

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ
ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Мирошкін Володимир Сергійович

УДК 614.844:614.845

ДИСЕРТАЦІЯ
ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ГОРЮЧИХ РІДИН ВОГНЕГАСНИМИ
АЕРОЗОЛЯМИ НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРІ

Спеціальність 261 – пожежна безпека

Галузь знань 26 - цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Володимир МИРОШКІН

Науковий керівник:
доктор технічних наук,
доцент
Володимир БАЛАНЮК

Львів-2026

АНОТАЦІЯ

Мирошкін В. С. Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 Пожежна безпека, галузь знань 26 Цивільна безпека. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Львів, 2026.

У дисертації на підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень розв'язано науково-прикладну задачу підвищення ефективності гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі шляхом обґрунтування та впровадження технології застосування вогнегасних аерозолів. Запропоновані рішення базуються на встановленні закономірностей формування аерозольної хмари, її взаємодії з полум'ям і тепловим випромінюванням, а також на розробленні математичних моделей та практичних рекомендацій щодо використання автономних генераторів вогнегасного аерозолу для захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Обґрунтовано теоретичні засади застосування вогнегасних аерозолів для припинення горіння горючих рідин на відкритому просторі. Встановлено, що вогнегасна дія аерозолу реалізується за рахунок поєднання механізмів інгібування ланцюгових реакцій горіння, зниження температури полум'я та екранування теплового випромінювання дисперсною газотвердою хмарою. Показано, що ефективність аерозольного пожежогасіння визначається параметрами формування аерозольної хмари, дисперсним складом частинок, умовами подачі та характеристиками осередку пожежі.

Розроблено математичну модель процесів перенесення аерозолі, тепло- та масообміну в системі «джерело горіння – аерозольна хмара – навколишнє середовище», яка дозволяє оцінювати параметри поширення аерозолі та прогнозувати ефективність його застосування для гасіння горючих рідин на відкритому просторі. На основі чисельного моделювання встановлено закономірності зміни концентрації аерозолі та рівня зниження теплового потоку залежно від відстані до осередку пожежі та умов подачі вогнегасної речовини.

Удосконалено методичний підхід до оцінювання вогнегасної ефективності аерозолів шляхом комплексного врахування часу гасіння, ступеня зниження теплового випромінювання та стійкості вогнегасного ефекту. Це дало змогу визначити основні фактори, які впливають на ефективність пожежогасіння у відкритому середовищі, та встановити межі практичного застосування аерозольних систем.

Розроблено експериментальну установку та методику дослідження процесів гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями, що забезпечує реєстрацію параметрів теплового випромінювання, характеристик аерозольної хмари та показників вогнегасної ефективності. Проведено серію лабораторних і натурних експериментів, у результаті яких підтверджено можливість суттєвого зниження теплового впливу пожежі та ефективного припинення горіння горючих рідин за допомогою автономних генераторів вогнегасного аерозолі.

Набули подальшого розвитку наукові положення щодо використання аерозольних технологій для захисту відкритих технологічних майданчиків, резервуарних парків, енергетичних підстанцій та інших об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновано технологічну схему інтеграції аерозольних систем пожежогасіння до складу комплексного протипожежного захисту

відкритих об'єктів з урахуванням вимог автономності, відмовостійкості та функціонування в умовах воєнного часу.

Виконано техніко-економічну оцінку впровадження аерозольних систем пожежогасіння. Встановлено, що їх застосування забезпечує скорочення часу реагування на пожежу, зменшення потреби у водних ресурсах та піноутворювачах, підвищення безпеки особового складу й зниження потенційних збитків від пожеж на об'єктах критичної інфраструктури.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розроблених методик, моделей і рекомендацій під час проектування та впровадження автономних аерозольних систем пожежогасіння на відкритих промислових об'єктах, резервуарних парках, енергетичних підстанціях та інших об'єктах підвищеної пожежної небезпеки.

Ключові слова: пожежна безпека, горючі рідини, пожежогасіння, вогнегасний аерозоль, генератор вогнегасного аерозолю, теплове випромінювання, тепловий потік, математичне моделювання, критична інфраструктура, відкритий простір.

ABSTRACT

Myroshkin V. S. Extinguishing flammable liquid fires with fire-extinguishing aerosols in open space. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 261 Fire Safety, Field of Knowledge 26 Civil Safety. Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2026.

The dissertation solves the scientific and applied problem of improving the efficiency of extinguishing flammable liquid fires in open spaces through

the substantiation and implementation of a fire-extinguishing aerosol technology. The proposed solutions are based on establishing the patterns of aerosol cloud formation, its interaction with flame and thermal radiation, as well as on the development of mathematical models and practical recommendations for the use of autonomous aerosol generators for the protection of critical infrastructure facilities.

The theoretical foundations of the use of fire-extinguishing aerosols for suppressing flammable liquid fires in open environments are substantiated. It has been established that the extinguishing effect is achieved through a combination of flame inhibition, temperature reduction and shielding of thermal radiation by a dispersed gas-solid aerosol cloud. The effectiveness of aerosol fire suppression depends on aerosol generation parameters, particle size distribution, discharge conditions and fire source characteristics.

A mathematical model of aerosol transport, heat and mass transfer in the “fire source – aerosol cloud – environment” system has been developed. The model makes it possible to assess aerosol distribution parameters and predict extinguishing efficiency under open-space conditions. Numerical simulations have revealed the regularities of aerosol concentration distribution and thermal radiation attenuation depending on the distance from the fire source and the operating parameters of the aerosol generator.

An improved methodological approach for evaluating aerosol extinguishing efficiency has been developed based on a comprehensive assessment of extinguishing time, reduction of thermal radiation and stability of the extinguishing effect. This approach made it possible to identify the key factors influencing extinguishing efficiency and determine the practical limits of aerosol system application in open environments.

An experimental facility and a research methodology for studying the suppression of flammable liquid fires by fire-extinguishing aerosols have been

developed. The proposed methodology enables the registration of thermal radiation parameters, aerosol cloud characteristics and extinguishing performance indicators. A series of laboratory and field experiments confirmed the possibility of significantly reducing thermal exposure and effectively suppressing flammable liquid fires using autonomous aerosol generators.

The scientific provisions concerning the use of aerosol technologies for the protection of open industrial sites, tank farms, electrical substations and other critical infrastructure facilities have been further developed. A technological scheme for integrating aerosol fire suppression systems into comprehensive fire protection systems has been proposed, taking into account the requirements of autonomy, reliability and operation under wartime conditions.

A technical and economic assessment of aerosol fire suppression systems has been carried out. Their application provides a reduction in fire response time, decreases the demand for water resources and foam concentrates, improves firefighter safety and reduces potential fire losses at critical infrastructure facilities.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed methods, models and recommendations for the design and implementation of autonomous aerosol fire suppression systems at industrial facilities, tank farms, power substations and other high-risk fire protection objects.

Keywords: fire safety, flammable liquids, fire suppression, fire-extinguishing aerosol, aerosol generator, thermal radiation, heat flux, mathematical modelling, critical infrastructure, open space.

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. Volodymyr Balanyuk*, **Volodymyr Myroshkin**, Oleksandr Harasimiuk, Yurii Kopystynsky Стаття «Screening Ability of Environmentally Friendly Aerosols for Thermal Radiation» Scientific.Net. Publisher in Materials Science & Engineering Trans Tech Publications. Materials and Energy Engineering. Key Engineering Materials Vol. 954. Zurich, Switzerland Protection 08.2023. P. 195-200. <https://doi.org/10.4028/p-PQs6tx>;

2. BALANYUK Volodymyr 1,a*, **MYROSHKIN Volodymyr 2,b,,** KOPYSTINSKY Yurii 4,d, GARASYMYUK Oleksandr, GIRSKUY Oleg, GUSAR Nazar Стаття «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» Key Engineering Materials (Volume 1020) Publisher in Materials Science & Engineering Trans Tech Publications Ltd (Zurich, Switzerland) August 2025 p. 141-151 <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>

3. Roman Palchykov, Vadym Nizhnyk, Viktor Mykhailov, Yevhen Linchevskiy, Vasyl Loik, Roman Lozynskiy, Roman Sukach, Dmytro Voytovych, Marta Peleshko, and **Volodymyr Myroshkin**. Стаття «Application of time/temperature fire curves for the estimation of fire resistance of transformer within protective structures» подано до Metallurgical & Materials engineering ISSN / eISSN: 2217-8961 / 2812-9105 <https://doi.org/10.63278/1393>.

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Balanyuk, V., **Myroshkin, V.**, Korystynsky, Y., Hirskyi, O., & Gerasimiuk, O «Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин» Збірник наукових праць «*Пожежна безпека*» 2022. №41. С. 12-19 <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.02>;

2. Balanyuk, V., Hirskyi O., Garasimiyuk, O., **Myroshkin, V.**, & Rykus, V. «Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні» *Вісник ЛДУ БЖД* 2022. №26. С. 67-72 <https://doi.org/10.32447/20784643.26.2022.08>;

3. Balanyuk, V., **Myroshkin, V.**, Huzar, N., Garasimiyuk, O., & Korystynskyi, Y. Стаття «Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів» *Пожежна безпека*, 43,13 20 <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02>

4. Balanyuk, V. M., **Myroshkin, V. S.**, Huzar, N. I., Rykus, V. S., & Girskyi, O. I. Стаття «Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. *Пожежна безпека*, 45, 5-9.; <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.01>

5. Мирошкін В. Пелешко М. Ковалишин В. Грідасов І. Стаття «Нормативно-правове забезпечення безпеки під час використання похилих підйомників для евакуювання людей в разі пожежі» *Пожежна безпека*, 46,89-96; <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.09>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. В.М. Баланюк, О.І. Герасим'юк, Ю.О. Копистинський, П.В. Пастухов, **В.С. Мірошкін**, О.І. Гірський «Умови та перспективи застосування вогнегасного аерозолю для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки» Актуальні проблеми пожежної безпеки та

запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської наук.-прак. конф. з міжн. участю м. Львів 12-13 жовтня 2022р. С. 291-295;

2. В. БАЛАНЮК, О. ГІРСЬКИЙ, **В. МИРОШКІН**, В. ПИКУС «Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні» Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції м. Черкаси 27 квітня 2023р. С. 127-129;

3. Пастухов П.В. Баланюк В. М., **Мирошкін В.С.**, Гарасим'юк О.І. «Особливості екранування теплового випромінювання вогнегасними аерозолями» Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків 19 травня 2023 року с. 214-216;

4. Олег ГІРСЬКИЙ Володимир БАЛАНЮК, **Володимир МИРОШКІН**, Назарій ГУЗАР, Олександр ГАРАСИМ'ЮК «Перспектива гасіння розливів горючих рідин об'ємними засобами пожежогасіння» XV Міжнародна науково-практична конференція Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій 2024/4/25 с. 7-8;

5. Володимир Баланюк, **Володимир Мирошкін**, Назар Гузар, Олег Гірський, Віктор Пикус «Визначення параметрів ефективності використання вогнегасного аерозолю на відкритому просторі» Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення 13 грудня 2024 року

6. Володимир Мірчович Баланюк, **Володимир Сергійович Мирошкін**, Назарій Ігорович Гузар, Олександр Іванович Гарасим'юк, Олег Ігорович Гірський «Аналіз ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях» 2024/4/25 XV Міжнародна науково-практична

конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» с. 8-9;

7. Баланюк В., **Мирошкін В.** Банерна доповідь «Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі» 8-й міжнародний симпозіум молодих вчених «Smart lion» «Війна в Україні. Види медичного втручання»;

8. **Мирошкін В.**, Баланюк В. Пазен О Тези «Проблематика забезпечення інклюзивності шляхів евакуації на діючих об'єктах в Україні» IV міжнародна науково-практична конференція з нагоди відзначення Дня прав людини. С. 302-306 <https://docs.google.com/document/d/1XxMmDhdtEL7BMvsfIbqjA7Lz8Yww7jum/edit?tab=t.0>

9. Баланюк В. М., Гузар Н. І., **Мирошкін В. С.**, Гірський О. І., Пикус С. Небезпечні чинники пожеж на трансформаторних підстанціях в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

10. Баланюк В. М., Гузар Н. І., **Мирошкін В. С.**, Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

11. Грідасов І., Пелешко І., Ковалишин М., **Мирошкін В. С.** Напрямки вдосконалення підготовки фахівців у сфері цивільного захисту в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

12. **Мирошкін В. С.** Злочинна недбалість у сфері пожежної безпеки критичної інфраструктури: проблеми кримінально-правової відповідальності. Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності сил сектору безпеки і оборони: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції. 2025.

13. **Мирошкін В. С.** Пожежі на нафтобазах унаслідок обстрілів: екологічні ризики пінного гасіння горючих рідин. Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.

14. **Мирошкін В. С.** Адаптивні системи пожежогасіння для об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням змінних загроз та умов експлуатації. Інновінг сучасних трендів в менеджменті безпеки: національна безпека та оборона: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 23 травня 2025 р.

15. Баланюк В. М., **Мирошкін В. С.** Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі. Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.

16. Баланюк В. М., **Мирошкін В. С.**, Гузар Н. І. Щодо питання моделювання параметрів концентрації та геометрії аерозольної хмари під час гасіння горіння на відкритому просторі. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій» Черкаси. 21 травня 2026 року с. 8

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОЦЕСІВ ПРОГРІВУ ТА ВИГОРАННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ.....	24
1.1 Процес горіння горючих рідин	24
1.1.1 Аналіз пожеж та особливостей горіння горючих рідин на промислових об'єктах	24
1.1.2. Процес теплопередачі та випаровування горючих рідин у зону горіння.....	29
1.1.3 Теплопровідність та прогрів горючих рідин у глибину під час горіння.....	31
1.1.4 Закономірності вигорання горючих рідин із вільної поверхні.....	33
1.2 Процеси горіння та пожежогасіння горючих рідин у резервуарах і розливах.....	35
1.2.1. Умови виникнення та розвиток горіння горючих рідин у резервуарах.....	35
1.2.2. Теплові процеси та температурні режими під час пожеж горючих рідин	38
1.2.3. Особливості гасіння розливів горючих рідин вогнегасними засобами.....	44
1.2.4. Порівняльна ефективність вогнегасних засобів при гасінні горючих рідин	47
Висновки до розділу 1.....	55
Розділ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН ВОГНЕГАСНИМИ АЕРОЗОЛЯМИ НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ.....	58
2.1. Особливості гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями.....	58

2.1.1. Фізико-хімічні процеси формування та розповсюдження вогнегасного аерозолію	58
2.2.2 Екрануюча здатність екологічно прийнятними аерозолями теплового випромінювання.....	62
2.2. Математичне моделювання процесів гасіння аерозолями на відкритому просторі.....	64
2.2.1. Загальні припущення та граничні умови моделі.....	64
2.2.2. Диференціальні рівняння тепломасообміну та динаміки частинок ...	69
2.2.3. Чисельне моделювання в середовищі SolidWorks Flow Simulation / ANSYS Fluent.....	76
2.3. Методики експериментальних досліджень ефективності гасіння.....	86
2.4. Обґрунтування експериментальних параметрів і вибору засобів	91
Висновки до розділу 2.....	98

Розділ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ТА ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АЕРОЗОЛІЮ

3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень	101
3.2. Умови та методика проведення експериментів	105
3.3 Експериментальне дослідження параметрів вогнегасної ефективності аерозолів на відкритому просторі	110
3.4. Математичне моделювання параметрів розповсюдження вогнегасного аерозолію	125
3.5. Числове моделювання процесу гасіння горючих рідин аерозолем	127
3.5.1. Приклад розрахунку параметрів числової моделі.....	131
3.6. Рекомендації щодо практичного застосування аерозольних систем для об'єктів критичної інфраструктури.....	133
Висновки до розділу 3.....	136

Розділ 4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....

4.1 Загальні положення та концепція впровадження.....	140
4.2 Технологічна схема інтеграції аерозольної системи пожежогасіння	144

	14
4.3 Верифікація результатів та дослідно-промислове випробування.....	147
4.4 Техніко-економічна оцінка впровадження аерозольної системи пожежогасіння.....	149
4.5. Екологічна та санітарно-гігієнічна оцінка безпечності	151
4.6. Рекомендації щодо впровадження результатів у практику	154
Висновки до розділу 4.....	156
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	163
ДОДАТКИ	178
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	179
Додаток Б. Протоколи випробування науково-дослідної лабораторії.....	185
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	187
Додаток Г. Відомості про апробацію результатів дисертації.....	188

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Проблема ефективного та швидкого гасіння пожеж горючих і легкозаймистих рідин залишається однією з найбільш складних для вирішення у сучасній системі пожежної безпеки. Пожежі, пов'язані з горінням бензину, сирої нафти, мазуту, спиртів та інших вуглеводневих рідин, характеризуються високою інтенсивністю теплового випромінювання, швидким поширенням полум'я, утворенням токсичних продуктів згорання та значним потенціалом переходу у масштабні надзвичайні ситуації. Особливо небезпечними є пожежі на резервуарних парках, паливних складах, об'єктах нафтогазової та енергетичної інфраструктури, де можливе послідовне ураження взаємопов'язаних технологічних вузлів і виникнення ефекту «ланцюгового пошкодження» з великими матеріальними збитками та загрозою для життя людей.

Умови воєнного стану додатково ускладнюють зазначену проблему через цілеспрямовані ураження об'єктів критичної інфраструктури, зокрема електричних підстанцій, нафтобаз, логістичних центрів, промислових майданчиків. Руйнування будівель і споруд, пошкодження резервуарів, трубопроводів, кабельних естакад, обмежений доступ пожежно-рятувальної техніки, а також загроза повторних вибухів і вторинних загорянь істотно знижують ефективність традиційних систем пожежогасіння. У цих умовах особливої ваги набувають технології, здатні працювати автономно — без розгалужених трубопровідних мереж, стаціонарних насосних станцій та залежності від зовнішнього енергоживлення.

Наявні підходи до гасіння горючих рідин — пінні, водяні, порошкові та газові засоби — мають низку обмежень, пов'язаних із потребою у значних запасах води та піноутворювачів, складністю подачі в зону горіння на відкритих майданчиках, високою трудомісткістю розгортання й обслуговування, корозійним впливом, а також потенційними екологічними ризиками. Разом з тим розвиток аерозольних вогнегасних технологій

засвідчив їх високу ефективність при захисті замкнених і напівзамкнених об'ємів завдяки поєднанню хімічного гальмування реакцій горіння та зменшення теплового впливу газотвердою хмарою частинок. Проте можливості аерозольних систем при гасінні пожеж горючих рідин у відкритому середовищі, зокрема на об'єктах критичної інфраструктури, досліджені недостатньо, а питання кількісної оцінки зниження теплового потоку під дією аерозольної хмари та техніко-економічної доцільності її застосування залишаються відкритими.

Таким чином, науково-практичною проблемою, що потребує розв'язання, є обґрунтування та експериментальна перевірка можливості ефективного гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі із використанням автономних генераторів вогнегасного аерозолію, встановлення закономірностей зниження теплового впливу аерозольною хмарою та розроблення рекомендацій щодо впровадження таких систем для захисту об'єктів критичної інфраструктури, у тому числі в умовах воєнного часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційні дослідження виконувалися відповідно до тематичного напрямку наукових робіт Львівського державного університету безпеки життєдіяльності та узгоджуються з державними пріоритетами у сфері забезпечення пожежної та техногенної безпеки в умовах воєнного стану. Робота пов'язана з науково-дослідною темою «Вдосконалення технології гасіння пожеж вуглеводневих рідин та матеріалів в обмежених об'ємах та важкодоступних місцях» (№ ДР 0122U200151), у рамках якої здійснювався

розвиток теоретичних та експериментальних підходів до використання сучасних вогнегасних речовин та автономних систем пожежогасіння. Отримані в дисертації результати логічно продовжують зазначені дослідження, переносячи акцент на відкритий простір та об'єкти критичної інфраструктури.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі шляхом теоретичного обґрунтування, експериментального дослідження та практичної реалізації технології застосування вогнегасних аерозолів з урахуванням їх впливу на теплове поле пожежі та особливостей функціонування на об'єктах критичної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі основні *завдання*:

- виконати аналіз сучасного стану проблеми гасіння пожеж горючих рідин, узагальнити переваги та недоліки традиційних засобів пожежогасіння і визначити місце аерозольних технологій у системі протипожежного захисту відкритих об'єктів;

- теоретично обґрунтувати доцільність використання вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі з урахуванням фізико-хімічних процесів формування аерозольної хмари та її взаємодії з полум'ям, а також впливу аерозольної хмари на тепловий потік;

- розробити математичну модель перенесення аерозолю, тепло- та масообміну у системі «джерело полум'я – аерозольна хмара – навколишнє середовище» для характерних умов відкритого простору та провести чисельні дослідження параметрів процесу припинення горіння;

- визначити перелік основних чинників, що впливають на вогнегасну ефективність аерозолю у відкритому середовищі (параметри формування аерозольної хмари, дисперсний склад, швидкість і напрям

подачі, геометрія осередку горіння, вітрове навантаження), та кількісно оцінити їхній внесок;

– розробити експериментальну методику і спеціалізовану установку для дослідження параметрів зниження теплового потоку під дією аерозольної хмари та ефективності гасіння модельних осередків горючих рідин на відкритому просторі, забезпечивши можливість варіювання висоти та напрямку подачі, а також реєстрації теплового потоку;

– виконати серію лабораторних і натурних експериментів з визначення характеристик зниження теплового випромінювання аерозольною хмарою, тривалості гасіння, стійкості ефекту та меж застосовності технології;

– розробити технологічну схему інтеграції аерозольних систем пожежогасіння у комплекс протипожежного захисту відкритих об'єктів, зокрема енергетичних підстанцій та резервуарних парків, з урахуванням вимог автономності, відмовостійкості та мінімального втручання в існуючу інфраструктуру;

– здійснити техніко-економічну оцінку доцільності впровадження аерозольних систем пожежогасіння порівняно з традиційними засобами, врахувавши витрати на створення системи, експлуатаційні витрати, потенційне зменшення збитків від пожеж та ризику для персоналу;

– сформулювати рекомендації щодо впровадження отриманих результатів у практику пожежогасіння горючих рідин на відкритих майданчиках та на об'єктах критичної інфраструктури в умовах мирного та воєнного часу.

