченко // *Пожежна безпека*. 37, 11-15. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.02>

**Інші видання**

7. Баланюк В. М., Кравченко А. В., Козяр Н. М., Гарасим'юк О. І., Копистинський Ю. О. Синергізм чинників при підшаровому аерозольному гасінні спиртів у резервуарах // *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*.

**Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

8. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Кравченко А.В. Підшарове гасіння пожеж резервуарів з спиртами вогнегасним аерозолем. The 9th International conference —Science and society (February 1, 2018) Accent Graphics Communications & Publishing, Hamilton, Canada. 2019. 1359 p. С 239 -243.

9. Баланюк В. М., Кравченко А. В. Переваги аерозольного підшарового гасіння спиртів. Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали ІХ Всеукраїнської науковопрактичної конференції з міжнародною участю. – Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2019. – 137-139 с.

10. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Кравченко А.В. Вогнегасна та флегматизувальна ефективність бінарних газоаерозольних систем. Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції (за міжнародною участю). Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах: – Електронне видання комбінованого використання. – Київ: ІДУЦЗ, 2019. – 25-27С.

11. Баланюк В. М., Козяр Н. М., Гарасим'юк О. І., Кравченко А. В. К вопросу использования огнетушащего аэрозоля для подслоного тушения спиртов. Science and education: problems, prospects and innovations. Abstracts of II International Scientific and Practical Conference Kyoto, Japan. 4-6 November. 2020 С. 232 -236.

12. Баланюк В.М., Козяр Н.М., Гарасим'юк О.І., Кравченко А.В. Екологічно прийнятні вогнегасні бінарні газоаерозольні суміші. Матеріали І Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека об'єктів туристично-рекреаційного комплексу» м. Львів, 5-6 грудня 2019 р. С

13. Баланюк В.М., Кравченко А.В., Гарасим'юк О.І., Екологічні переваги підшарового аерозольного гасіння. Матеріали ІV Міжнародної науково-практичної конференції. 26 березня 2021 р. Електронне видання комбінованого використання - м. Львів 2021. – 25-27 С.