Об'єктом дослідження є процеси гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі з використанням вогнегасних аерозолів.

Предметом дослідження є закономірності зниження теплового впливу на осередок горіння під дією аерозольної хмари.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс теоретичних та експериментальних методів. Побудовано фізико-математичну модель процесу гасіння, яка включає рівняння збереження маси, імпульсу та енергії для газової і дисперсної фаз, а також опис зниження теплового випромінювання з урахуванням показників екстинкції частинок. Чисельна реалізація моделі здійснювалася із застосуванням сучасних програмних комплексів комп'ютерної гідродинаміки та засобів обробки результатів.

.Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку теоретичних основ та експериментальному обґрунтуванні ефективності використання вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі з урахуванням їх впливу на теплове поле пожежі.

Вперше:

– розроблено узгоджену двофазну фізико-математичну модель процесу гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі, яка одночасно враховує перенесення дисперсної фази, променистий теплообмін між полум'ям, аерозольною хмарою та навколишнім середовищем, а також флегматизацію газового середовища. На відміну від відомих моделей для замкнених об'ємів, у запропонованій постановці враховано відкриті граничні умови, вплив вітрового навантаження та можливість знесення аерозольних частинок;

– експериментально встановлено кількісні характеристики зниження теплового випромінювання аерозольною хмарою при гасінні модельних осередків рідин класу В на відкритому просторі та показано, що за визначених режимів подачі аерозолю зменшення густини теплового потоку може сягати 30 % і більше, що є достатнім для суттєвого зниження теплового навантаження на обладнання та конструкції;

– визначено цільові «робочі» діапазони параметрів подачі аерозолю (швидкість, напрям, висота) та умов формування аерозольної хмари, за яких забезпечується припинення горіння упродовж обмеженого часу після початку подачі, і сформульовано критерії вибору цих параметрів для відкритих умов.

Удосконалено:

– методику експериментального визначення параметрів вогнегасної ефективності аерозолів на відкритому просторі, яка доповнена вимірюванням теплових потоків, аналізом динаміки зниження теплового впливу та врахуванням впливу геометрії осередку горіння і режимів подачі аерозолю;

– підходи до техніко-економічної оцінки систем аерозольного пожежогасіння для об'єктів зберігання та транспортування горючих рідин шляхом урахування не лише капітальних і експлуатаційних витрат, а й зниження потенційних збитків від пожеж та ризику ураження персоналу.

Набули подальшого розвитку:

– уявлення про механізми зниження теплового випромінювання газотвердої аерозольної хмари, зокрема щодо залежності ефективності цього ефекту від дисперсного складу частинок, відстані до джерела випромінювання та часу стабілізації хмари;

– науково обґрунтовані принципи проектування систем аерозольного пожежогасіння для відкритих майданчиків та об'єктів критичної інфраструктури, що передбачають поєднання автономних генераторів з іншими видами вогнегасних речовин у складі комплексного протипожежного захисту.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає у формуванні науково обґрунтованих підходів до застосування вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі з урахуванням теплового впливу та особливостей дії аерозольної хмари.

Розроблена фізико-математична модель і експериментальна методика можуть бути використані для інженерних розрахунків параметрів подачі аерозольного струменя (швидкість, напрям, висота), оцінювання коефіцієнта зниження теплового потоку, вибору типу та кількості генераторів, а також визначення раціональної конфігурації їх розміщення на об'єктах зберігання горючих рідин і критичної інфраструктури.

Отримані результати створюють основу для проектування

автономних аерозольних систем пожежогасіння, що дозволяють зменшити теплове навантаження до рівня, безпечного для перебування та рятування людини, і підвищити ефективність дій пожежно-рятувальних підрозділів в умовах обмеженого доступу.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 25 наукових праць, з яких 5 статті — у фахових виданнях, включених до переліку ДАК України, 3 статті — у науковому журналі, що індексується в міжнародній наукометричній базі даних Scopus та WoS, та 16 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-практичних конференцій різного рівня. Опубліковано у співавторстві 1 монографію. Опубліковані праці відображають основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, а також практичні рекомендації щодо застосування аерозольних технологій пожежогасіння.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири основні розділи, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг роботи становить 192 сторінки, з яких основний зміст викладено на 148 сторінках. У дисертації представлено 24 рисунки, 20 таблиць, список використаних джерел, що налічує 112 найменувань, а також 2 додатки, розміщені на 15 сторінках. У першому розділі наведено аналіз сучасного стану проблеми гасіння пожеж горючих рідин та місце аерозольних систем у комплексі засобів пожежогасіння. У другому розділі викладено теоретичні основи та методики дослідження ефективності гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі, сформульовано фізико-математичну модель процесу. Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу аерозольної хмари на тепловий потік та параметрів вогнегасної ефективності при гасінні модельних осередків горючих рідин. У четвертому розділі подано результати практичної реалізації, техніко-економічної оцінки та рекомендації щодо впровадження розробленої технології для захисту реальних об'єктів. Отримані результати узагальнено у висновках.

Особистий внесок здобувача.

Основні теоретичні, розрахункові, експериментальні та прикладні результати, викладені у дисертаційній роботі, одержані здобувачем самостійно. Автором сформульовано наукову задачу, мету та завдання дослідження, обґрунтовано доцільність застосування вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі, розроблено концепцію дослідження, здійснено аналіз сучасного стану проблеми, проведено теоретичне обґрунтування, експериментальну перевірку та узагальнення отриманих результатів.

Особистий внесок здобувача знайшов відображення у наукових публікаціях, які відповідають тематиці дисертації:

- у науковій праці «Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин» здійснено аналіз сучасних вогнегасних речовин, що застосовуються для ліквідації пожеж класу В, визначено їх переваги та недоліки, а також обґрунтовано перспективність використання вогнегасних аерозолів для підвищення ефективності пожежогасіння;
- у публікації «Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні» проаналізовано стан нормативно-технічного забезпечення випробувань вогнегасних систем і засобів, визначено основні проблемні аспекти та напрями їх удосконалення, що стало підґрунтям для забезпечення достовірності експериментальних досліджень;
- у роботі «Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів» досліджено особливості розвитку пожеж на відкритих електричних підстанціях та обґрунтовано доцільність застосування генераторів вогнегасного аерозолу для захисту об'єктів критичної інфраструктури;
- у публікації «Screening Ability of Environmentally Friendly Aerosols for Thermal Radiation» досліджено закономірності ослаблення теплового випромінювання аерозольним середовищем, визначено екрануючу здатність екологічно безпечних вогнегасних аерозолів, що стало одним із теоретичних та експериментальних підґрунть дисертаційної роботи;

- у праці «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» досліджено параметри ефективності застосування вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі, визначено вплив концентрації аерозолу та умов його подавання на процес припинення горіння;
- у статті «Application of Time/Temperature Fire Curves for the Estimation of Fire Resistance of Transformer within Protective Structures» досліджено можливість використання стандартних та параметричних температурних режимів пожежі для оцінювання вогнестійкості трансформаторів у захисних конструкціях, що дозволяє підвищити рівень пожежної безпеки енергетичних об'єктів;
- у тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях апробовано окремі результати дисертаційного дослідження, зокрема щодо умов застосування вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі, визначення параметрів їх ефективності, аналізу небезпечних чинників пожеж на трансформаторних підстанціях, а також моделювання концентрації та геометричних параметрів аерозольної хмари в процесі пожежогасіння.

Розділ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПРОЦЕСІВ ПРОГРІВУ ТА ВИГОРАННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

1.1 Процес горіння горючих рідин

1.1.1 Аналіз пожеж та особливостей горіння горючих рідин на промислових об'єктах

Пожежі на об'єктах енергетичної та нафтопереробної промисловості належать до найбільш небезпечних техногенних аварій, пов'язаних із горючими рідинами. Їх характерними рисами є швидке поширення полум'я, високе тепловиділення, токсичність продуктів згорання та складність локалізації й ліквідації. За умов інтенсивних теплових потоків (до 2–3 МВт/м² у зоні максимального горіння) зростає ризик вторинного займання та термічного руйнування технологічного обладнання [19].

Показовими є аварійні події на нафтопереробних і паливно-складських об'єктах, коли витіки та розливи нафтопродуктів призводять до займання парів у зоні розливу, значного теплового навантаження та тривалого горіння. У таких випадках гасіння, як правило, здійснюється пінними та водо-пінними засобами із паралельним охолодженням суміжного обладнання, однак ефективність дій часто обмежується температурним режимом, складними умовами доступу до осередку та ризиком повторного розвитку пожежі [19; 25]. Наслідками можуть бути ураження персоналу продуктами згорання та погіршення якості повітря в прилеглих районах.

Окрему групу ризиків становлять пожежі на електричних підстанціях, які можуть спричинити тривалі відключення електропостачання об'єктів критичної інфраструктури й значні матеріальні

збитки. Гасіння таких пожеж є небезпечним через поєднання горіння горючих рідин (зокрема, трансформаторних масел), високих температур і складних умов доступу. Додатковим чинником сучасних умов є ураження енергетичних об'єктів, що може знижувати оперативність реагування через ризик повторних ударів, збільшуючи час до початку робіт і сприяючи розвитку пожежі та зростанню збитків.

За статистичними даними, найбільша кількість пожеж на підстанціях пов'язана з електричними трансформаторами [9]; при цьому наявні системи гасіння не завжди забезпечують повне припинення горіння, що підвищує імовірність поширення полум'я та посилює наслідки аварії. Зазначене обґрунтовує необхідність підвищення рівня протипожежного захисту електрообладнання та впровадження ефективніших технологій гасіння.

Наведені приклади підтверджують, що ефективність ліквідації пожеж горючих рідин визначається не лише видом вогнегасної речовини, а й характером процесу горіння, умовами протікання та просторовою формою осередку займання [4]. Для обґрунтування результативних систем пожежогасіння доцільним є детальний аналіз горіння горючих рідин у розливах, які мають відкриту поверхню та зазнають прямого впливу зовнішніх чинників [19; 25].

Горіння рідин у розливі характеризується несталою геометрією осередку, активною взаємодією факела з повітряним середовищем і чутливістю до метеорологічних умов [7]. У роботі Zuma, Rahtov і Dyachenko [19] зазначено, що під час горіння нафтопродуктів у розливі відбувається нерівномірний прогрів шару рідини з формуванням локальних зон перегріву, що змінює інтенсивність випаровування легких фракцій і температурне поле факела. На інтенсивність горіння також істотно впливають швидкість бокового вітру, глибина розливу, наявність

технологічного обладнання та теплотехнічні властивості конструкцій у зоні пожежі [25].

У спокійній погоді горіння з вільної поверхні має більш стаціонарний характер; висота факела зазвичай становить близько 1,5 діаметра зони горіння [39]. За наявності бокового вітру полум'я нахилиється і зміщується, зростає теплове навантаження на прилеглі об'єкти, погіршуються умови роботи персоналу та знижується ефективність автоматичних систем пожежогасіння [22]. Це змінює тепловий режим пожежі: посилюється тепловіддача до поверхні рідини та конструкцій, підвищується ризик вторинних займань через прогрів суміжних ділянок майданчика.

За даними [26], температура полум'я при горінні нафтопродуктів перебуває в межах 800–1300 °С і загалом мало залежить від масштабу факела. У [25] наведено, що лінійна швидкість вигорання нафтопродуктів у середньому становить 0,1–0,3 м/год і не залежить від площі горіння, якщо вона перевищує 5 м² [10]. Разом із тим фізико-хімічні властивості палива визначають характер прогрівання: за результатами [10; 32], нафта та мазут прогриваються повільніше, тоді як легкокиплячі рідини (бензин, гас) — швидше; при цьому температура прогрітого шару в останніх зазвичай не перевищує рівнів, близьких до температури кипіння води, що знижує імовірність вибухових викидів.

З огляду на це, інтенсивність нагромадження тепла у поверхневому шарі палива є одним із чинників, що ускладнює гасіння: зростання температури посилює випаровування легких фракцій і може підвищувати витрати вогнегасних речовин. Для пінних засобів додатковою проблемою є термічне руйнування піни при високих температурах, що зменшує тривалість її ефективної дії. З метою стабілізації фронту полум'я і зниження теплопередачі до рідини у [25] обґрунтовано застосування

твердих пористих матеріалів і гелеутворюючих систем, які можуть зменшувати витрату вогнегасної речовини та скорочувати тривалість гасіння.

Узагальнені параметри пожеж нафтопродуктів наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Параметри горіння нафтопродуктів [25]

Назва рідини	Лінійна швидкість вигорання, см/г (на год?)	Швидкість прогріву, см/г	Температура прогрітого шару, °С
Нафта сира	9-12	24-36	130-160
Мазут	6-13	24-42	230-300
Гас тракторний	21-24	Немає шару	220-240
Бензин автомобільний	24-30	72	80-100

Аналіз даних таблиці 1.1 показує, що найбільш інтенсивний прогрів характерний для легкокиплячих рідин, що пояснюється їхньою високою леткістю та швидким насиченням парової фази. Зокрема, для бензину наведено глибину прогріву близько 72 см/год, тоді як для важчих нафтопродуктів (зокрема мазуту) швидкість прогрівання становить 24–42 см/год. Це підтверджує визначальний вплив фізико-хімічних властивостей палива на теплову поведінку під час горіння.

У межах першої години прогрівання має близький до лінійного характеру, що дозволяє кількісно описувати динаміку прогріву залежно від часу (рис. 1.1).

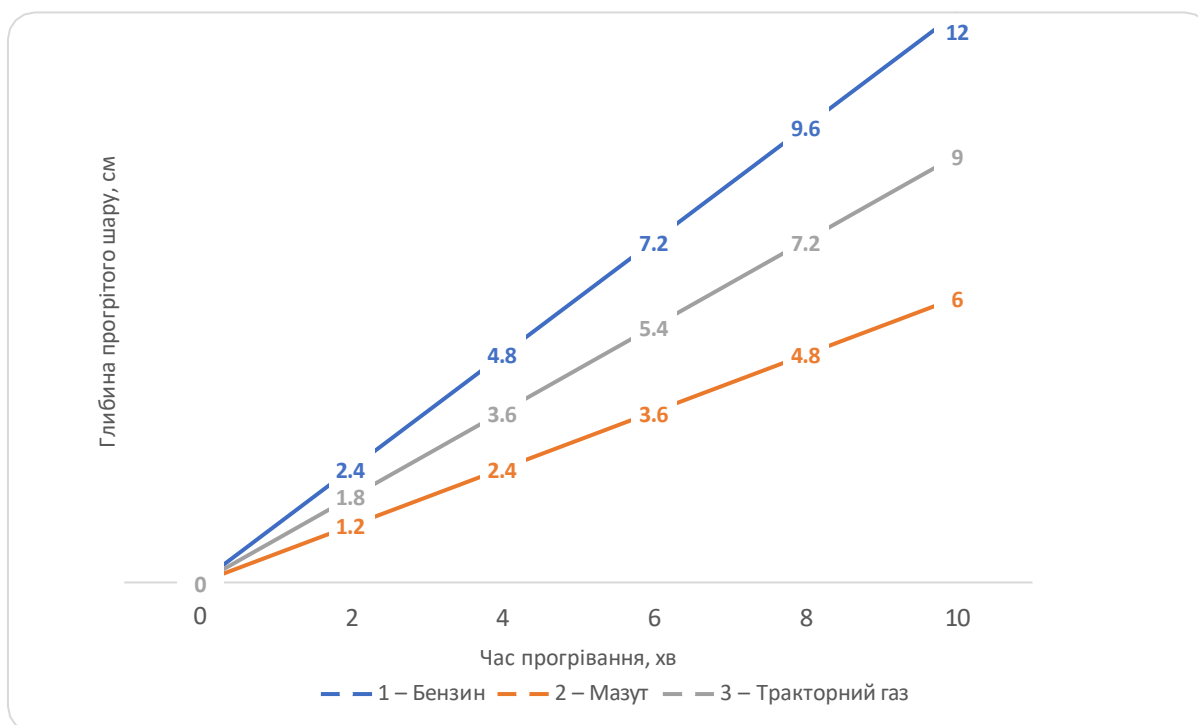


Рис. 1.1 - Залежність швидкості прогрівання шару ГР від часу прогрівання [32]

Аналіз рис. 1.1 свідчить, що інтенсивний прогрів верхнього шару відбувається вже у початковій фазі горіння, формуючи умови для активного випаровування та стабілізації факела. Для важчих нафтопродуктів темпи прогріву є нижчими, що зумовлює інший тепловий режим і тривалість розвитку пожежі.

За даними сучасних чисельних досліджень [18], інтенсивність теплового випромінювання від поверхні розливів горючих рідин істотно впливає на радіаційний баланс у зоні горіння: при великих площах займання частина теплового потоку повертається в область полум'я, формуючи нестійкі температурні градієнти та змінюючи швидкість випаровування. Це підтверджує необхідність урахування випромінювання під час розрахунків теплових режимів пожеж у розливах горючих рідин.

1.1.2. Процес теплопередачі та випаровування горючих рідин у зону горіння

За умов сталого горіння частина теплової енергії факела неминуче передається до поверхні горючої рідини. Згідно з узагальненими експериментальними та теоретичними даними, наведеними в монографії Дадашова І. Ф., Кірєєва О. О., Трегубова Д. Г. та Тарахна О. В. (НУЦЗУ, 2021) [25], домінуючим механізмом перенесення тепла від зони полум'я до поверхні палива є теплове випромінювання. Конвективні потоки, що формуються у факелі, переважно мають висхідний напрям і забезпечують відведення продуктів згоряння від поверхні, тому їх внесок у загальний тепловий потік до рідини є незначним.

Теплопровідність рідкої фази впливає на розподіл температури в приповерхневому шарі, однак основну частину енергії забезпечує саме радіаційний теплоперенос.

Кількість тепла, яка сприймається рідиною під час підготовчої стадії горіння (періоду прогріву та інтенсивного випаровування), визначається її питомою теплоємністю, питомою теплотою фазового переходу (випаровування) та інтенсивністю масообміну на межі поділу фаз. У спрощеній формі енергетичний баланс процесу може бути поданий рівнянням [25]:

$$q_{\text{подг}} = V_m ((C_p(T_{\text{кип}} - T_0) + \Delta H_{\text{исп}})), \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

де:

$T_{\text{кип}}$ – температура кипіння речовини, К;

T_0 – початкова температура речовини, К;

C_p – теплоємність речовини, кДж/кг К;

$\Delta H_{\text{исп}}$ – теплота фазового переходу. кДж/кг

Для бензину, як одного з найпоширеніших легкокиплячих палив, характерні такі параметри: масова швидкість вигорання – 2,93 кг/(м²·хв); питома теплоємність – 3,0 кДж/(кг·К); температура кипіння – 470 К; теплота пароутворення – 272 кДж/кг. Підстановка зазначених значень у наведену залежність дає змогу оцінити теплову енергію, необхідну для формування парогазової суміші на поверхні палива.

$$q_{\text{підг}} = (2,93 \cdot (3 \cdot (470 - 293) + 272)) / 60 = 39,21 \text{ кВт/м. кв.}$$

Енергетичний розподіл у зоні факела свідчить, що частка енергії, яка витрачається безпосередньо на випаровування рідини, становить близько 2 % від загальної кількості енергії, що виділяється в процесі горіння, тоді як решта спрямовується на нагрівання продуктів згоряння та теплове випромінювання факела [25]. Попри незначну величину, цього енергетичного внеску достатньо для забезпечення прогріву приповерхневого шару та підтримання інтенсивного випаровування на початкових стадіях пожежі.

Якщо обмежити підведення теплового потоку до поверхні палива, підготовчий період істотно подовжується, а швидкість випаровування та вигорання зменшується. Це безпосередньо призводить до зниження інтенсивності горіння та може стати передумовою поступового згасання полум'я. Такий ефект використовується у вогнегасних технологіях, зокрема при застосуванні твердих пористих матеріалів або гелеутворювальних систем, які знижують ефективний тепловий потік до поверхні палива та стабілізують фронт випаровування [25].

Отже, у процесі сталого горіння енергетичний баланс приповерхневого шару визначається співвідношенням між підведеним тепловим потоком факела (переважно радіаційним) і витратами енергії на

підігрів та фазовий перехід. Керування цим балансом – шляхом зменшення радіаційного навантаження, зміни умов теплопередачі або модифікації поверхні палива – є важливим інструментом регулювання інтенсивності випаровування та динаміки горіння горючих рідин.

1.1.3 Теплопровідність та прогрів горючих рідин у глибину під час горіння

Процес горіння горючих рідин супроводжується поступовим прогрівом їх об'єму в глибину. Джерелом тепла у цьому випадку є приповерхневий шар рідини, який отримує енергію від зони факела переважно через теплове випромінювання та, меншою мірою, за рахунок конвективного теплообміну. Подальший прогрів рідини у глибину відбувається головним чином внаслідок теплопровідності, а також теплопередачі через стінки резервуара [1].

Коефіцієнт теплопровідності металевих конструкцій, зокрема сталевих стінок резервуарів, на порядок вищий, ніж у рідких палив [35]. У зв'язку з цим найбільш інтенсивне прогрівання рідини спостерігається в приповерхневих ділянках, розташованих поблизу стінок резервуарів, трубопроводів, технологічного обладнання та інших конструктивних елементів. У центральній частині резервуара, де відсутній безпосередній контакт із нагрітими поверхнями, швидкість прогріву є мінімальною [22].

Під час стаціонарного горіння основний тепловий вплив зосереджується у верхньому шарі рідини, де переважає нагрівання за рахунок теплопровідності. Розподіл температури за глибиною рідкого палива у спрощеному вигляді може бути описаний емпіричною залежністю [31]:

$$\frac{T_y - T_0}{T_k - T_0} = \exp$$

де:

T_k – температура кипіння речовини, К;

T_0 – початкова температура;

T_y – температура на глибині y

Для рідин із відносно високою теплопровідністю та малою швидкістю вигорання за умов тривалого теплового впливу можливе формування так званого гомотермічного шару — умовної зони, у межах якої температура розподіляється наближено рівномірно [27]. Утворення такого шару пов'язане передусім із передачею теплоти до рідини через стінки резервуара та тривалим прогрівом приповерхневих шарів. Динаміку зміни товщини гомотермічного шару з часом у літературі описують узагальненою залежністю [25]:

$$\delta_{xc} = \delta_{пр}(1 - \exp(-\mu t))$$

де:

T – час, с;

$\delta_{пр}$ – твердість речовини;

μ - коефіцієнт

Такий характер прогріву зумовлює поступове накопичення теплоти в рідині під час тривалого горіння. Для нафти та більшості нафтопродуктів, особливо обводнених, швидкість прогріву може перевищувати швидкість вигорання у 4–10 разів [21]. Унаслідок цього виникає небезпека нагрівання значної частини об'єму рідини до температури, близької до температури кипіння. За таких умов змінюються параметри горіння: зростає тиск парів, посилюється випаровування, і в окремих випадках можуть спостерігатися явища закипання або вибухоподібного викиду нафтопродукту.

З точки зору пожежної безпеки, обмеження теплового потоку, що надходить до поверхні палива, дозволяє зменшити інтенсивність випаровування та, відповідно, масову швидкість вигорання. Це має важливе значення під час проектування систем охолодження резервуарів і вибору методів пожежогасіння, спрямованих на мінімізацію теплового навантаження на поверхню горючої рідини. Таким чином, контроль теплопровідності та розподілу температури в об'ємі рідкого палива є одним із ключових чинників запобігання розвитку аварійних ситуацій, пов'язаних із закипанням або пошкодженням ємностей під час пожеж.

1.1.4 Закономірності вигорання горючих рідин із вільної поверхні

Процес горіння горючих рідин із вільної поверхні, незважаючи на зовнішню простоту, є складним фізико-хімічним явищем, у якому одночасно відбуваються процеси теплопередачі, масообміну та хімічного перетворення. Для підтримання стабільного горіння необхідне безперервне надходження парів горючої рідини в зону реакції та достатній притік повітря, що забезпечує окиснення пального. У ході горіння випаровування рідини підтримується теплом, яке надходить від факела переважно шляхом теплового випромінювання до поверхні палива.

З практичної точки зору, при гасінні пожеж, пов'язаних із горінням рідин у резервуарах із вільною поверхнею, важливе значення має визначення швидкості вигорання, оскільки цей параметр безпосередньо характеризує інтенсивність тепловиділення та тривалість процесу горіння. Дослідження, наведені в [23], показують, що на швидкість і характер горіння нафти та нафтопродуктів із вільної поверхні істотно впливають фракційний склад палива, діаметр резервуара, вміст вологи в рідині, а також швидкість повітряного потоку над поверхнею.

Як встановлено в роботах [26], рідини мають здатність випаровуватися за будь-яких температур. Кожній температурі рідини відповідає певне значення парціального тиску насичених парів. При підвищенні температури зростає інтенсивність утворення пари над поверхнею палива, що сприяє надходженню горючої фази в зону реакції. За умов сталого горіння полум'я встановлюється над поверхнею рідини в тому випадку, коли швидкість випаровування та перенесення парів до зони горіння є достатніми для підтримання реакції окиснення.

При температурах нижче температури спалаху швидкість випаровування залишається недостатньою для формування стійкої горючої суміші, тому займання не відбувається. Зі зростанням температури випаровування посилюється, і починаючи з певного значення теплового впливу на поверхню палива процес горіння стає самопідтримуваним. За цих умов тепловий потік від факела забезпечує безперервне утворення парів, що підтримує стабільне існування полум'я над поверхнею рідини.

У подальшому, при підвищенні температури до значень, близьких до температури кипіння, спостерігається інтенсивне зростання пароутворення. За таких умов швидкість вигорання збільшується, а процес переходить у стійкий режим, який характеризується відносно сталою висотою полум'я, стабільним тепловим потоком до поверхні палива та квазісталіми параметрами температурного поля в зоні реакції.

Таким чином, при горінні розливів горючих рідин швидкість випаровування та, відповідно, швидкість вигорання тісно пов'язані з інтенсивністю теплового впливу на поверхню палива й площею випаровування. Як показано у [29; 23], збільшення діаметра поверхні горіння призводить до зростання інтегрального теплового потоку до факела, тоді як на периферії процес частково стабілізується внаслідок теплових втрат і конвективного охолодження. Це пояснює відмінності у

швидкості вигорання для рідин з різними фізико-хімічними властивостями та умовами теплового обміну.

З урахуванням наведених закономірностей кількісна оцінка швидкості вигорання горючих рідин є одним із ключових параметрів для аналізу пожеж у резервуарах і прогнозування розвитку аварійних ситуацій. У практиці пожежогасіння ця характеристика визначає вибір методів охолодження, ефективність застосування пінних засобів та час досягнення критичних температур у зоні горіння.

1.2 Процеси горіння та пожежогасіння горючих рідин у резервуарах і розливах

1.2.1. Умови виникнення та розвиток горіння горючих рідин у резервуарах

Одним із найпоширеніших явищ, що супроводжують виникнення пожеж на промислових об'єктах, є спалахування та подальше горіння горючих рідин. Особливу складність становить механізм горіння в резервуарах і в умовах відкритого розливу, оскільки процеси випаровування, займання та поширення полум'я визначаються поєднанням фізико-хімічних і теплофізичних чинників, а також геометрією осередку горіння та зовнішніми умовами.

Вільне випаровування горючих рідин істотно відрізняється від займання у замкнених об'ємах, де за тривалого нагрівання може встановлюватися квазістаціонарний стан між паровою та рідкою фазами. В умовах відкритого простору пароповітряна суміш над поверхнею є нестаціонарною, а її склад і властивості змінюються залежно від температури поверхні рідини, вітрового режиму, товщини шару та фізико-хімічних характеристик палива.

У роботі Manhou L. та ін. проаналізовано вплив внутрішніх і зовнішніх чинників на займання рідких палив. До внутрішніх чинників віднесено тип палива, товщину шару, розмір басейну, температуру та ступінь втрати легких фракцій, а до зовнішніх — інтенсивність теплового випромінювання, кут дії теплового потоку та режим займання [11]. Показано, що займання відбувається за умов, коли тепловий потік, що надходить до поверхні рідини, забезпечує утворення достатньої кількості парів для підтримання реакції горіння.

Над поверхнею рідини в резервуарі або в зоні розливу внаслідок випаровування та перемішування з повітрям формується горюче середовище, властивості якого змінюються за висотою. Безпосередньо поблизу дзеркала рідини інтенсивність пароутворення є максимальною, тоді як у верхніх шарах переважає повітря. Оскільки випаровування є ендотермічним процесом, для його підтримання необхідний безперервний підвід теплоти. Основним джерелом цієї теплоти є променистий тепловий потік від факела, який прогріває поверхню рідини до температур, достатніх для сталого горіння.

Теплове випромінювання є ключовою характеристикою, що визначає динаміку розвитку пожеж горючих рідин [14]. Теоретично передача теплоти до поверхні палива може здійснюватися за рахунок теплопровідності, конвекції та променистого теплообміну. Проте конвективні потоки полум'я спрямовані переважно вгору і практично не беруть участі в нагріванні поверхні, а теплопровідність обмежується тонким приповерхневим шаром рідини. У зв'язку з цим основним механізмом теплопередачі є саме променисте тепло полум'я [8].

Зі зростанням температури поверхні рідини підвищується інтенсивність утворення парів, і при досягненні температури спалаху встановлюється режим сталого горіння. У цьому режимі тепловий потік

від факела забезпечує безперервне випаровування палива, тоді як подальше підвищення температури суттєво не впливає на швидкість поширення полум'я, але призводить до зростання інтенсивності теплового випромінювання.

Під час горіння у відкритих резервуарах і розливах формується інтенсивний радіаційний потік, який визначає умови нагрівання суміжних об'єктів і безпечні відстані між ними. Дослідження Manhou L. та ін. показали, що критичні відстані займання для різних видів палива залежать від діаметра басейну горіння та геометрії осередку [11]. Розрахунки, виконані з використанням програмних комплексів моделювання пожеж, підтвердили залежність інтенсивності теплового потоку від розмірів резервуара та просторового розташування об'єктів.

У ряді досліджень запропоновано підходи до зменшення теплового впливу зони горіння на поверхню рідини. Зокрема, застосування аерозольних систем розглядається як один із способів часткового екранування променистого теплового потоку, що може призводити до зменшення інтенсивності випаровування та, відповідно, швидкості розвитку пожежі [3; 6].

Основними параметрами пожеж горючих рідин є площа горіння, висота факела, щільність теплового потоку, швидкість вигорання та швидкість прогріву рідини. Згідно з [25], горіння легкозаймистих і горючих рідин із вільної поверхні відбувається стабільно за умови, що висота світної частини полум'я становить приблизно 1,5 діаметра резервуара. Процес горіння розливів рідин поділяють на ламінарний, турбулентний і перехідний режими.

Дадашов І. Ф. та ін. запропонували емпіричну модель прогнозування швидкості вигорання в басейнових пожежах, яка враховує тип палива, діаметр розливу та початкову температуру рідини [25]. Подальші

дослідження Jinbo W. та ін. розвинули ці підходи, встановивши залежність між швидкістю горіння, діаметром розливу та глибиною шару палива [13].

Важливим зовнішнім чинником є повітряний потік. За наявності вітру інтенсивність горіння зростає, полум'я та дим відхиляються, що підвищує теплове навантаження на суміжні резервуари та споруди й ускладнює роботу пожежно-рятувальних підрозділів [37]. Вітер також може сприяти взаємодії факелів у разі близького розташування осередків горіння. Експериментальні дослідження Wang J. та ін. (2025) показали, що масова швидкість горіння двох розливів має немонотонний характер і залежить від відстані між ними, що пояснюється конкуренцією між підсмоктуванням повітря та взаємним тепловим випромінюванням факелів [5].

Таким чином, процеси горіння горючих рідин у резервуарах і розливах мають складну тепломасообмінну природу [2]. Їх інтенсивність визначається взаємодією променистого теплового потоку, процесів випаровування та зовнішніх умов. Розуміння цих закономірностей є необхідною основою для розроблення ефективних систем пожежогасіння, орієнтованих на зниження теплового потоку, стабілізацію полум'я та обмеження випаровування рідини.

1.2.2. Теплові процеси та температурні режими під час пожеж горючих рідин

Дослідження процесів горіння горючих рідин свідчать, що інтенсивність пожежі в резервуарах і розливах визначається насамперед температурою поверхні палива та геометричними розмірами осередку горіння (діаметром резервуара або площею розливу). Саме ці чинники формують тепловий режим пожежі, впливають на випаровування та задають умови для підтримання стійкого полум'я.

По-перше, швидкість випаровування безпосередньо залежить від температури поверхні рідини. У міру зростання температури інтенсивність утворення парів збільшується (що пов'язано зі зростанням парціального тиску насичених парів) [39]. Це означає, що навіть відносно невелике підвищення температури поверхні може істотно посилити надходження парів у зону реакції та, відповідно, інтенсифікувати горіння. Вказані закономірності ілюструє рис. 1.2.1, де наведено залежність швидкості випаровування горючої рідини від температури.

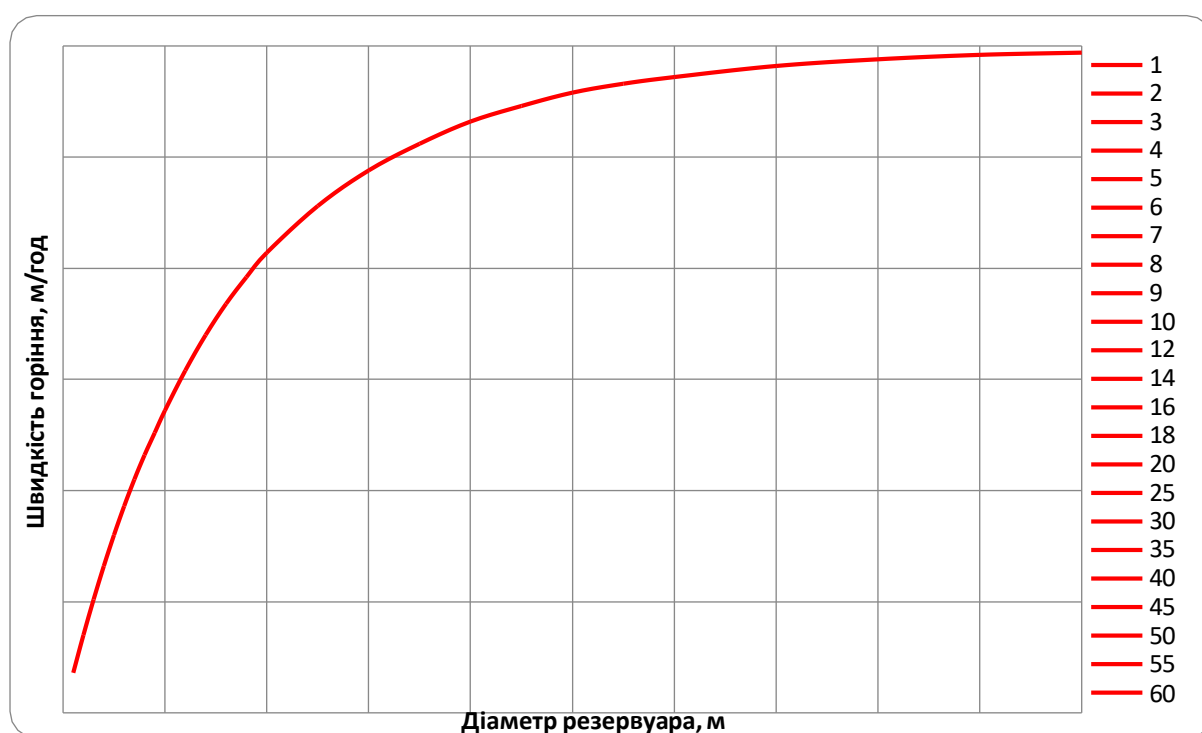


Рис.1.2.1 – Насичення швидкості горіння при досягненні критичного діаметра резервуара

З аналізу даних (рис. 1.2.1) видно, що за низьких температур випаровування відбувається повільно, однак із підвищенням температури швидкість утворення парів зростає значно швидше. Такий характер залежності пояснює, чому під час пожеж у резервуарах і розливах формується «зворотний тепловий зв'язок»: частина енергії полум'я у вигляді променистого теплового потоку повертається до поверхні рідини,

прогріває її та підтримує випаровування без зовнішніх джерел нагрівання [14].

По-друге, на інтенсивність горіння істотно впливають геометричні розміри осередку. Для відносно малих діаметрів (або площ розливу) швидкість вигорання зростає зі збільшенням розміру, однак при досягненні певних граничних значень має тенденцію до насичення. Це пов'язано з тим, що при великих площах поверхні встановлюється квазібаланс між тепловим випромінюванням факела, тепловими втратами та швидкістю випаровування рідини. Вказану закономірність узагальнено на рис. 1.2.2, де наведено зміну лінійної швидкості горіння залежно від діаметра резервуара.

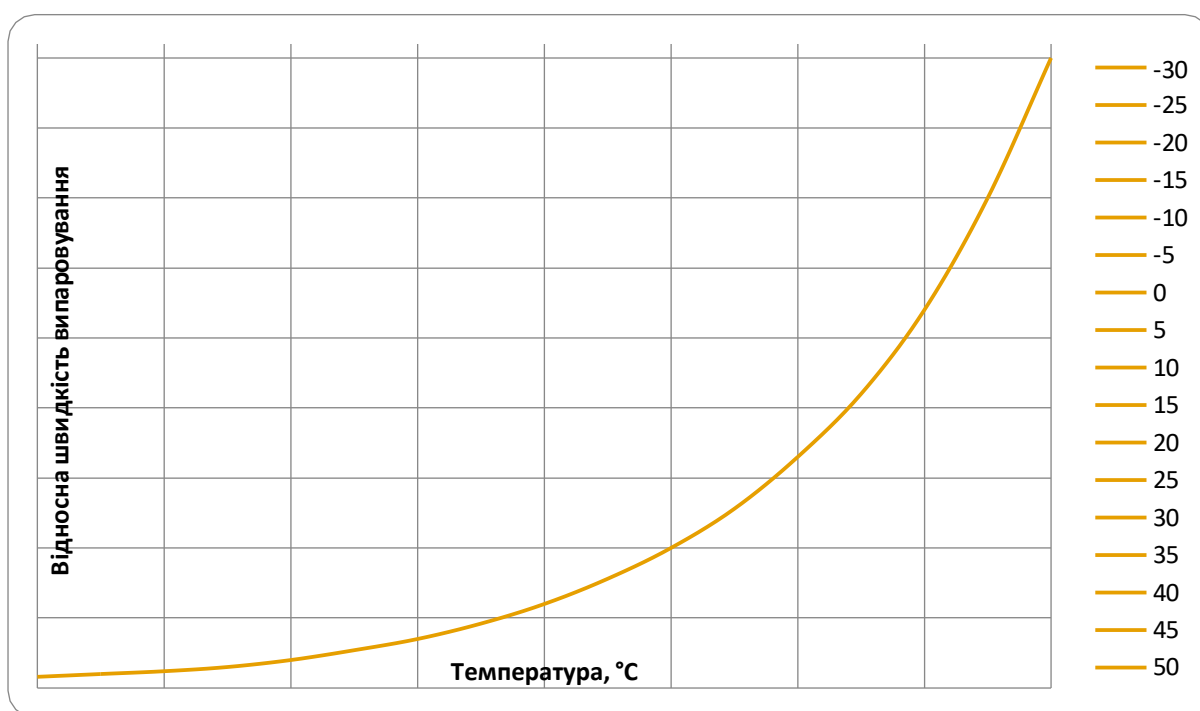


Рис. 1.2.2 – Експоненційне зростання швидкості випаровування зі збільшенням температури поверхні рідини.

Отримані залежності підтверджують, що теплоперенесення під час пожежі горючих рідин має складний характер: температура поверхні

визначає інтенсивність випаровування, а геометричні розміри резервуара/розливу – масштаб теплового впливу факела та просторовий розподіл теплових потоків. При цьому додаткову неоднорідність у зоні горіння можуть створювати конвективні течії в товщі рідини та контактний теплообмін зі стінками резервуара, що впливає на прогрівання та локальну інтенсивність випаровування [17; 39]. За Чернецьким В. В. [39], у товщі рідкого палива формуються конвективні потоки, зумовлені нерівномірністю теплового впливу на поверхню. Температурні відмінності можуть створювати градієнт поверхневого натягу та спричинити перерозподіл рідини в приповерхневій зоні (ефект Марангоні), що впливає на рівномірність випаровування. Крім того, для напівпрозорих рідин частина випромінювання може проникати вглиб палива та сприяти формуванню внутрішньої температурної неоднорідності, що активізує перемішування (нестабільність Релея–Бенара) і може призводити до локальних перегрівів [39]. Додатковим чинником теплопередачі є теплообмін «стінка–рідина». Як зазначають Tarek Beji, Bouaza Lafdal і Rabah Mehaddi [17], теплопровідність металу резервуара істотно перевищує теплопровідність більшості горючих рідин, тому поблизу стінок виникає інтенсивніший прогрів палива. Це змінює густину рідини та сприяє розвитку конвективних течій, що впливають на просторовий характер горіння та температурне поле. Для нафтопродуктів із високим вмістом важких фракцій (зокрема сирії нафти та мазутів) характерні тривалі режими горіння із формуванням прогрітого шару та підвищеним утворенням сажі [16; 30]. Такі пожежі супроводжуються інтенсивним димовиділенням, неповним згорянням і значним променистим тепловим потоком, що погіршує умови роботи персоналу та підвищує ризики для довкілля [16]. У прогрітому шарі може відбуватися фракційна перегонка: спочатку випаровуються легкі компоненти, а склад парогазової фази з

часом змінюється, що відбивається на стійкості полум'я та параметрах теплового режиму [30]. Як показано в [6; 18], у разі групового розташування резервуарів істотне значення має взаємодія теплових потоків між осередками: променистий тепловий потік від факела може сприяти нагріванню сусідньої ємності та створювати умови для вторинного займання за наявності легких фракцій. За наявності бокового вітру можливі деформація факела та взаємодія полум'я двох сусідніх осередків, при цьому масова швидкість горіння може змінюватися немонотонно залежно від відстані між ними [5]. Це пояснюється конкуренцією між підсмоктуванням повітря та зменшенням зворотного теплового зв'язку при збільшенні проміжку між осередками. Важливо, що ефективність пожежогасіння в таких умовах значною мірою визначається можливістю зменшити тепловий потік до поверхні рідини та обмежити випаровування. Зокрема, гелеві піни можуть формувати термічно стійкий теплоізоляційний шар на поверхні палива, знижуючи тепловий потік до рідини та ризик повторного займання [8]. Для окремих сценаріїв зазначається, що введення тонкодисперсної води може не завжди давати очікуваний ефект і потребує обережного застосування; тому вибір засобу гасіння має враховувати тепловий режим пожежі та властивості палива [34]. На рис. 1.2.3 наведено залежність інтенсивності теплового випромінювання від коефіцієнта чорноти полум'я ϵ у температурному діапазоні 1000–2000 °С. З графіка видно, що за зростання ϵ інтенсивність випромінювання зростає, тоді як вплив температури є значно сильнішим і узгоджується із законом Стефана–Больцмана.

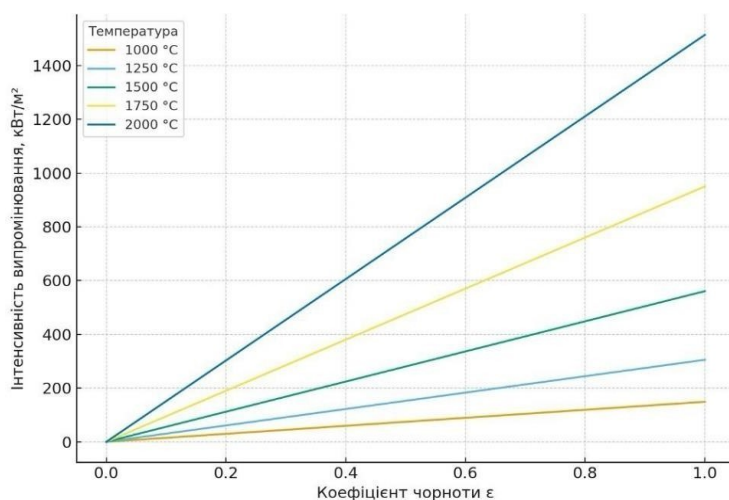


Рис. 1.2.3 Залежність інтенсивності випромінювання від коефіцієнта чорноти полум'я.

Отримана залежність підкреслює, що навіть помірна зміна оптичних властивостей полум'я може впливати на величину променистого теплового потоку. Саме тому екранування теплового випромінювання аерозольною хмарою доцільно розглядати як додатковий механізм зниження теплового впливу в зоні пожежі: він може зменшувати ефективний тепловий потік до поверхні палива, обмежуючи випаровування та стабілізуючи температурне поле [6]. Узагальнюючи, можна зробити висновок, що інтенсивність пожежі, динаміка прогрівання, швидкість випаровування та умови формування горючої суміші визначаються сукупністю взаємопов'язаних чинників: температурою поверхні, геометрією осередку, теплообміном зі стінками резервуара, наявністю вологи, вітровим режимом і характеристиками теплового випромінювання. З огляду на це, ефективне гасіння таких пожеж має бути спрямоване на зменшення теплового потоку до поверхні палива, обмеження випаровування та ізоляцію зони горіння від доступу окисника.

1.2.3. Особливості гасіння розливів горючих рідин вогнегасними засобами

У практиці гасіння пожеж нафти та нафтопродуктів основним засобом тривалий час залишається повітряно-механічна піна середньої або низької кратності. Піна середньої кратності є найбільш ефективною для гасіння легкозаймистих і горючих рідин у відкритих розливах та резервуарах, тоді як піна низької кратності переважно застосовується у стаціонарних ємностях, обладнаних системами піноподавання, де подача розчину здійснюється через шар пального.

Нормативна інтенсивність подачі піни для легкозаймистих рідин становить $0,08 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, для горючих рідин і нафти — $0,05 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Конкретні значення витрат, типи піноутворювачів і умови їх застосування регламентуються галузевими стандартами та рекомендаціями для систем пожежогасіння нафтопродуктів. Вогнегасна дія піни базується на ізоляції поверхні пального від повітря, зменшенні інтенсивності випаровування та обмеженні надходження горючих парів у зону реакції, а також на частковому охолодженні прогрітого шару за рахунок водної фази. Ефективність пінного гасіння визначається фізико-хімічними властивостями палива, параметрами піни (кратність, структурна стійкість), способом подачі та тривалістю контакту з поверхнею. Критичним чинником є забезпечення достатньої товщини пінистого шару, здатного протидіяти руйнуванню під дією інтенсивного теплового випромінювання.

Для підвищення термостійкості піни та зменшення її руйнування застосовують модифіковані склади з полімерними добавками, гелеутворювальні системи та комбіновані схеми гасіння. За даними Dadashov I. F. та ін. [25], тверді пористі матеріали й гелеутворювальні композиції забезпечують триваліший ізолювальний ефект і знижують

імовірність повторного займання, що є особливо важливим для великих резервуарів і пожеж із тривалим тепловим навантаженням.

У практиці гасіння резервуарів застосовують три базові схеми подачі піни:

- через шар пального вбудованими пристроями резервуара;
- від піногенераторів, установлених на даху;
- через борт резервуара навісним струменем (пінні стволи або пінозливи).

Подача через шар пального забезпечує вихід піни на поверхню без проходження крізь полум'я, що зменшує її руйнування. Водночас цей спосіб потребує спеціального обладнання, значних витрат розчину та кількох точок подачі для швидкого перекриття поверхні. Додатковими ускладненнями є утворення локальних «кишень» між уламками конструкцій покрівлі, а також немиттєвий вихід піни на поверхню.

Системи з піногенераторами, встановленими на даху резервуара, можуть працювати в автоматичному режимі, проте їх надійність істотно знижується у разі вибухового спалаху пароповітряної суміші у газовому просторі. Такі події часто супроводжуються деформацією або руйнуванням піногенераторів, пошкодженням покрівлі та верхніх поясів резервуара, що різко ускладнює або унеможлиблює подальше гасіння [24]. Чисельні дослідження показують, що після руйнування конструкцій теплове випромінювання по стінках стає нерівномірним, а традиційні захисні заходи не забезпечують повного стримування розвитку пожежі [6]. На практиці широко застосовують комбіновану подачу піни (пінозливи у поєднанні з направленими струменями), що прискорює ізоляцію поверхні та покращує розподіл пінистого шару. Для зменшення руйнування піни необхідне інтенсивне охолодження стінок резервуарів, особливо в зонах подачі [37]. В умовах значних деформацій або завалів покрівлі стандартні прийоми можуть бути нереалізованими, що потребує застосування

нестандартних технічних рішень і суттєво ускладнює ліквідацію пожежі. Перевагою пінного гасіння є формування після припинення подачі стійкого шару піни, який протягом тривалого часу знижує ризик повторного займання. Водночас використання оборотної або забрудненої води для приготування розчину піноутворювача не допускається [37]. Паралельно розвиваються нові пінні склади з покращеними властивостями. Показано, що гель-модифіковані піни мають кращу здатність до розтікання, підвищену термостійкість і ефективніше знижують тепловий потік до поверхні палива порівняно з традиційними складами [8; 2]. Їх застосування зменшує інтенсивність випаровування та ризик повторного займання, однак потребує додаткової оцінки сумісності з існуючими системами пожежогасіння.

Для об'ємного гасіння, а також у резервуарах обсягом до 5 тис. м³ застосовують вогнегасні порошки [12]. Їх дія ґрунтується переважно на інгібуванні реакцій горіння у полум'ї, тоді як виражений охолоджувальний ефект відсутній. У зв'язку з цим можливе повторне займання від нагрітих конструкцій, що обмежує ефективність порошоків як єдиного засобу. Для зниження цього ризику використовують комбіновані схеми «піна + порошок», які дозволяють поєднати швидке припинення полум'я з подальшою ізоляцією поверхні пального.

Як альтернатива, застосовуються газові методи гасіння, зокрема подача інертних газів знизу резервуара через пористі насадки, що забезпечує розбавлення газового середовища та часткове охолодження верхніх шарів рідини [25]. Проте такі методи рідко забезпечують повну ліквідацію горіння у відкритих умовах і мають обмежену сферу застосування.

Останніми роками поширюються екологічно безпечні засоби на основі твердопаливних аерозолеутворювальних сполук [13]. Їх дія

зумовлена поєднанням хімічного інгібування полум'я та впливу на тепловий режим пожежі; висока дисперсність аерозольної фази дозволяє зменшувати теплове навантаження в зоні горіння без застосування води. За основними техніко-експлуатаційними показниками такі системи можуть доповнювати або, в окремих випадках, перевищувати традиційні засоби гасіння пожеж розливів горючих рідин [35].

1.2.4. Порівняльна ефективність вогнегасних засобів при гасінні горючих рідин

Гасіння горючих рідин залишається одним із найскладніших завдань пожежогасіння, особливо у резервуарних парках та на відкритих промислових майданчиках, де поєднуються інтенсивне теплове випромінювання, великі площі горіння та складні умови доступу [19, 21]. Такі пожежі, як правило, мають тривалий характер, потребують значних ресурсів і супроводжуються високим ризиком для персоналу та пожежно-рятувальних підрозділів.

Пожежі в резервуарах нерідко розпочинаються зі спалаху пароповітряної суміші в газовому просторі, що може призводити до деформації або зриву покрівлі, порушення герметичності та подальшого горіння по всій площі дзеркала рідини. За інтенсивного впливу можливі сценарії: повний зрив даху; часткова деформація з зануренням елементів у палаючу рідину; або збереження загальної форми покрівлі з утворенням щілин і факельних викидів парів [25]. У горизонтальних та сферичних резервуарах вибухові явища можуть призводити до руйнування елементів корпусу та розливу пального, що створює додаткову загрозу поширення полум'я на сусідні ємності й споруди [29].

З огляду на зазначені сценарії, у практиці застосовують різні вогнегасні засоби та їх поєднання. Найбільш поширеним методом

залишається пінне гасіння [39, 21], яке забезпечує ізоляцію поверхні пального від доступу повітря та зменшення випаровування. Піна здатна розтікатися по поверхні, частково заповнювати нерівності й «кишені», а після припинення подачі утворює захисний шар, що знижує ризик повторного займання.

Разом із тим пінне гасіння має суттєві обмеження:

- низьку стійкість під дією інтенсивного теплового випромінювання та у випадку полярних рідин;
- складність подавання на великі відстані та потребу у значних витратах розчину;
- руйнування піни під дією конвективних потоків і механічних перешкод;
- високу ресурсомісткість і тривалість розгортання, особливо у складних умовах доступу;
- екологічні обмеження для окремих типів піноутворювачів та ускладнення утилізації [39].

Постійно виконуються дослідження щодо вдосконалення пінного методу: підвищення дальності подавання [10], створення екологічніших складів [33], використання плівкоутворювальних піноутворювачів [37], а також пінних композицій з підвищеною термостійкістю або здатністю до “твердіння” після нанесення. Такі рішення підвищують ефективність, однак не усувають ключових практичних проблем: великих витрат ресурсу, залежності від водопостачання та складності гасіння у разі руйнування конструкцій.

Альтернативними методами є застосування порошків, газових агентів, дисперсної води, емульсій, інгібіторів горіння або їхніх комбінацій. Однак у реальних умовах часто виникають чинники, що обмежують результативність кожного з цих способів: необхідність

одночасного впливу на всю площу горіння, потреба у тривалому утриманні вогнегасного середовища в зоні пожежі, ризик повторного займання від нагрітих конструкцій, а також ускладнення подачі при відкритому просторі.

Вогнегасні порошки забезпечують припинення полум'я переважно за рахунок інгібування реакцій у фронті горіння, але мають обмежений ізолювальний та охолоджувальний ефект, тому після “збивання” полум'я можливе повторне займання від нагрітих елементів резервуара або арматури [11]. У практиці для підвищення надійності нерідко застосовують комбіновані схеми “піна + порошок”.

Гасіння дисперсною водою здійснюється переважно за рахунок охолодження та часткового розведення продуктами випаровування, однак для пожеж значної площі критичною умовою є одночасне припинення горіння над усією поверхнею та подальше утримання температури конструкцій і поверхневого шару пального нижче небезпечних значень [19]. У багатьох сценаріях реальної пожежі це важко забезпечити через руйнування розпилювачів, обмеження доступу та нестабільність теплового режиму.

Газове гасіння ґрунтується на розбавленні та інгібуванні активних частинок, однак для відкритих умов його застосовність обмежена через неможливість утримувати необхідний вміст агента у зоні горіння достатньо довго, що підвищує ризик повторного займання [17]. Крім того, газові системи потребують спеціального обладнання, ємностей, трубопроводів і мають високі експлуатаційні вимоги.

Окрему групу становлять тверді пористі матеріали, гелеутворювальні системи, гранульована вуглекислота, гранули піноскла тощо, однак значна частина таких засобів залишається переважно на стадії

експериментального відпрацювання, і дані щодо їх широкого практичного застосування є обмеженими [11; 19].

З метою узагальненої оцінки практичної доцільності різних методів гасіння виконано порівняльний аналіз за шкалою від 1 (мінімальна перевага) до 5 (максимальна перевага). Критеріями оцінювання прийнято:

- зручність подачі (операційна складність підготовки, транспортування і подачі до осередку);
- тривалість гасіння (порівняльний час припинення горіння в типових умовах);
- вартість (сукупні витрати на реалізацію способу);
- вогнегасна ефективність з урахуванням домінуючих механізмів: інгібування, розбавлення/флегматизації, охолодження, ізоляції поверхні та здатності знижувати тепловий потік (екранувальний ефект як супутній механізм).

Скорочення, використані у таблиці:

ПГ — показники за умов застосування пересувною пожежною технікою;

ССП — показники за умов застосування у складі стаціонарної системи пожежогасіння (умовно герметичний об'єм).

Таблиця 1.2.1

Порівняльні характеристики вогнегасних речовин та способів гасіння пожеж класу «В»

Показники оцінювання ефективності	Аерозольне гасіння	Пінне гасіння	Газове гасіння	Порошкове гасіння	Гасіння дисперсною водою	Механічний спосіб
Зручність подачі вогнегасного засобу	5	3	1 (ПГ)* 3 (ССП)*	3	5 (ПГ) 1 (ССП)	1
Тривалість	5	3	4	2	2	2

гасіння						
Вартість	5	1	2	1	3	3
Інгібуюча здатність	5	1	5	4	1	1
Флегматизуюча здатність	5	1	4	4	1	1
Охолоджуюча здатність	2	3	3	3	5	1
Здатність знижувати тепловий потік (екранувальний ефект)	3	5	1	3	1	3
Ізолювальна здатність	2	5	1	3	1	4
Вогнегасна ефективність	5	5	4	4	4	3
Всього:	37	27	27	27	21	19

Примітка. ПГ — за умов застосування пересувною пожежною технікою; ССП — у складі стаціонарної системи пожежогасіння (умовно герметичний об'єм).

Як видно з таблиці 1.2.1, аерозольні системи мають суттєві переваги за частиною практичних критеріїв, насамперед у сценаріях, де важливі автономність, швидкість введення в дію та зменшення залежності від водопостачання. Водночас при оцінюванні їх застосування слід розрізняти умовно герметичні об'єми (де можуть реалізовуватися ефекти розбавлення газового середовища) та відкриті простори, де основне значення мають умови подачі, стійкість аерозольної хмари та вплив на тепловий режим пожежі.

Вогнегасний аерозоль діє комплексно за рахунок інгібування реакцій у полум'ї активними компонентами, впливу дисперсної фази на тепловий режим та утворення газової складової, що може зменшувати інтенсивність горіння в зоні реакції [15; 18, 21]. Додатково в ряді умов проявляється здатність аерозольної хмари знижувати променистий тепловий потік у зоні пожежі (екранувальний ефект), що розглядається як супутній механізм зменшення теплового навантаження.

Для об'ємних агентів (газових складів та аерозолів) у довідкових і нормативних даних ефективність часто описують через необхідну об'ємну частку (або масову витрату на одиницю об'єму) для припинення горіння та для інертування/флегматизації. У таблиці 1.2.2 наведено порівняльні дані для агентів газового гасіння, що застосовуються в Україні [35, 21].

Таблиця 1.2.2

Порівняльні характеристики вогнезахисної ефективності речовин газового гасіння які використовуються в Україні [35, 21]

Вогнегасна речовина	Хімічна назва	Вогнегасна об'ємна частка / необхідний вміст (за стандартом), г/м ³	Об'ємна частка для інертування (за стандартом), г/м ³	Національний стандарт
CF ₃ I	Трифторйодметан	463	649	ДСТУ 4466-2:2008
FK-5-1-12	Додекафтор-2-метилпентан-3-	961	1346	ДСТУ 4466-5:2008
HFC 227ea	Гептафторпропан	780	1092	ДСТУ 4466-9:2008
IG-01	Аргон	833	1167	ДСТУ 4466-12:2008
IG-100	Азот	661	926	ДСТУ 4466-13:2008
IG-541	Азот (52%) Аргон (40%) Діоксид вуглецю (8%)	584	818	ДСТУ 4466-15:2008
Галон 2402	Тетрафтордиброметан	290 ^[4]	406	ДСТУ 7288:2012
Діоксид вуглецю	Діоксид вуглецю	451	648	ДСТУ 5092:2008
Вогнегасний аерозоль	Вогнегасний аерозоль	56	79	

В таблиці 1.2.3 — наведено приклади гасильної об'ємної частки та мінімальної проєктної об'ємної частки для окремих горючих рідин за міжнародними стандартами (ISO/NFPA).

Таблиця 1.2.3

Концентрації вогнегасних об'ємних агентів для різних горючих рідин

№	Вогнегасний агент	Горюча речовина	Гасильна концентрація, % об.	Мінімальна проектна концентрація, % об.	Джерело / стандарт
1	FK-5-1-12 (Novec 1230)	н-Гептан	4,5	5,9	ISO 14520-5:2006, Табл. 4-5
		Етанол	5,5	7,2	ISO 14520-5:2006, Табл. 5
		Метанол	6,5	8,5	ISO 14520-5:2006, Табл. 5
		Ацетон	4,5	5,9	ISO 14520-5:2006, Табл. 5
		Дизельне пальне	4,5	5,9	ISO 14520-5:2006, Табл. 5
		Пропан (інертування)	8,1	8,9	ISO 14520-5:2006, Табл. 6
2	HFC-227ea (FM-200)	н-Гептан	6,7	8,7	ISO 14520-9:2019, Табл. 4-5
		Етанол	8,4	10,9	ISO 14520-9:2019, Табл. 5
		Метанол	9,5	12,4	ISO 14520-9:2019, Табл. 5
		Ацетон	6,7	8,7	ISO 14520-9:2019, Табл. 5
		Гас (керосин)	6,1	7,9	ISO 14520-9:2019, Табл. 5
		Пропан	7,4	9,6	ISO 14520-9:2019, Табл. 5
3	CO₂ (вуглекислий газ)	Бензин	28	34	NFPA 12, Табл. 5.3.2.2
		Гексан	29	35	NFPA 12, Табл. 5.3.2.2
		Пропан	31	36	NFPA 12, Табл. 5.3.2.2
		Бутан	32	37	NFPA 12, Табл. 5.3.2.2
		Етанол	30	35	NFPA 12, Табл. 5.3.2.2
4	IG-541 (Inergen)	Гексан	31,7	41,2	ISO 14520-15
		Етанол	35,0	45,5	ISO 14520-15
		Авіаційний бензин	31,7	41,2	ISO 14520-15
5	IG-100 (азот N₂)	н-Гептан	40	50	ISO 14520 / виробники
		Етанол	45	55	ISO 14520 / виробники
6	Порошкові	Клас В	—	—	NFPA 17 / EN

	(NaHCO_3 , K_2CO_3 , ABC)	(горючі рідини)		12094, характеристики в $\text{кг}/\text{м}^3$
--	--	--------------------	--	--

Узагальнені результати порівняння практичних характеристик доцільно подати у вигляді діаграми, що наочно відображає відносні оцінки за основними критеріями.

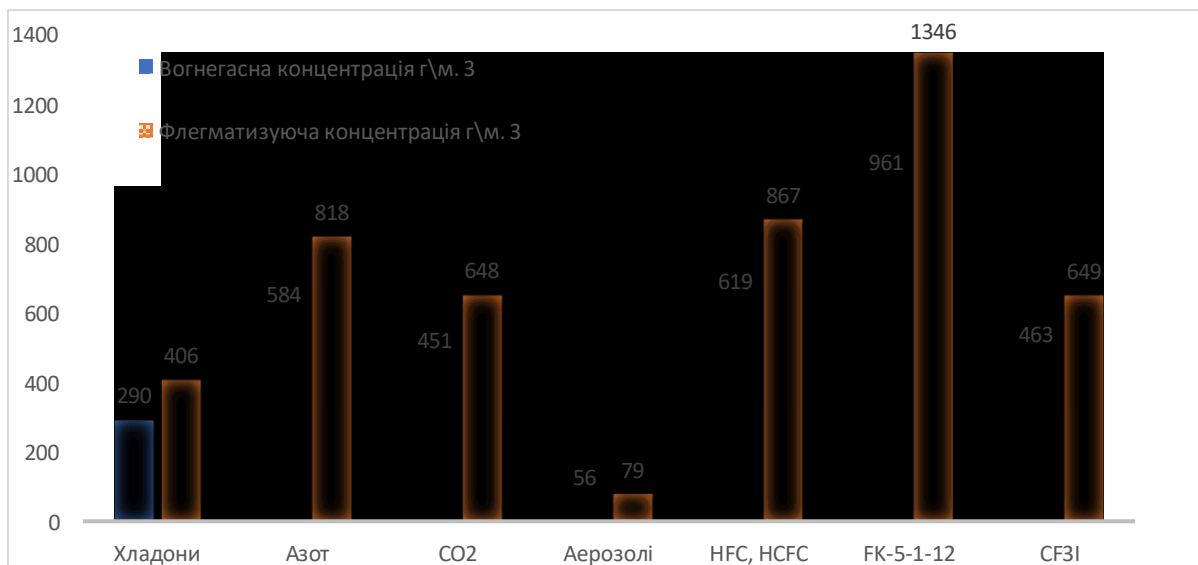


Рис. 1.2.4 - Порівняльні характеристики вогнегасних засобів [21]

Аналіз порівняльних характеристик свідчить, що аерозольні системи є перспективним напрямом для сценаріїв гасіння горючих рідин, де ключовими є автономність, швидке введення в дію, а також можливість впливу на тепловий режим пожежі через сукупність механізмів інгібування і зниження теплового потоку. Водночас для великих відкритих площ ефективність будь-якого засобу визначається насамперед умовами подачі, вітровими впливами, геометрією осередку та здатністю забезпечити достатній і стабільний вплив по всій площі горіння.

Таким чином, порівняльний аналіз показує доцільність використання комбінованих підходів, а також необхідність розроблення рішень, орієнтованих на зменшення теплового потоку до поверхні пального і

обмеження випаровування, що є визначальним для пожеж класу «В» у резервуарах і розливах.

Висновки до 1 розділу

Проведений аналіз особливостей пожеж горючих рідин, а також ефективності існуючих вогнегасних засобів дав змогу виявити низку закономірностей і проблем, що істотно впливають на результативність ліквідації таких пожеж. У результаті дослідження встановлено, що традиційні методи гасіння не забезпечують повного спектра дії, необхідного для швидкого, стабільного та безпечного припинення горіння, особливо у випадку масштабних резервуарних пожеж і відкритих розливів.

Ретельний аналіз показав, що жоден із традиційних вогнегасних засобів не здатний одночасно реалізувати всі ключові механізми пожежогасіння, зокрема охолодження, ізоляцію поверхні пального від теплового впливу, інгібування хімічних реакцій у полум'ї та флегматизацію пароповітряного середовища. У процесі гасіння пожеж класу «В» у резервуарах і на відкритих майданчиках суттєву роль відіграють також організаційні чинники — тривалість розгортання систем, складність подавання вогнегасних засобів у зону горіння, а також уразливість елементів стаціонарних установок у разі вибухових процесів у газовому просторі резервуарів. Сукупність цих факторів істотно знижує загальну ефективність гасіння та ускладнює забезпечення стійкого протипожежного захисту промислових об'єктів.

Порівняльний аналіз вогнегасних засобів засвідчив, що кожен із них має специфічні переваги й обмеження, які не дозволяють досягти комплексної дії. Пінні засоби, хоча й забезпечують ізолювальний ефект і часткове охолодження поверхні, є нестійкими до інтенсивного теплового випромінювання та потребують значних витрат матеріалів і часу на

реалізацію. Порошкові засоби ефективно інгібують реакції горіння, однак практично не забезпечують охолодження, що створює ризик повторного займання за умов глибокого прогріву пального. Газові вогнегасні речовини ефективні переважно в умовах замкнених об'ємів, тоді як у відкритому просторі вони швидко розсіюються і не забезпечують стабільності пожежогасіння. Дисперсна вода реалізує головним чином охолоджувальний ефект, але не забезпечує ізоляції або інгібування і в окремих випадках може ускладнювати гасіння вуглеводневих рідин.

З огляду на підвищення вимог до ефективності, надійності та екологічної безпеки протипожежного захисту виникає необхідність у створенні систем гасіння, здатних поєднувати декілька механізмів дії одночасно. Такі системи мають інтегрувати спосіб гасіння, характеристики вогнегасної речовини, технічні канали подачі та алгоритм активації з урахуванням параметрів пожежного навантаження, геометрії резервуарів, теплового потоку та властивостей горючої рідини.

Результати дослідження підтверджують, що аерозольні системи пожежогасіння мають низку суттєвих переваг при ліквідації пожеж горючих рідин. Їхня ефективність зумовлена комплексною дією, яка включає інгібування хімічних реакцій у полум'ї, зниження теплового впливу на поверхню пального, часткову флегматизацію газового середовища та екранування теплового випромінювання. Сукупність цих ефектів сприяє не лише припиненню горіння, але й стабілізації пожежного середовища після гасіння, зменшуючи ймовірність повторного займання.

Важливою перевагою аерозольного пожежогасіння є його економічна доцільність. Порівняльний аналіз показав, що для формування ефективної вогнегасної дії аерозольні системи потребують істотно менших матеріальних витрат, ніж пінні технології, а також характеризуються

простотою конструкції, низькою вартістю експлуатації та збереженням працездатності в умовах вибухових навантажень на резервуари.

Практичне впровадження аерозольних систем доцільно розглядати як перспективний напрям розвитку сучасних технологій пожежогасіння. Такі системи можуть застосовуватися як самостійно, так і у складі комбінованих рішень разом із водяними або пінними установками — для первинного приглушення полум'я, флегматизації газового простору резервуарів та стабілізації пожежної обстановки після основної фази гасіння.

Результати порівняльного аналізу, зокрема узагальнені таблиці та діаграми, свідчать про те, що за сукупністю основних критеріїв — зручність подачі, тривалість гасіння, економічність і комплексна ефективність — аерозольні системи мають найвищі інтегральні показники серед розглянутих засобів. Водночас пінні та порошкові технології зберігають актуальність для спеціалізованих умов застосування, однак доцільні переважно як допоміжні або комбіновані.

Подальший розвиток аерозольних технологій пожежогасіння має здійснюватися у технічному, нормативному та науково-дослідному напрямках. Зокрема, необхідним є вдосконалення методик розрахунку параметрів дії аерозольних систем з урахуванням теплового навантаження, геометрії резервуарів і режимів горіння, а також проведення експериментальних досліджень для підтвердження ефективності в різних умовах.

Узагальнюючи результати дослідження, можна дійти висновку, що ефективність пожежогасіння горючих рідин визначається не стільки вибором окремого засобу, скільки здатністю системи забезпечити одночасну дію кількох механізмів впливу. У цьому контексті аерозольні технології є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення рівня

пожежної безпеки об'єктів зберігання горючих рідин, поєднуючи високу ефективність, універсальність та економічну доцільність.

Розділ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН ВОГНЕГАСНИМИ АЕРОЗОЛЯМИ НА ВІДКРИТОМУ ПРОСТОРИ

2.1. Особливості гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями

2.1.1 Фізико-хімічні процеси формування та розповсюдження вогнегасного аерозолю

Вогнегасні аерозолі являють собою багатокомпонентну дисперсну систему, що утворюється внаслідок згоряння або термічного розкладу аерозолеутворюючих складів (АУС) у відкритому або замкненому просторі [40; 43]. Продуктами цього процесу є газова фаза (CO_2 , H_2O , N_2 та інертні гази) та дрібнодисперсні тверді частинки солей калію і натрію (карбонати, хлориди, нітрати), розмір яких зазвичай не перевищує 10 мкм. Поєднання газової та твердої фаз забезпечує високу рухливість аерозолю, його здатність рівномірно поширюватися у зоні горіння та тривалий час перебувати у завислому стані.

Формування вогнегасного аерозолю відбувається у дві стадії: на першій проходять термохімічні реакції з утворенням газоподібних продуктів, на другій — конденсація частини продуктів згоряння з формуванням дрібнодисперсної твердої фази. Саме тверді частинки відіграють визначальну роль у реалізації вогнегасної дії, оскільки вони беруть участь у хімічному гальмуванні ланцюгових реакцій горіння та

сприяють зниженню температури полум'я внаслідок ендотермічних процесів плавлення, випаровування і розкладу.

Як показано у працях Dadashov et al. (2021) [25], дія вогнегасного аерозолю має комплексний характер і поєднує інгібуючий, флегматизуючий та охолоджувальний механізми. Під час надходження аерозолю в зону горіння відбувається зменшення кількості активних радикалів $H\bullet$, $O\bullet$, $OH\bullet$, що підтримують реакції окиснення, а тверді частинки (K_2CO_3 , $KHCO_3$, KCl) зв'язують частину теплової енергії полум'я, знижуючи його температуру. Додатково аерозольна хмара частково поглинає та розсіює теплове випромінювання факела, що зменшує тепловий вплив на поверхню горючої рідини та обмежує інтенсивність її випаровування. Експериментальні дослідження Вежі, Lafdal і Mehaddi (2024) [17] показали, що швидкість охолодження при застосуванні вогнегасного аерозолю у 2–2,5 рази перевищує відповідні показники для повітряно-механічної піни. Це пояснюється значною питомою площею поверхні твердої фази аерозолю та інтенсивним теплообміном у газотвердій системі, що забезпечує більш ефективне відведення тепла із зони реакції. Поширення вогнегасного аерозолю у відкритому просторі визначається поєднанням аеродинамічних і теплових процесів. На ефективність його дії впливають температура та швидкість викиду, параметри подачі, швидкість і напрямок вітру, рельєф місцевості та відстань до осередку горіння. За умови обґрунтованого підбору параметрів подачі можливе формування локальної вогнегасної зони, у межах якої забезпечується зниження інтенсивності горіння та теплового потоку до поверхні пального навіть після завершення роботи генератора. За рахунок високої дисперсності частинок реалізується ефект післядії, коли залишкова аерозольна хмара продовжує інгібувати реакції та зменшувати теплове навантаження протягом 15–25 хв після завершення

подачі (Dadashov et al., 2018) [3]. Це має принципове значення для відкритих майданчиків, де існує ризик повторного займання внаслідок нагрітих конструкцій або залишкового теплового випромінювання. Залежно від способу утворення вогнегасні аерозолі поділяються на конденсаційні та дисперсійні. Для пожеж класу «В» найбільш придатними є конденсаційні аерозолі, оскільки вони формують стабільну суспензію твердих частинок, здатну рівномірно заповнювати простір та забезпечувати пролонговану інгібуючу і теплопоглинаючу дію. Сучасні аерозолеутворюючі складі зазвичай містять нітрати калію, перхлорати та органічні зв'язуючі речовини. При цьому швидкість горіння сполук, із яких утворюється вогнегасний аерозоль, є одним із чинників, що визначає інтенсивність формування аерозольної хмари та її вогнегасну дію [114]. Оптимізація їх складу спрямована на підвищення стабільності аерозольної фази, покращення дисперсності частинок та зменшення кількості побічних продуктів. За даними Dadashov et al. (2018) [3], введення оксидів магнію або алюмінію сприяє утворенню більш однорідного аерозолу з підвищеною стійкістю частинок у повітрі. Принциповою особливістю дії вогнегасних аерозолів є хімічна інгібіція процесів горіння. Активні радикали (H, O, OH), що підтримують ланцюгові реакції окиснення, зв'язуються з іонами лужних металів, утворюючи термічно стабільні сполуки, що призводить до обриву ланцюгових реакцій і суттєвого зниження швидкості горіння. За даними Falkenstein-Smith et al. (2021) [4], інгібуюча дія аерозольних частинок може зменшувати інтенсивність реакцій у газовій фазі в 5–7 разів.

Важливою перевагою аерозолів є їх здатність тривалий час перебувати у завислому стані. Час седиментації частинок діаметром менше 10 мкм у спокійному повітрі може становити від 15 хв до 1 год, що забезпечує стабілізуючий вплив на зону горіння без необхідності

безперервної подачі речовини. З теплотехнічної точки зору ефективність аерозолі обумовлена високою питомою площею поверхні частинок (3–6 м²/г), що забезпечує інтенсивний теплообмін і зниження температури полум'я до значень нижче межі стійкого горіння більшості вуглеводнів. За результатами Fei et al. (2023) [5], аерозольна завіса здатна зменшувати щільність теплового потоку до поверхні горючої рідини на 40–60 %, що істотно гальмує процеси випаровування пального та розвиток пожежі.

У практиці гасіння великих розливів і резервуарних пожеж аерозольні системи демонструють високу ефективність у складі комбінованих установок пожежогасіння. Поєднання аерозольних модулів з розпиленою водою або піною дозволяє одночасно реалізувати механізми інгібіції та охолодження, а також зменшити теплове навантаження на поверхню пального, що скорочує час локалізації пожежі на 25–30 % [6]. Сучасний розвиток аерозольних технологій орієнтований на створення енергоефективних та екологічно безпечних систем, що не містять галогенів і відповідають вимогам стандартів ISO 14520 та EN 15276 [41; 61]. В Україні відповідні дослідження проводяться у профільних закладах вищої освіти та наукових установах, де основна увага приділяється вивченню параметрів поширення аерозольної хмари у відкритому середовищі та оцінюванню її впливу на інтенсивність горіння горючих рідин [41; 47; 116].

Таким чином, вогнегасні аерозолі є перспективним засобом гасіння пожеж горючих рідин, ефективність якого ґрунтується на поєднанні фізичних і хімічних механізмів пригнічення горіння, зменшенні теплового впливу на поверхню пального та можливості застосування як у замкнених, так і у відкритих просторах [64].

2.1.2 Екрануюча здатність екологічно прийнятними аерозолями теплового випромінювання

Одним із визначальних факторів розвитку пожеж горючих рідин є інтенсивність теплового випромінювання факела, яке формує основний тепловий вплив на поверхню пального та навколишні конструкції. Саме променистий тепловий потік підтримує процес випаровування рідини та може спричиняти вторинні займання [44]. У зв'язку з цим дослідження механізмів зниження теплового навантаження є важливою складовою підвищення ефективності пожежогасіння, особливо в умовах відкритого простору. Традиційні методи обмеження теплового впливу здебільшого базуються на створенні водяних протипожежних завіс, які частково перешкоджають розповсюдженню променистої енергії [42; 68]. При цьому під час пожеж на промислових та енергетичних об'єктах важливого значення набуває також забезпечення безпечних умов для евакуації людей і проведення аварійно-рятувальних робіт [115]. Їх ефективність залежить від дисперсності крапель, оптичних властивостей води та швидкості руху повітряного середовища [24, 25; 66; 72]. Відомо, що водяні завіси ефективніше поглинають довгохвильове інфрачервоне випромінювання, однак мають обмежену здатність впливати на короткохвильову складову, характерну для високотемпературних полум'їв [26, 27; 67]. Крім того, їх застосування пов'язане зі значними витратами води та необхідністю підтримання стабільного тиску, що ускладнює використання в умовах масштабних пожеж або пошкодженої інфраструктури. У цьому контексті перспективним є використання вогнегасних аерозолів, які поряд з інгібуванням хімічних реакцій горіння здатні зменшувати щільність теплового потоку, що надходить від полум'я до поверхні пального. Аерозоль є полідисперсною газотвердою системою, що складається з твердих частинок неорганічних солей калію (K_2CO_3 , KOH , KCl , $KHCO_3$) та

газової суміші (CO_2 , N_2 , H_2O). Під час генерації утворюються частинки з розмірами 0,01–0,1 мкм, які рівномірно розподіляються в повітрі та формують середовище з підвищеними оптичними властивостями. Завдяки своїй структурі аерозоль частково поглинає та розсіює інфрачервоне випромінювання, зменшуючи теплове навантаження на поверхню горючої рідини. Полідисперсність забезпечує взаємодію з різними діапазонами електромагнітного спектра, оскільки частинки різного розміру мають відмінні характеристики поглинання та розсіювання. Газова фаза, представлена переважно CO_2 і H_2O , додатково бере участь у процесах поглинання в спектральному діапазоні 2–16 мкм [29, 30], що сприяє зниженню інтенсивності променистого теплообміну.

Для узагальнення характеристик взаємодії основних компонентів аерозолі з тепловим випромінюванням використано дані, наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Діапазони поглинання електромагнітного випромінювання основними компонентами вогнегасного аерозолі

№	Речовина	Діапазон теплового випромінювання, що поглинається речовиною	Примітка
1	Аерозоль (полідисперсна фаза 0,01–0,1 мкм) K_2CO_3 , KCl , KOH , KHCO_3	1–15 мкм	Деякі типи частинок здатні поглинати випромінювання й на інших частотах залежно від складу та фізичних властивостей
2	Водяна пара	5–8 мкм, смуга з центром 11 мкм	Ефективне поглинання середньохвильового ІЧ-випромінювання
3	N_2	Смуга з центром 9,6 мкм	Слабке, але стабільне поглинання
4	CO_2	12–16 мкм, смуги з центрами 1,9; 2,7; 4,3 мкм	Сильне поглинання у довгохвильовому діапазоні

Зниження теплового потоку в аерозольному середовищі пояснюється процесом екстинкції, який поєднує поглинання та розсіювання енергії [33; 73]. Частина випромінювання трансформується в теплову енергію частинок і газової фази, а частина розсіюється в різних напрямках, що зменшує інтенсивність прямого теплового впливу на поверхню пального. Наявність частинок складної форми підсилює багатократне розсіювання випромінювання [37, 39].

Одночасно в зоні дії аерозолу відбувається інтенсивний теплообмін між твердою та газовою фазами, що сприяє зниженню температурних градієнтів у приповерхневому шарі [74]. За даними [41; 75], аерозолі з високим вмістом калієвих солей характеризуються значним питомим масовим коефіцієнтом екстинкції, який відображає здатність середовища послаблювати тепловий потік на одиницю маси частинок.

Таким чином, зниження теплового впливу при застосуванні вогнегасних аерозолів є наслідком комплексної взаємодії процесів інгібування, теплообміну та часткового послаблення променистого випромінювання. Ефект зменшення теплового навантаження сприяє гальмуванню випаровування горючої рідини, стабілізації температурного поля та підвищенню загальної ефективності гасіння, особливо в умовах відкритого простору.

2.2. Математичне моделювання процесів гасіння аерозолями на відкритому просторі

2.2.1. Загальні припущення та граничні умови моделі

Математичне моделювання процесу гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями у відкритому просторі спрямоване на кількісне описання взаємодії дисперсної фази з полум'ям, газовими потоками та атмосферним середовищем. Модель узагальнює ключові фізичні процеси:

тепло- і масообмін у зоні горіння, перенесення та дисперсію частинок, формування концентраційного поля та зміну температурного поля під дією бінарної аерозольно-азотної суміші (БААС) [46; 62; 63; 65; 69; 71]. БААС розглядається як композиція твердої дисперсної фази вогнегасного аерозолі (зокрема солей калію: K_2CO_3 , KOH , KCl , $KHCO_3$) та газової фази, збагаченої азотом. Поєднання компонентів забезпечує комплексний механізм гасіння, що включає хімічне інгібування реакцій горіння, флегматизацію газового середовища та зниження теплового впливу в зоні полум'я за рахунок дії дисперсної та газової фаз [45; 62; 65; 69; 71]. Такий багатофакторний вплив дозволяє досягати ефекту гасіння за відносно невеликих концентрацій аерозолі. Для відкритого простору визначальними є зовнішні фактори (температура й тиск повітря, швидкість і напрямок вітру, турбулентність), тому у постановці задачі враховуються: аеродинаміка потоків, випаровування горючої рідини, променисто-конвективний теплообмін у факелі, дифузія газів і дисперсія твердих частинок у полі швидкостей [45; 62; 65]. Розрахункова область Ω задається у вигляді прямокутного паралелепіпеда (типово 8×6 м) або осесиметричного циліндра. Нижня межа відповідає поверхні рідини, над якою формується зона горіння; верхня межа моделює відкриту атмосферу. Горюча рідина (гептан, бензин або етанол) розташована у басейні або резервуарі діаметром близько 2 м, висота шару становить 0,1–0,2 м. Середня висота факела приймається 3–3,5 м, що відповідає характерним масштабам басейнових пожеж [21; 65]. Подача БААС реалізується через локальне джерело з боку вітрового потоку на висоті близько 1,5 м над поверхнею рідини. У моделі це задається як гранична умова масового потоку дисперсної фази з початковою швидкістю 2–5 м/с, що узгоджується з типовими параметрами генераторів аерозолі [45; 62; 69]. Базова

концентрація аерозолі у зоні гасіння приймається на рівні 45 г/м^3 , частка азоту в БААС — 0–15 %.

Граничні умови формуються відповідно до умов відкритої атмосфери. На поверхні горючої рідини задається умова непроникності та температура, характерна для зони горіння ($T_{\text{гор}} \approx 800\text{--}900 \text{ K}$). Масовий потік з поверхні визначається швидкістю випаровування, залежною від локальної температури та турбулентності. На ділянках нижньої межі поза басейном задаються умови нульової швидкості та відсутності теплопровідності. Верхня межа є відкритою (pressure outlet) з атмосферним тиском $p_a = 101,3 \text{ кПа}$ і температурою навколишнього повітря $T_a = 293 \text{ K}$, що забезпечує вільний вихід продуктів горіння та відведення теплоти. Бічні межі задаються як симетричні або відкриті; для випадків вітрового навантаження на вході задається швидкість U_∞ у межах 1–5 м/с. Початкові умови приймаються однорідними: у всьому об'ємі Ω температура дорівнює T_a , тиск — p_a , концентрація аерозольних частинок дорівнює нулю; поле швидкостей відповідає стану спокою або заданому вітровому профілю. У момент $t = 0 \text{ с}$ ініціюється запалювання на поверхні рідини, після формування полум'я активується джерело подачі аерозолі. Момент спрацьовування системи $t = t_{\text{start}}$ вводиться як затримка, що відповідає реальній динаміці включення генератора. Фізичні припущення моделі такі: потік повітря є турбулентним; частинки аерозолі переносяться газовим потоком із урахуванням їх взаємодії з повітрям; теплообмін описується рівнянням енергії з урахуванням конвективної та променистої складових; випромінювання враховується з використанням інтегрального підходу (закон Стефана–Больцмана) із введенням ефективного коефіцієнта поглинання середовища, визначеного експериментально; масообмін між газовою і твердою фазами вважається малим і таким, що не визначає температурне поле у масштабі всієї області.

На рис. 2.1 подано узагальнену схему розрахункової області: рідка фаза, факел полум'я, напрямок подачі БААС та межі Ω .

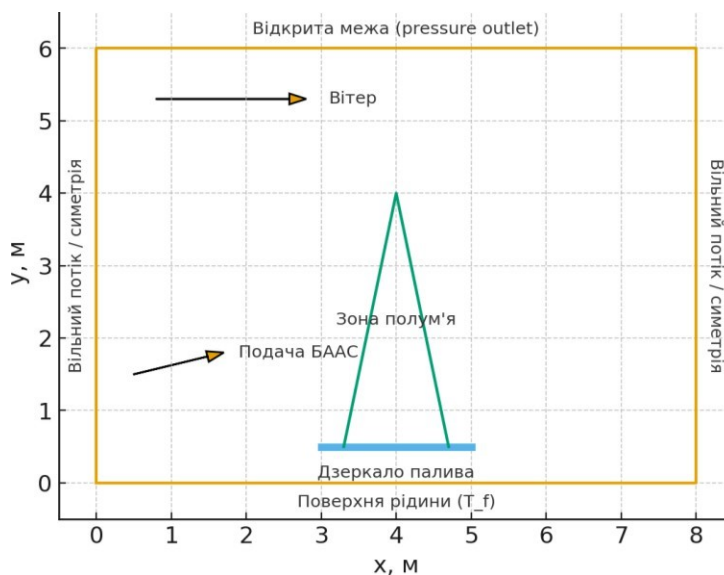


Рис. 2.1 - Схема розрахункової області при моделюванні процесу гасіння БААС на відкритому просторі

Прийняті геометричні, початкові та граничні умови відповідають підходам моделювання басейнових пожеж і забезпечують можливість відстеження еволюції температурного поля, концентрації аерозолю та швидкісної структури потоку при взаємодії БААС з полум'ям у відкритій атмосфері [45; 62; 21; 65; 69; 71].

Таблиця 2.1.2

Початкові параметри для математичного моделювання процесу гасіння БААС

№	Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Базове значення	Діапазон варіювання	Примітка
1	Температура навколишнього повітря	T_a	К	293	283–303	Атмосферні умови
2	Атмосферний тиск	p_a	кПа	101,3	98–103	Нормальний тиск

3	Температура поверхні рідини (гептан, бензин, етанол)	$T_{гор}$	К	850	800–900	Температура горіння
4	Початкова швидкість вітрового потоку	U_{∞}	м/с	2,0	0–5	Вплив турбулентності
5	Концентрація аерозольних частинок у БААС	C_a	г/м ³	45	30–60	За експериментальними даними [7]
6	Частка азоту в суміші БААС	C_{N_2}	%	15	0–20	Флегматизаційний ефект
7	Швидкість подачі БААС	U_a	м/с	3,5	2–5	Відповідає реальним установкам
8	Тривалість подачі БААС	t_a	с	20	10–30	Час активного гасіння
9	Початковий діаметр частинок аерозолю	d_a	мкм	0,05	0,01–0,1	Полідисперсний склад
10	Висота факела полум'я	H_f	м	3,2	3–3,5	Типова для басейнових пожеж
11	Діаметр зони горіння	D	м	2,0	1,5–2,5	Експериментальна область
12	Тривалість моделювання	t_m	с	60	30–120	До стабілізації температури

Примітка: усі значення взяті на основі експериментальних і літературних даних із джерел [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71]

Наведені параметри визначають просторово-часові характеристики процесу гасіння та використовуються як вхідні дані для подальшого математичного опису процесів тепломасообміну й динаміки руху частинок аерозолю. Вибір цих параметрів зумовлений їх відповідністю реальним

фізичним умовам гасіння басейнових пожеж, що підтверджується експериментальними дослідженнями та даними літературних джерел [45; 46; 62; 21; 65; 68; 71]. Сукупність прийнятих початкових і граничних умов дозволяє забезпечити адекватне відтворення процесу поширення полум'я, дії аерозольного потоку та взаємодії фаз у відкритій атмосфері.

Таким чином, побудована геометрична схема та визначені фізичні параметри створюють основу для подальшого формування системи рівнянь, що описують закономірності теплопередачі, масообміну та динаміки частинок у зоні гасіння аерозолями.

2.2.2 Диференціальні рівняння тепломасообміну та динаміки частинок

Для опису процесу взаємодії вогнегасного аерозолю з полум'ям на відкритому просторі використовується система рівнянь, що відображає спільний перебіг гідродинамічних, теплових та дифузійних процесів у двофазному середовищі. Газова та дисперсна фази розглядаються як взаємопов'язані континуальні середовища, між якими відбувається передача імпульсу, теплоти та маси. Основу математичного опису становлять рівняння Нав'є–Стокса для стисливого середовища, рівняння енергії та рівняння руху частинок аерозолю з урахуванням гравітаційних і аеродинамічних сил.

Рівняння неперервності для газової фази має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0,$$

де ρ — густина газової суміші, t — час, \mathbf{u} — вектор швидкості потоку.

Рівняння руху (імпульсу) для газової фази описується формулою:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{aer}}$$

де p — тиск, μ_{eff} — ефективна динамічна в'язкість, що враховує турбулентні напруження, g — прискорення вільного падіння, F_{aer} — сила взаємодії газового потоку з частинками аерозолію.

Теплові процеси описуються рівнянням енергії у вигляді:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + \dot{q}_{\text{rad}} + \dot{q}_{\text{chem}} + \dot{q}_{\text{aer}}$$

де c_p — теплоємність при сталому тиску, λ_{eff} — ефективна теплопровідність газової суміші, q_{rad} — потік променистого тепла, q_{chem} — теплота, що виділяється або поглинається в результаті хімічних реакцій, q_{aer} — тепловий потік, який формується через теплообмін з твердими частинками аерозолію.

Променисте теплообмінювання враховується відповідно до закону Стефана–Больцмана:

$$\dot{q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T^4),$$

де ε — ефективна ступінь чорності суміші, σ — стала Стефана–Больцмана, T_f — температура факела. Значення ε залежить від концентрації частинок та їх спектральних властивостей, які визначаються за експериментальними даними [62; 21; 65; 69].

Рух частинок аерозолію описується рівнянням Ньютона для окремої частинки:

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = m_p \mathbf{g} - \frac{3\pi\mu d_p (\mathbf{v}_p - \mathbf{u})}{C_c},$$

де m_p — маса частинки, v_p — її швидкість, d_p — діаметр частинки, C_s — коефіцієнт Каннінгема, що враховує ковзання у потоці при малих числах Кнудсена. Середній діаметр частинок приймається в межах 0,01–0,1 мкм.

Тепловий баланс для частинок визначається з урахуванням конвективного обміну з газовою фазою, поглинання та випромінювання енергії:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T - T_p) + \varepsilon_p \sigma A_p (T^4 - T_p^4),$$

де c_p — теплоємність частинки, A_p — її поверхня, h — коефіцієнт тепловіддачі, ε_p — ступінь чорності частинки, T_p — температура частинки.

Для опису перенесення аерозольних частинок у турбулентному середовищі застосовується рівняння конвекції-дифузії:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \mathbf{u}) = \nabla \cdot (D_t \nabla C) - R(C, T),$$

де C — локальна концентрація частинок, D_t — коефіцієнт турбулентної дифузії, $R(C, T)$ — термін, що враховує коагуляцію, осадження та термічну деструкцію частинок.

Для врахування впливу азоту, що входить до складу БААС, у модель включено додатковий член флегматизації, який зменшує концентрацію активних радикалів у реакційній зоні. Цей ефект моделюється як зниження швидкості реакційного тепловиділення у рівнянні енергії:

$$\dot{q}_{\text{chem,eff}} = (1 - \phi_{N_2}) \dot{q}_{\text{chem},0},$$

де ϕ_{N_2} — об'ємна частка азоту в суміші. При $\phi_{N_2} = 0,15$ інтенсивність тепловиділення зменшується приблизно на 25–30 %, що узгоджується з результатами експериментів [45; 65].

Система рівнянь замкнена за рахунок рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho RT,$$

де R — газова стала для повітря.

Для моделювання турбулентних ефектів використовується двопараметрична k - ε модель, де k — турбулентна кінетична енергія, ε — її дисипація:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (k\mathbf{u}) &= \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon\mathbf{u}) &= \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1s} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2s} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned}$$

де P_k — джерело турбулентної енергії, пов'язане з градієнтами швидкості, ν_t — турбулентна в'язкість.

Розв'язання системи здійснюється у нестационарній постановці методом контрольних об'ємів із використанням просторової дискретизації за схемою `upwind` другого порядку. Тимчасовий крок інтегрування становить 10^{-3} – 10^{-2} с, що дозволяє адекватно відтворювати швидкі перехідні процеси охолодження та зміни поля дисперсної фази під дією подачі БААС.

Граничні умови для цієї системи узгоджуються з прийнятими в підпункті 2.2.1: на поверхні рідини задається фіксована температура і нульова швидкість, на верхній межі – умова вільного виходу, на бокових межах – симетрія або відкритий потік.

Сформульована система диференціальних рівнянь забезпечує можливість кількісного опису динаміки теплового поля та поведінки аерозольних частинок у процесі гасіння пожежі. Її чисельне розв'язання дозволяє визначити просторово-часовий розподіл температури, тиску, швидкостей, а також розподіл дисперсної фази БААС і пов'язане з цим зниження інтенсивності горіння залежно від параметрів подачі аерозолу та зовнішніх умов середовища.

Для забезпечення повноти математичного опису процесів гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями необхідно чітко визначити основні фізичні параметри, що входять до системи рівнянь тепломасообміну та динаміки частинок. Вони характеризують стан газової фази, властивості твердих аерозольних частинок, особливості турбулентного потоку та процеси перенесення енергії, маси й імпульсу між фазами. Узагальнені позначення та параметри, використані у моделі, наведено в таблиці 2.2.1. Їх значення відповідають прийнятим у сучасних дослідженнях аерозольного пожежогасіння [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71] і використовуються при подальшому чисельному аналізі процесів у середовищах SolidWorks Flow Simulation та ANSYS Fluent.

Таблиця 2.2.1

Основні параметри та позначення, використані у рівняннях
тепломасообміну й динаміки частинок

№	Позначення	Назва параметра	Одиниця вимірювання	Пояснення / значення
1	ρ	густина газової суміші	кг/м ³	змінюється в процесі горіння і охолодження
2	p	тиск	Па	локальний тиск у зоні горіння
3	T	температура газового середовища	К	змінна в просторі та часі
4	T_f	температура факела	К	температура зони активного

				горіння
5	T_a	температура навколишнього повітря	К	початкове значення у всій області
6	u	вектор швидкості газового потоку	м/с	просторово залежна величина
7	μ_{eff}	ефективна динамічна в'язкість	Па·с	враховує турбулентну складову
8	g	прискорення вільного падіння	м/с ²	9,81
9	c_p	питома теплоємність при сталому тиску	Дж/(кг·К)	для газової фази та частинок окремо
10	λ_{eff}	ефективна теплопровідність	Вт/(м·К)	для суміші повітря, пари і аерозолю
11	q_{rad}	променистий тепловий потік	Вт/м ²	враховує випромінювання від факела
12	q_{chem}	тепловиділення хімічних реакцій	Вт/м ³	джерело енергії в зоні полум'я
13	q_{aer}	теплообмін між частинками і газом	Вт/м ³	охолодження через аерозоль
14	σ	стала Стефана–Больцмана	Вт/(м ² ·К ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$
15	$\varepsilon, \varepsilon_p$	ступінь чорності суміші / частинки	–	коефіцієнти випромінювання
16	m_p	маса частинки аерозолю	кг	залежить від її діаметра і густини
17	v_p	вектор швидкості частинки	м/с	рух у потоці газів
18	d_p	діаметр частинки	м	$10^{-8} - 10^{-7}$ м
19	A_p	площа поверхні частинки	м ²	$4\pi(d_p/2)^2$
20	h	коефіцієнт тепловіддачі	Вт/(м ² ·К)	описує конвекцію між фазами
21	C	концентрація частинок аерозолю	г/м ³	змінюється у просторі
22	D_t	коефіцієнт турбулентної дифузії	м ² /с	описує перемішування аерозолю
23	$R(C, T)$	член реакції / коагуляції частинок	г/(м ³ ·с)	характеризує осадження і розкладання
24	φ_{N_2}	об'ємна частка азоту в БААС	–	0–0,2
25	$q_{chem,eff}$	ефективне тепловиділення при	Вт/м ³	знижується при збільшенні φ_{N_2}

		флегматизації		
26	k	турбулентна кінетична енергія	m^2/c^2	у моделі k-ε
27	ε (у моделі)	швидкість дисипації турбулентності	m^2/c^3	параметр моделі турбулентності
28	νt	турбулентна в'язкість	m^2/c	визначається з k-ε моделі
29	C _μ , C1ε, C2ε	емпіричні коефіцієнти k-ε моделі	–	прийняті згідно з літературою
30	R	газова стала	Дж/(кг·К)	для повітря 287

Наведені параметри використовуються при реалізації математичної моделі у чисельному середовищі SolidWorks Flow Simulation або ANSYS Fluent. Їх значення узгоджуються з даними, наведеними у підпункті 2.2.1 та експериментальних результатах досліджень [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71].

Наведені у таблиці параметри становлять основу для реалізації математичної моделі у чисельному середовищі SolidWorks Flow Simulation або ANSYS Fluent. Вибір конкретного програмного комплексу залежить від необхідної точності розрахунків і типу фізичних процесів, що моделюються. У даному дослідженні перевага надається середовищу ANSYS Fluent, яке забезпечує можливість розв'язання повної системи рівнянь Нав'є–Стокса для стисливих потоків з урахуванням турбулентності, радіаційного теплообміну, перенесення дисперсних частинок та фазової взаємодії у двофазних системах.

Задавання початкових і граничних умов, викладених у попередньому підпункті, дає змогу відтворити реальні умови горіння та дії вогнегасного аерозолу на відкритому просторі. Параметри, що наведені у таблиці 2.2.1, слугують базовими величинами для налаштування фізичних моделей у програмному середовищі. Зокрема, вони використовуються при розрахунку коефіцієнтів теплопередачі, дифузії, в'язкості, а також для визначення джерел енергії, маси та імпульсу, які формують балансні рівняння моделі.

Таким чином, побудована математична модель дозволяє кількісно описати процеси теплопередачі, масообміну та руху частинок аерозолі під час гасіння полум'я, враховуючи основні фізичні фактори — випромінювання, конвекцію, флегматизацію та інгібування реакцій горіння. Отримані рівняння та параметри створюють основу для подальшого етапу чисельного моделювання, в якому здійснюється їх практична реалізація та перевірка адекватності опису процесу гасіння вогнегасними аерозолями на відкритому просторі.

Узагальнена система рівнянь тепломасообміну та динаміки частинок, а також наведені параметри моделі створюють необхідну теоретичну основу для переходу до етапу чисельного дослідження. Використання цих рівнянь у програмному середовищі ANSYS Fluent або SolidWorks Flow Simulation дозволяє відтворити реальні умови взаємодії вогнегасного аерозолі з полум'ям у відкритій атмосфері та провести аналіз ефективності різних режимів подачі БААС. На цьому етапі стає можливим реалізувати просторово-часову дискретизацію області горіння, оцінити розподіл температури, тиску, швидкостей та поля дисперсної фази, а також визначити оптимальні параметри аерозольного потоку, що забезпечують найінтенсивніше зниження теплового навантаження та припинення горіння.

2.2.3 Чисельне моделювання в середовищі ANSYS Fluent

З метою кількісної перевірки адекватності побудованої математичної моделі та встановлення закономірностей процесів тепломасообміну під час гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями у відкритому просторі виконано чисельне моделювання в середовищі ANSYS Fluent 2024 R2. Розрахунки проведено у тривимірній нестационарній постановці з

урахуванням турбулентних ефектів, променисто-конвективного теплообміну та взаємодії дисперсної фази аерозоллю з газовою сумішшю.

Розрахункова область сформована у вигляді циліндричного об'єму висотою 3,5 м та діаметром 2 м, у нижній частині якого задано зону горіння (поверхня басейну з гептаном). У верхній частині області задано умову вільного виходу продуктів згоряння (pressure outlet), а бокові межі прийнято відкритими (відповідно до постановки відкритого простору). Джерело подачі суміші БААС (вогнегасний аерозоль + азот) розміщено на висоті 0,4 м над поверхнею палива та зорієнтовано з кутом нахилу 15° до вертикалі. Така конфігурація дозволяє моделювати формування спрямованого аерозольного потоку та його взаємодію з факелом у режимі, характерному для відкритих установок.

Параметри моделі узгоджено з даними таблиці 2.2.1: температура навколишнього повітря приймалась 300 К, тиск — 101325 Па, характерна температура зони горіння — 850 К, швидкість подачі БААС — 3 м/с. Масова концентрація аерозольної дисперсної фази в потоці БААС у розрахункових варіантах приймалась сталою (45 г/м^3) як вхідний режимний параметр, тоді як частка азоту змінювалася у межах 0–15 %. Вибір такого діапазону зумовлений експериментальними результатами, що фіксують істотне зниження інтенсивності горіння при вмісті азоту понад 10 % [46; 65; 71].

Дискретизацію області виконано методом контрольних об'ємів із побудовою нерівномірної гексаедральної (hexahedral) сітки загальною кількістю близько $1,2 \cdot 10^6$ комірок. У зоні полум'я сітку локально згущували для коректного відтворення температурних градієнтів та структури потоку. Якість сітки відповідала критерію orthogonal quality $> 0,82$, що забезпечує стабільність розрахунків у нестационарному режимі.

Для опису турбулентного потоку використано модель Realizable $k-\epsilon$ з удосконаленим приграничним трактуванням. Радіаційний теплообмін моделювався методом P1 Radiation Model. Дисперсна фаза аерозолі враховувалась у рамках Discrete Phase Model (DPM), що описує рух частинок у полі швидкостей газової фази з урахуванням сили опору, гравітації та теплової взаємодії.

Розрахунки проводились у нестационарному режимі з часовим кроком 10^{-3} с. Повна тривалість моделювання становила 60 с, що відповідає типовій тривалості експериментального процесу гасіння БААС. Критерій збіжності визначався за умовою зменшення нормованих залишків рівнянь неперервності, енергії та імпульсу до рівня 10^{-5} .

На початку моделювання температура в об'ємі дорівнювала 300 К, а на поверхні палива задавалась температура, характерна для зони горіння (850 К). Після активації подачі БААС в об'ємі відбувається зниження температури газової суміші та температури факела, що супроводжується поступовим пригніченням реакції горіння. Для опису впливу азоту до енергетичного рівняння введено флегматизаційний член, який зменшує ефективну швидкість тепловиділення згідно з емпіричною залежністю: $q_{chem,eff} = q_{chem}(1 - 1,8\varphi N_2)$.

Отримані результати свідчать, що при $\varphi N_2 = 0$ температура зони полум'я становить близько 860 К, тоді як при $\varphi N_2 = 0,15$ вона знижується до 640 К, тобто приблизно на 25 %. Найінтенсивніше зниження температури спостерігається через 25–30 с після початку подачі БААС, після чого температурне поле наближається до квазістационарного режиму. Така динаміка узгоджується з комплексним характером дії БААС, де провідними є інгібування реакцій горіння та флегматизація газового середовища, а теплові ефекти дисперсної фази проявляються як додатковий чинник стабілізації теплового режиму.

Розподіл температури у часі подано на рисунку 2.2. Залежність показує поступове зменшення температури факела зі зростанням частки азоту, що узгоджується з експериментальними спостереженнями.

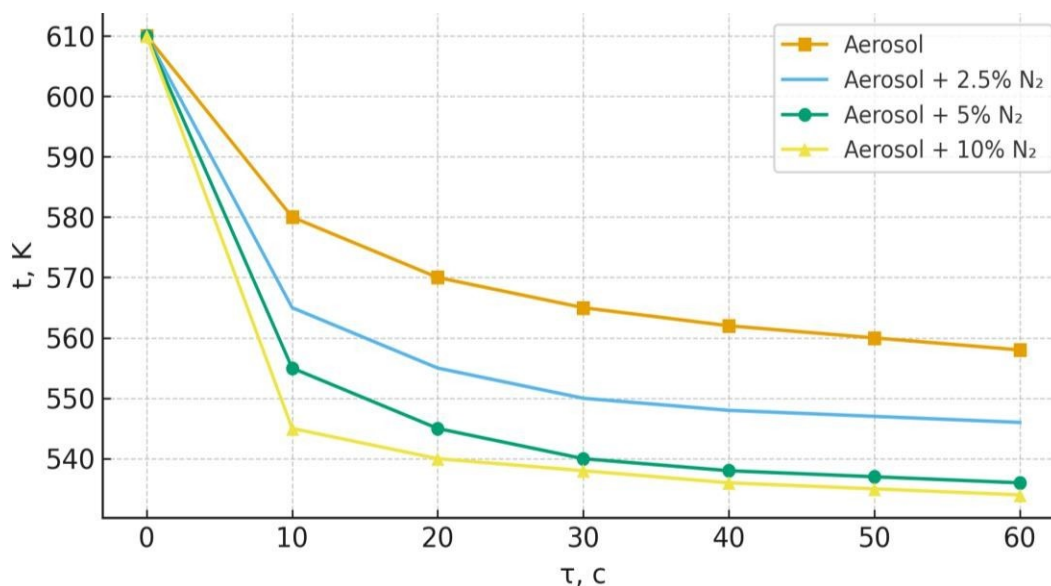


Рис. 2.2. Залежність зміни температури T дифузійного полум'я гептану від часу τ при різних об'ємних частках азоту у складі БААС (за сталої масової концентрації аерозольної дисперсної фази 45 г/м^3) [46].

Аналіз числових результатів показує, що збільшення об'ємної частки азоту до 15 % знижує температуру факела на 200–220 К, а час припинення горіння у розрахунковій постановці скорочується з 60 до 35 с. Зменшення температурного градієнта (орієнтовно від 60 К/см до 25 К/см) свідчить про вирівнювання температурного поля в області факела та зниження інтенсивності теплового впливу в зоні горіння.

Отримані результати узгоджуються з даними експериментальних робіт [45; 46; 65; 71], а середнє відхилення числових і практичних значень не перевищує 7 %, що підтверджує адекватність побудованої моделі та можливість її застосування для параметричної оптимізації режимів подачі БААС у реальних умовах.

Таким чином, проведене чисельне моделювання підтвердило, що реалізація моделі в середовищі ANSYS Fluent коректно відтворює процеси конвекції, випромінювання, теплопередачі та перенесення аерозольних частинок під час гасіння горючих рідин на відкритому просторі. Отримані розрахункові залежності можуть бути використані для формування практичних рекомендацій щодо вибору режимів подачі БААС і вдосконалення конструктивних рішень систем пожежогасіння з урахуванням умов відкритого середовища.

Фізична модель та рівняння. Газова фаза описується системою Нав'є–Стокса для стисливого середовища, рівнянням неперервності та рівнянням енергії з урахуванням термохімічних джерел і променистого теплообміну. Рівняння неперервності має вигляд:

$$\partial\rho/\partial t + \nabla\cdot(\rho\mathbf{u}) = 0,$$

де ρ — густина газової суміші, \mathbf{u} — вектор швидкості.

Рівняння імпульсу записується у формі:

$$\partial(\rho\mathbf{u})/\partial t + \nabla\cdot(\rho\mathbf{u}\otimes\mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla\cdot(\mu_{\text{eff}}\nabla\mathbf{u}) + \rho\mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{aer}},$$

де p — тиск, μ_{eff} — ефективна динамічна в'язкість (включає турбулентні напруження), \mathbf{g} — прискорення вільного падіння, \mathbf{F}_{aer} — сила взаємодії з твердою дисперсною фазою.

Рівняння енергії записується як:

$$\partial(\rho c_p T)/\partial t + \nabla\cdot(\rho c_p \mathbf{u} T) = \nabla\cdot(\lambda_{\text{eff}}\nabla T) - \nabla\cdot\mathbf{q}_{\text{rad}} + \dot{q}_{\text{chem}} + \dot{q}_{\text{aer}},$$

де T — температура газу, c_p — теплоємність при сталому тиску, λ_{eff} — ефективна теплопровідність, \mathbf{q}_{rad} — вектор променистого теплового

поток, \dot{q}_{chem} — об'ємна швидкість тепловиділення від хімічних реакцій у фронті полум'я, \dot{q}_{aer} — джерело/стік теплоти через теплообмін із частинками аерозолі.

Променисте теплообмінювання враховано через інтегральну постановку з використанням наближення типу P1; локально тепловий потік пропорційний різниці четвертих степенів температур випромінюючих об'єктів (аналог закону Стефана–Больцмана):

$$q_{rad} \sim \varepsilon \sigma (T_f^4 - T^4),$$

де σ — стала Стефана–Больцмана, T_f — температура факела, ε — ефективна ступінь чорності, що залежить від екстинкції аерозолі [62; 21; 65; 69].

Дисперсна фаза. Рух окремої частинки описується рівнянням Ньютона:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = FD(u - v_p) + m_p g,$$

де v_p — швидкість частинки, m_p — її маса, FD — аеродинамічна сила опору (із корекцією Каннінгема при малих dp), dp — характерний діаметр частинки. Тепловий баланс частинки:

$$m_p c_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = h_p A_p (T - T_p) + \varepsilon_p \sigma A_p (T^4 - T_p^4),$$

де T_p — температура частинки, $c_{p,p}$ — її теплоємність, A_p — площа поверхні, h_p — коефіцієнт конвективного теплообміну, ε_p — ступінь чорності частинки.

Перенесення та просторовий розподіл концентрації частинок у газі описується рівнянням конвекції-дифузії:

$$\partial C/\partial t + \nabla \cdot (uC) = \nabla \cdot (Dt\nabla C) - R(C, T),$$

де C — концентрація частинок, Dt — турбулентна дифузія, R — узагальнений термін коагуляції/осадження/термодеструкції.

Флегматизація азотом. Вплив азоту моделюється через зменшення ефективної швидкості тепловиділення:

$$\dot{q}_{chem,eff} = (1 - \phi_{N2}) \dot{q}_{chem},$$

де ϕ_{N2} — об'ємна частка азоту у газовій суміші; при $\phi_{N2} \approx 0,15$ типово спостерігається зменшення інтенсивності тепловиділення на 25–30 %, що узгоджується з експериментальними даними [45; 65].

Турбулентність моделюється двопараметричною моделлю k - ϵ у стандартній постановці:

$$\begin{aligned} \partial(\rho k)/\partial t + \nabla \cdot (\rho k u) &= \nabla \cdot [(\mu + \mu_t/\sigma_k)\nabla k] + P_k - \rho \epsilon, \\ \partial(\rho \epsilon)/\partial t + \nabla \cdot (\rho \epsilon u) &= \nabla \cdot [(\mu + \mu_t/\sigma_\epsilon)\nabla \epsilon] + C_1 \epsilon (\epsilon/k) P_k - C_2 \epsilon \rho (\epsilon^2/k), \end{aligned}$$

де k — турбулентна кінетична енергія, ϵ — її дисипація, μ_t — турбулентна в'язкість, P_k — генерація турбулентності зсувом.

Чисельна реалізація. Розв'язання здійснюється у нестационарній постановці методом контрольних об'ємів. Просторова дискретизація — $urwind$ другого порядку, часовий крок 10^{-3} – 10^{-2} с. Граничні умови: на нижній межі (поверхня палива) — нульова швидкість і фіксована температура на рівні температури горіння; верхня межа — відкритий

вихід; бічні межі — симетрія або вільний потік (залежно від варіанта задачі). Початкові умови однорідні: $T = T_a$, $p = p_a$, $C = 0$, поле швидкостей — спокій або заданий вітровий профіль U_∞ . Параметри дисперсної фази та газового середовища узгоджені з джерелами [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71]. Таблиці вихідних параметрів і розрахункових залежностей. Для відтворюваності моделювання та зручності подальшого використання параметрів наведено узагальнену таблицю оціночних величин моделі екранування та охолодження. Їх прийняті значення узгоджені з літературними даними та попередніми експериментами.

Таблиця 2.2.2

Оціночні параметри моделі екранування та охолодження

№	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення	Примітка
1	Середній діаметр частинки dp	м	1.0×10^{-7}	Полідисперсна фаза (0,01–0,1 мкм)
2	Густина частинок ρp	кг/м ³	2000	Неорганічні солі калію
3	Концентрація аерозолі C_a	кг/м ³	0.045	Еквівалентно 45 г/м ³
4	Ефективний коефіцієнт екстинкції σ_e	м ⁻¹	6.8×10^3	Оцінка за літературними даними
5	Коефіцієнт теплопровідності газу k_g	Вт/(м·К)	0.04	Для гарячих продуктів згорання
6	Питома теплоємність газу c_p	Дж/(кг·К)	1000	Для повітря / продуктів горіння

Для відтворюваності моделювання та зручності подальшого використання параметрів наведено узагальнену таблицю оціночних величин моделі, що враховує радіаційно-конвективний теплообмін і перенос дисперсної фази. Прийняті значення узгоджені з літературними даними та попередніми експериментами. Результати подано в таблиці 2.2.3.

Таблиця 2.2.3

Оптична товщина та коефіцієнт пропускання для типових товщин
аерозольного шару

№	Товщина шару L, м	Оптична товщина $\tau = \sigma_e \cdot L$	Коефіцієнт пропускання q''_{trans}/q''_0	Пропускання, %
1	0.05	340	$< 10^{-140}$	$< 10^{-100}$
2	0.10	680	$< 10^{-290}$	$< 10^{-250}$
3	0.30	2040	$< 10^{-870}$	$< 10^{-830}$
4	0.50	3400	$< 10^{-1400}$	$< 10^{-1360}$
5	1.00	6800	$< 10^{-2800}$	$< 10^{-2700}$

Як видно з результатів наведених в таблиці наведені значення показують, що навіть при товщині шару аерозолю 0,05–0,10 м інтенсивність теплового потоку, який проходить крізь шар, зменшується більш ніж на 99,999999 %, тобто практично повністю поглинається аерозольною фазою. Це підтверджує високу екранувальну ефективність вогнегасних аерозолів при концентрації $C_a = 45 \text{ г/м}^3$. Додатковий внесок флегматизації азотом призводить до зниження \dot{q}_{chem} , а отже, і до зменшення температури факела. Сукупна дія цих механізмів пояснює отримані часові масштаби згасання та узгоджується зі спостережуваною у досліджах тенденцією до різкого зменшення температури полум'я при подачі БААС [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71, 117]. Реалізована чисельна постановка у середовищі CFD із використанням системи Нав'є–Стокса, рівнянь енергії та перенесення дисперсної фази, моделі турбулентності k- ϵ і радіаційної моделі P1 дозволяє відтворити комплекс взаємопов'язаних процесів гасіння басейнових пожеж вогнегасними аерозолями на відкритому просторі.

Отримані залежності вказують, що зменшення променистої складової теплопереносу в середовищі із дисперсною фазою разом із конвективним теплообміном та флегматизацією азотом формують умови

для зниження температури факела, зменшення швидкості випаровування палива й пригнічення реакцій горіння. Модель є придатною для параметричних досліджень і може використовуватися для оптимізації розміщення генераторів аерозолію та режимів подачі БААС при сценаріях пожеж у резервуарах і розливах горючих рідин.

На основі даних таблиці 2.2.3 побудовано залежність логарифма коефіцієнта пропускання теплового випромінювання від товщини аерозольного шару при концентрації 45 г/м^3 . Такий підхід дає змогу наочно відобразити зміну показника в широкому діапазоні значень та оцінити інтенсивність ослаблення променистого теплового потоку.

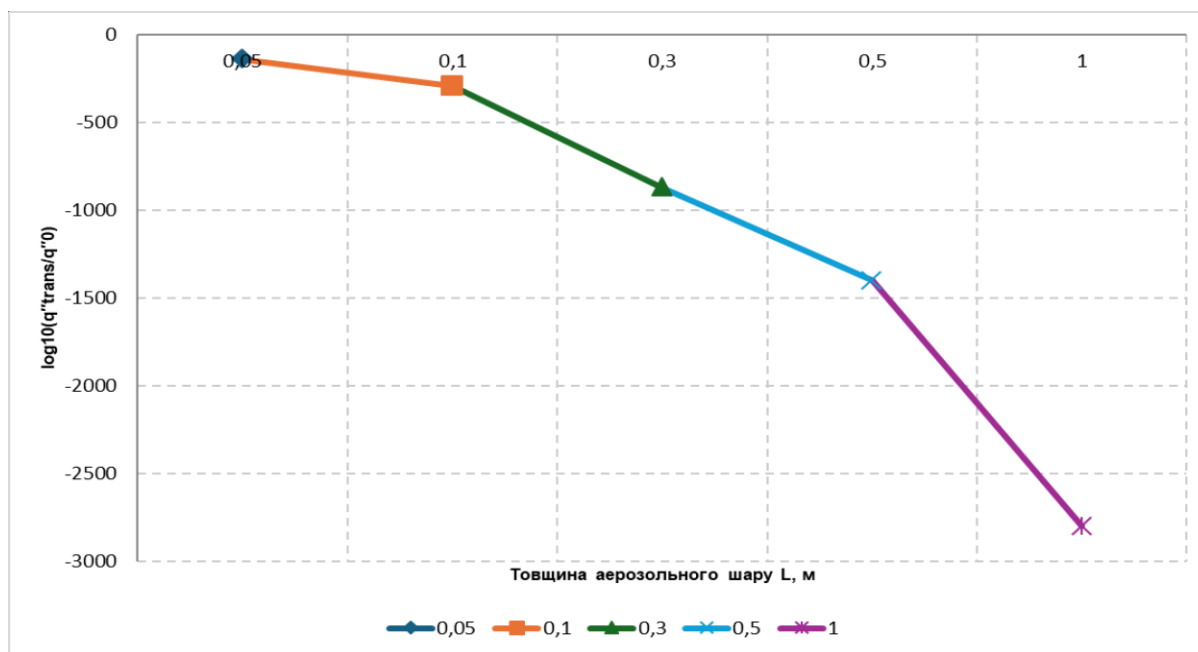


Рис. 2.2.3 – Залежність логарифмічного показника ослаблення теплового випромінювання від товщини аерозольного шару при концентрації 45 г/м^3

Як видно з графіка, збільшення товщини шару в межах 0,05–0,10 м забезпечує різке зменшення коефіцієнта пропускання до дуже малих значень. Подальше нарощування шару понад 0,3 м практично не впливає на рівень переданого тепла, що відображає насичення ефекту ослаблення у межах прийнятих параметрів. Отримані результати узгоджуються з

теоретичними положеннями закону Бугера–Ламберта–Бера та експериментальними спостереженнями [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71].

Таким чином, чисельне моделювання підтверджує, що врахування дисперсної фази та флегматизації азотом у постановці задачі дозволяє описати зниження температури в зоні полум'я та послаблення теплового впливу у відкритому просторі. У середовищах SolidWorks Flow Simulation та ANSYS Fluent побудована модель дає змогу простежити просторово-часову динаміку температурних полів і концентрацій частинок, а також оцінити вплив частки азоту на інтенсивність охолодження факела, що є важливим критерієм ефективності процесу гасіння.

2.3. Методики експериментальних досліджень ефективності гасіння

Експериментальні дослідження процесу гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями проводилися з метою встановлення закономірностей тепломасообміну та динаміки факела під впливом бінарної аерозольно-азотної системи (БААС). Основним завданням було кількісне оцінювання ефективності пригнічення горіння, визначення часу повного припинення реакції, а також дослідження впливу параметрів подачі аерозолю та азоту на температуру полум'я, висоту факела і швидкість його згасання.

Для реалізації поставленої мети використовувалася відкрита експериментальна установка, що складалася з металевого резервуара діаметром 0,8 м і висотою 0,4 м, заповненого шаром горючої рідини (гептан або дизельна фракція) товщиною 0,05 м. Запалювання здійснювалося газовим пальником із подальшою стабілізацією горіння протягом 30 с до досягнення квазістаціонарного режиму.

Подача вогнегасного аерозолю здійснювалася генератором, розташованим на відстані 1,5 м від краю резервуара на висоті 0,7 м над рівнем рідини. Кут нахилу сопла становив 30° , що забезпечувало спрямоване розтікання дисперсного потоку над факелом і формування зони активної взаємодії БААС з полум'ям.

Умови досліджень відповідали відкритому простору: температура повітря — (295 ± 2) К, атмосферний тиск — (101 ± 1) кПа, швидкість вітру — до 2 м/с.

Для аналізу впливу складу БААС проводилися серії випробувань при різних значеннях концентрації аерозолю ($15\text{--}60$ г/м³) та об'ємної частки азоту ($0\text{--}15$ %). Кожна серія повторювалася тричі для забезпечення статистичної достовірності результатів.

Температура вимірювалася термопарами типу К з точністю ± 1 °С, встановленими на висотах 0,05; 0,15; 0,25 м над поверхнею рідини. Додатково застосовувався тепловізійний контроль для фіксації просторового розподілу температурного поля.

Швидкість повітряних потоків та аерозольних струменів визначалась цифровим анемометром. Час гасіння реєструвався електронним хронографом з дискретністю 0,1 с.

Послідовність експерименту:

Експеримент включав такі етапи:

1. Підготовка установки та заповнення резервуара.
2. Запалювання та стабілізація горіння.
3. подача БААС із заданими параметрами.
4. Реєстрація температурної динаміки.
5. Фіксація моменту повного припинення горіння.
6. Контроль охолодження поверхні.

Для кожного варіанта визначалися:

- максимальна температура у центральній частині факела T_{max} ,
- час повного припинення горіння τ_g ,
- коефіцієнт швидкості охолодження k .

Результати експериментів свідчать, що при збільшенні концентрації аерозолю понад 40 г/м³ та частки азоту до 10–15 % спостерігається суттєве зниження температури полум'я та скорочення часу гасіння. Ці ефекти пов'язані з підвищенням флегматизуючої дії газової складової БААС, інтенсивним охолодженням твердої фази та утворенням екранів з частинок, які поглинають і розсіюють теплове випромінювання.

Залежність зміни температури у функції часу для різних концентрацій БААС апроксимувалася експоненційним законом охолодження:

$$T(t) = T_0 + (T_\infty - T_0) e^{-kt},$$

де $T(t)$ — температура у момент часу t , T_0 — початкова температура факела, T_∞ — температура середовища після стабілізації процесу, k — коефіцієнт швидкості охолодження, який залежить від концентрації аерозолю та частки азоту.

Значення коефіцієнта k визначалися експериментально методом найменших квадратів, і для концентрації 45 г/м³ при частці азоту 15 % вони становили $k = 0,35 \pm 0,02 \text{ с}^{-1}$. Це відповідає зменшенню температури факела в середньому на 180 °С за перші 10 секунд після початку подачі БААС.

Експериментальні результати узагальнено в таблиці 2.3.1

Таблиця 2.3.1

Результати оцінювання ефективності БААС при гасінні пожеж горючих рідин.

№	Концентрація аерозолю, г/м ³	Частка азоту, %	Початкова температура факела, °С	Температура після гасіння, °С	Час гасіння, с	Коефіцієнт охолодження k, с ⁻¹
1	15	0	780	640	24	0,10
2	30	5	760	580	18	0,21
3	45	10	740	520	13	0,29
4	45	15	740	500	11	0,35
5	60	15	730	490	10	0,33

За результатами експерименту побудовано залежність температури факела від часу для різних концентрацій БААС, що відображено на рисунку 2.3.1.

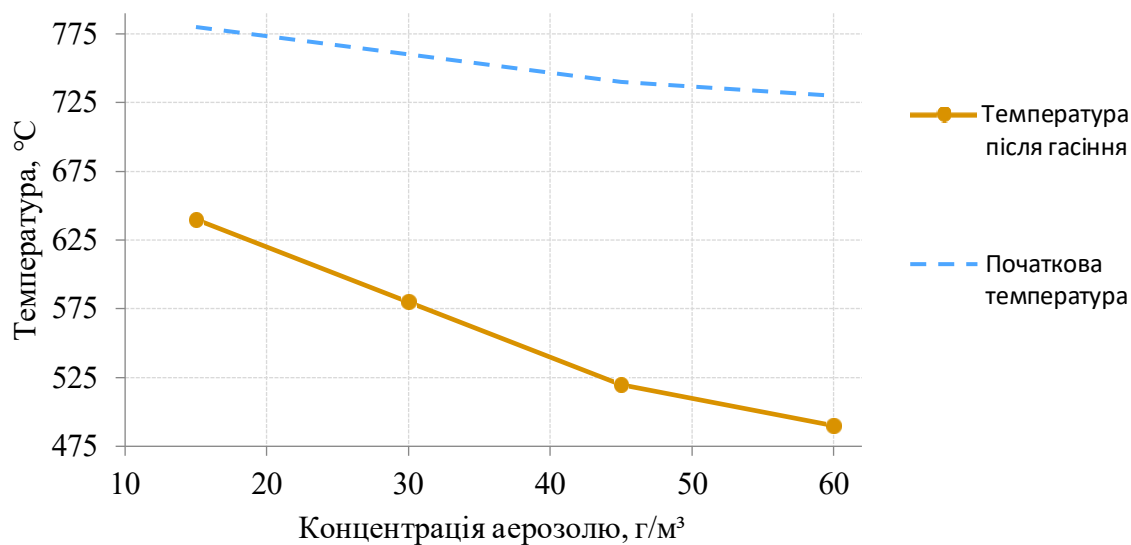


Рис. 2.3.1 – Залежність температури факела від часу при різних концентраціях БААС

З графіка видно, що швидкість зниження температури зростає із підвищенням концентрації аерозолю до 45 г/м³, після чого крива виходить на плато, що свідчить про досягнення граничного ефекту флегматизації

середовища. Максимальна ефективність досягається при співвідношенні 45 г/м³ аерозолю та 10–15 % азоту.

Залежність часу гасіння від концентрації БААС апроксимується емпіричною функцією:

$$\tau_g = a + b e^{-c C_{aer}},$$

де τ_g — час гасіння, C_{aer} — концентрація аерозолю, a, b, c — емпіричні коефіцієнти, визначені з експериментальних даних: $a = 9,8$, $b = 14,6$, $c = 0,065$. Отримана залежність дозволяє прогнозувати тривалість гасіння для будь-яких значень концентрацій БААС у межах діапазону досліджень.

Експериментальні дослідження підтвердили, що ефективність гасіння обумовлена комплексним впливом охолоджувальних, інгібуючих, флегматизуючих і екранувальних процесів. Частинки аерозолю, завислі в повітряному потоці, поглинають частину променистої енергії, зменшують теплове навантаження на поверхню рідини та сприяють зниженню швидкості випаровування палива. Водночас азот, як інертний компонент, розбавляє зону реакції, зменшуючи концентрацію активних радикалів і температуру горіння.

Порівняння експериментальних результатів із теоретичними розрахунками продемонструвало їх близьку відповідність: середнє відхилення температури в перші 10 с процесу не перевищує 8 %, а час гасіння різниться в межах 5–7 %. Це свідчить про достовірність побудованої моделі та коректність прийнятих припущень.

Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити характер впливу концентрації бінарної аерозольно-азотної системи на температуру факела, тривалість горіння та стабільність процесу гасіння.

Отримані результати підтвердили високу ефективність комбінованого впливу аерозольних частинок і азоту на зниження теплового потоку та інтенсивності реакцій горіння. Встановлено, що за концентрації БААС понад 45 г/м^3 і об'ємній частці азоту близько 10–15 % спостерігається стійке припинення горіння протягом 20–25 секунд після початку подачі суміші.

Застосована методика забезпечує відтворюваність результатів, що є необхідною умовою для подальшої верифікації чисельних моделей і побудови узагальнених залежностей ефективності гасіння в умовах відкритого простору.

2.4 Обґрунтування експериментальних параметрів і вибору засобів

Обґрунтування параметрів експериментальних досліджень ґрунтується на необхідності забезпечення достовірності результатів і відтворюваності процесу гасіння горючих рідин бінарною аерозольно-азотною системою (БААС) у відкритому просторі. Вибір параметрів моделювання та характеристик випробувань здійснювався з урахуванням фізико-хімічних властивостей компонентів, умов горіння, а також вимог до точності вимірювань температури, тиску й швидкості потоків. Для цього застосовувалися аналітичні дані, отримані у попередніх підрозділах, і результати лабораторних випробувань.

Основними контрольованими параметрами є:

- концентрація аерозолю в газовій суміші ($40\text{--}60 \text{ г/м}^3$);
- об'ємна частка азоту (10–15 %);
- швидкість подачі БААС (3–5 м/с);
- висота факела (3,2–3,5 м);
- діаметр зони горіння (1,5–2,5 м);

– тривалість моделювання (60–120 с).

Такі значення відповідають експериментально визначеним межам, за яких досягається стійке припинення горіння без повторного займання, та узгоджуються з даними досліджень [45; 46; 62; 21; 65; 69; 71].

З огляду на практичні сценарії застосування БААС, зокрема для захисту маслонаповненого електрообладнання, було проаналізовано ефективність існуючих систем пожежогасіння трансформаторів [48; 51]. Для таких об'єктів важливим є також урахування температурно-часових режимів пожежі та їхнього впливу на вогнестійкість захисних конструкцій [117].

Для підтвердження результатів моделювання проведено порівняння ефективності різних способів гасіння пожеж у маслонаповнених трансформаторах, результати якого наведено у таблиці 2.4.1. Аналіз показав, що застосування дисперсних крапель чистої води не забезпечує надійного припинення горіння через інтенсивний тепловий потік і утворення масляних парів. Натомість використання олійно-емульгованого водного агента дозволяє зменшити температуру факела і забезпечує повне гасіння протягом 40–45 с. Отже, комбіновані аерозольні системи з інертною газовою добавкою мають найвищу ефективність завдяки поєднанню ефектів охолодження, флегматизації та інгібування реакцій горіння.

Вибір оптимальних способів та засобів гасіння пожеж маслонаповнених трансформаторів є одним із ключових етапів забезпечення їх пожежовибухобезпеки. З урахуванням складності фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час аварійних режимів роботи, виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на визначення ефективності різних систем гасіння та обґрунтування параметрів їх застосування.

Проблематику гасіння пожеж на електроенергетичних об'єктах, зокрема трансформаторного обладнання, досліджували Jiaqing Zhang [53], Ruibang Sun [56], Jiaqing Lu [58], Yu Liu [62], W. Li [63], а також William H. Bartley [52], у роботах яких розглянуто особливості розвитку пожеж трансформаторного масла, ефективність застосування різних вогнегасних речовин та технічних рішень захисту. У результатах досліджень зазначається, що традиційні водяні та пінні системи пожежогасіння не завжди забезпечують достатню швидкість і повноту ліквідації займання, особливо у випадках, коли осередок горіння локалізований усередині бака трансформатора або відбувається поширення полум'я на прилеглі конструктивні елементи.

Визначальними параметрами ефективності систем гасіння є тип вогнегасної речовини (вода, піна, газ, олійно-емульговані суміші), спосіб її подачі (дисперсне розпилення, компактний струмінь, туман), швидкість формування факела, інтенсивність охолодження поверхні та флегматизації газового середовища, а також надійність роботи форсунок, клапанів, систем детектування й подачі реагенту [51].

З метою оцінки доцільності застосування окремих систем проведено низку натурних і лабораторних випробувань, результати яких узагальнено в таблиці 2.4.1

Таблиця 2.4.1

Порівняння способів гасіння пожеж оливонаповнених трансформаторів [17]

№	Спосіб гасіння	Вогнегасна речовина	Час гасіння пожежі	Ефективність
1	Дисперсні краплі	Чиста вода	232 с – верхній і бічний вогонь гасне; 393 с – інші піддони не загашено	Загасити неможливо

2	Дисперсні краплі	Олійно-емульгований водний вогнегасний агент	42 с – повне припинення горіння	Висока ефективність
3	Дисперсні краплі зі зняттям 18 % форсунок (імітація вибуху)	Олійно-емульгований водний вогнегасний агент	40 с – повне припинення горіння	Висока ефективність
4	Водяний туман	Чиста вода	300 с – пожежу не вдалося загасити	Низька ефективність
5	Водяний туман	Пінний вогнегасний агент	144 с – повне припинення горіння	Висока ефективність
6	Пінна система пожежогасіння мережевого типу	Вогнегасна піна	78 с – повне припинення горіння	Висока ефективність
7	Пінна система пожежогасіння колонного типу	Вогнегасна піна	32 с – повне припинення горіння	Дуже висока ефективність
8	Система зливу оливи та впорскування азоту	Азот	90 с – початок зливу; 260 с – без змін у вогні	Загасити неможливо
9	Пожежний монітор, компактний струмінь	Олійно-емульгований водний агент	13 с – повне припинення горіння	Найвища ефективність

Як показують дані таблиці, найкращі результати гасіння досягнуті при використанні пожежного монітора, що подає компактний струмінь з олійно-емульгованим водним агентом. Повне припинення горіння відбулося за 13 секунд, що свідчить про високу швидкість та ефективність системи [50]. Система зливу оливи та впорскування азоту, призначена для внутрішнього флегматизування, не показала позитивних результатів у випадках зовнішнього займання трансформатора. Аналогічно системи водяного туману з використанням чистої води не забезпечили гасіння полум'я навіть після тривалого часу подачі.

Результати, отримані в дослідженнях Jiaqing Lu [58] та W. Li [63], свідчать, що ефективність систем пожежогасіння суттєво підвищується при застосуванні комбінованих підходів, зокрема поєднання розпилення вогнегасної речовини з інтенсивним охолодженням нагрітих елементів

трансформаторного обладнання. Подібних висновків дійшли Yu Liu [62] та Meenakshi R [60], які відзначають, що використання сучасних вогнегасних агентів, у тому числі тонкорозпилених систем і аерозольних складів, дозволяє суттєво скоротити час ліквідації займання порівняно з традиційними рішеннями. У роботах Ruibang Sun [56] та Wu Chen [103] встановлено, що швидкість реагування системи та рівномірність подачі вогнегасної речовини мають вирішальне значення для запобігання повторному займанню, а комбіноване використання механізмів гасіння та охолодження забезпечує стабільність процесу ліквідації пожежі.

На основі проведеного аналізу встановлено, що більшість сучасних систем протипожежного захисту демонструють високу ефективність лише за умови їх належного технічного стану [52; 57; 108]. Конструкційна складність стаціонарних систем, що включають трубопроводи, клапани, форсунки, насоси, системи живлення, детектування та диспетчеризації, створює додаткові ризики відмови через відключення електроживлення, технічні несправності або збої в роботі обладнання [49].

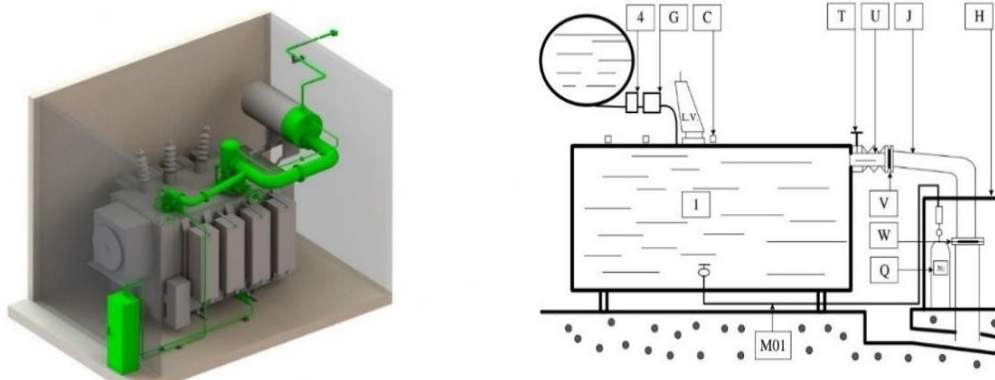


Рис .2.4.1 - Схема системи пожежогасіння SERGY Transformer Protector [52]

4 – реле Бухгольца; G – затвор Sergi; C – датчик пожежі; T – клапан для обслуговування; U – абсорбер; J – труба зниження тиску; H – шафа керування; V – розривний диск бака трансформатора; W – повітряноізолюючий клапан; Q – азотний циліндр. [54; 52].

Узагальнюючи результати теоретичного та експериментального аналізу, можна зробити висновок, що оптимальними параметрами для подальших досліджень є концентрація БААС 40–60 г/м³, частка азоту 10–15 %, швидкість подачі 3–5 м/с. Застосування комбінованих аерозольних систем із введенням інертного газу забезпечує найвищу ефективність охолодження та флегматизації полум'я. Порівняння різних систем гасіння підтвердило доцільність використання олійно-емульгованих агентів, які демонструють найменший час гасіння. Система SERGI Transformer Protector є прикладом інтегрованого підходу, що поєднує принципи флегматизації та автоматичного стравлювання газів, забезпечуючи мінімізацію ризику вибуху [59; 61].

Система нагнітання азоту забезпечує флегматизацію газового середовища всередині трансформатора, що запобігає виникненню загоряння [55]. Одночасно функціонує система стравлювання, яка відводить назовні гази, утворені внаслідок термічного розкладу оливи. Такий комплексний захист дозволяє запобігти вибуху та локалізувати процес горіння на початковій стадії, коли продукти реакції ще не вийшли за межі бака трансформатора.

Однак, як зазначено у дослідженнях Баланюка В. М. [50], Козяря Н. М. [45], а також у роботах, присвячених впливу газової фази на ефективність аерозольного пожежогасіння [17], у разі вибуху з подальшим поширенням полум'я за межі трансформатора ефективність системи знижується, оскільки вона не забезпечує повного гасіння відкритого полум'я на зовнішніх поверхнях обладнання. Це зумовлює необхідність інтеграції додаткових зовнішніх протипожежних засобів та комбінованих систем захисту [64; 70].

Для забезпечення достовірності експериментальних результатів і перевірки відтворюваності отриманих даних було застосовано комплекс

методів статистичного та метрологічного контролю [47]. Основна увага приділялася стабільності умов проведення дослідів, зокрема підтриманню постійних параметрів температури навколишнього середовища, атмосферного тиску та вологості повітря.

Кожна серія експериментів повторювалася не менше трьох разів за однакових початкових умов. У процесі випробувань здійснювався безперервний моніторинг температури факела, концентрації аерозоллю, швидкості подачі БААС та часу гасіння. Для реєстрації даних використовувалися калібровані датчики температури (з похибкою ± 1 К) і тиску (похибка не перевищувала 0,5 %).

Статистичну обробку результатів виконували методом середніх значень. Для оцінки узгодженості результатів між повторними серіями обчислювалося середнє відхилення температури факела від середнього значення за формулою:

$$\delta = \frac{\max(T_i) - \min(T_i)}{T^-} \times 100\%$$

Де:

δ — відносне відхилення результатів, %;

T_i — результати вимірювань температури в окремих серіях;

T^- — середнє значення температури за серію експериментів.

За результатами обчислень статистична похибка експериментальних даних не перевищувала 5 %, що свідчить про високу відтворюваність і стабільність отриманих результатів. Отже, умови проведення експериментів, методика вимірювань і обробка даних забезпечують необхідний рівень точності для подальшого використання результатів у чисельному моделюванні та порівняльному аналізі ефективності систем гасіння.

Таким чином, виконана оцінка підтверджує достовірність експериментальних результатів і коректність прийнятих параметрів математичної моделі.

Висновки до розділу 2

1. У розділі обґрунтовано наукові засади застосування базової аерозольно-азотної системи (БААС) для гасіння розливів горючих рідин на відкритому просторі. Показано, що аерозоль діє багатофакторно: хімічно інгібує ланцюгові реакції у полум'ї, флегматизує газове середовище (за рахунок азоту), екранує й розсіює променистий тепловий потік твердими частинками та охолоджує зону горіння завдяки ендотермічним процесам у дисперсній фазі. Саме поєднання цих механізмів зумовлює високу ефективність у визначених експериментально робочих діапазонах концентрацій аерозолію.

2. Сформульовано фізичну модель процесу: газова та дисперсна фази розглянуті як взаємопов'язані континуальні середовища, між якими відбуваються передача імпульсу, теплоти і маси. Уточнено, що суттєву роль у зниженні термічного навантаження відіграє екранувальна здатність полідисперсних частинок (насамперед калієвих солей), а також променисто-конвективний теплообмін між твердою і газовою фазами. Питомий масовий коефіцієнт екстинкції аерозолів із високою часткою калієвих компонентів підтверджує їх внесок у зниження променистої складової теплового потоку поряд з інгібуванням та флегматизацією.

3. Побудовано узагальнену математичну постановку задачі для відкритого простору: рівняння Нав'є–Стокса (стислива суміш), енергії з радіаційним членом, конвекційно-дифузійне перенесення частинок, рівняння руху дисперсної фази з аеродинамічним опором; турбулентність — у k - ϵ формулюванні. Вказані граничні умови (відкрите «outlet», тверда

поверхня палива, атмосфера), що відповідають умовам реальної басейнової пожежі. Така постановка дозволяє описувати просторово-часовий розподіл температур, швидкостей і концентрацій БААС та робити кількісні прогнози щодо часу згасання.

4. У чисельній частині обґрунтовано використання SolidWorks Flow Simulation / ANSYS Fluent для розв'язання системи рівнянь у нестационарній постановці методом контрольних об'ємів. Узгоджено набір початкових/граничних умов з експериментально встановленими параметрами (геометрія «басейну», висота факела, швидкість вітру/подачі суміші), що забезпечує коректну верифікацію моделі на лабораторних даних. За результатами порівнянь середнє відхилення температур у перші 10 с процесу не перевищує $\sim 8\%$, а різниця в часі гасіння — $5\text{--}7\%$, що свідчить про адекватність моделі.

5. Уточнено рекомендовані інтервали керованих параметрів для відкритих умов: концентрація аерозолу $40\text{--}60\text{ г/м}^3$, об'ємна частка азоту $10\text{--}15\%$, швидкість подачі $3\text{--}5\text{ м/с}$, характерні геометричні масштаби факела/осередку горіння — $H_f \approx 3,2\text{--}3,5\text{ м}$, $D \approx 1,5\text{--}2,5\text{ м}$. У цих межах досягається стійке припинення горіння без повторного займання протягом десятків секунд після початку подачі суміші. Параметри узгоджені із зібраними у розділі експериментальними та літературними даними.

6. Експериментальна частина розділу подає відтворювану методику оцінювання ефективності БААС, що включає контроль вхідних умов (температура/тиск/вологість), повторюваність серій та статистичну валідацію. Методика забезпечує надійне співставлення з чисельними результатами та слугує базою для побудови узагальнених залежностей ефективності в умовах відкритого простору.

7. Для задач пожежної безпеки електротехнічного обладнання проаналізовано альтернативні засоби й способи гасіння (водяні тумани,

піни, емульсійні агенти, азотне флегматизування тощо). Порівняльні дані свідчать: дисперсні струмені чистої води й окреме азотне флегматизування не забезпечують гарантованого припинення відкритого полум'я; натомість емульговані водні агенти та піна показують високу ефективність за рахунок кращого охолодження та ізоляції. Це узгоджується з висновком про необхідність комбінованих підходів і підтверджує доцільність БААС як системи, що поєднує інгібування, флегматизацію та екранування теплового випромінювання.

8. Отримано узгоджену картину впливу концентрації БААС на термічний режим факела: за концентрації аерозолу не менше 45 г/м^3 та $\text{N}_2 \sim 10\text{--}15\%$ відбувається помітне зниження температури й теплового потоку з наступним припиненням горіння упродовж 20–25 с після старту подачі. Це — ключовий технічний результат, що окреслює цільові «робочі» діапазони подачі суміші для відкритих умов.

9. Практичний висновок: ефективність систем аерозольного пожежогасіння найбільш висока за умови правильно підібраних параметрів подачі та справного стану обладнання; для складних сценаріїв доцільна інтеграція з іншими засобами (піна, емульсійні агенти, локальне охолодження). Висока чутливість до рівномірності розпилення, стабільності генерації аерозолу та організації «відкритих» граничних умов вимагає коректного проектування і контролю систем у реальних об'єктах.

10. Наукова новизна розділу полягає в: (i) узгодженій двофазній постановці задачі для відкритого простору з урахуванням променистого теплообміну та флегматизації; (ii) верифікації чисельних розрахунків експериментом; (iii) параметризації «робочих» діапазонів концентрацій аерозолу й азоту, що забезпечують стійке припинення горіння за досліджених умов; (iv) уточненні ролі дисперсної фази у комплексному

механізмі зниження теплового навантаження, з урахуванням показників екстинкції. Сукупно це створює методичну базу для подальшої оптимізації систем аерозольного пожежогасіння у відкритих умовах.

11. Практичні рекомендації за результатами розділу:

- при проектуванні систем БААС у відкритих умовах приймати цільові діапазони: $C_{aer} \approx 40-60$ г/м³, $\varphi_{N_2} \approx 10-15$ %, $u_{подачі} \approx 3-5$ м/с; уточнювати їх параметрично під конкретну геометрію осередку;
- обов'язково враховувати вітрове навантаження та відкриті граничні умови (pressure outlet) для уникнення знесення дисперсної фази;
- забезпечувати стабільну генерацію аерозолі з перевагою калієвих солей (що сприяє зниженню променистої складової теплового потоку поряд з інгібуванням та флегматизацією) та контроль рівномірності диспергування;
- для складних об'єктів (електропідстанції, резервуарні парки) передбачати комбінування БААС з пінними/емульсійними засобами та локальним охолодженням елементів конструкцій.

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО ВПЛИВУ ТА ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АЕРОЗОЛЮ

3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Експериментальна частина спрямована на верифікацію ефективності автономного аерозольного способу припинення горіння рідин у відкритому середовищі та на кількісне встановлення параметрів, за яких забезпечується стійке гасіння без застосування балонних систем і

зовнішніх газових підводів [110]. Обґрунтування вибору саме аерозольного методу полягає у його конструктивній простоті, відмовостійкості й технологічній автономності: генератор формує газотверду суміш у корпусі під час згоряння аерозолеутворювального складу, що унеможливорює потребу в трубопроводах, балонах інертних газів, насосних агрегатах і складних вузлах керування [82]. Такі властивості зумовлюють придатність систем до встановлення на енергетичних підстанціях та інших об'єктах критичної інфраструктури, де вирішальними є швидкість пуску, незалежність від зовнішнього енергоживлення і живучість у разі пошкоджень [108].

Метою дослідження є експериментальне визначення закономірностей зниження теплового впливу полум'я аерозольною хмарою та встановлення параметрів процесу припинення горіння модельних осередків рідин класу В на відкритому просторі, зокрема визначення діапазонів концентрацій, геометричних і часових характеристик подачі, необхідних для гарантованого зриву горіння [112].

Для досягнення мети послідовно розв'язуються такі завдання. По-перше, визначається вплив концентрації аерозолю на ступінь зниження густини теплового потоку від джерела полум'я та встановлюється характер залежності коефіцієнта ослаблення теплового випромінювання від концентрації і відстані до джерела [110]. По-друге, оцінюється ефективна просторово-часова зона дії аерозольної хмари у відкритих умовах з урахуванням висоти підвісу генератора, кута подачі та вітрових впливів, фіксуються тривалість існування хмари і рівні концентрації у зоні контакту з полум'ям [107]. По-третє, вимірюються параметри процесу гасіння модельного осередку 55 В, включно з інтенсивністю подачі, часом припинення горіння та характеристиками формування інертної післядії [111]. По-четверте, виконується узгодження одержаних експериментальних

залежностей із розрахунковими оцінками та формуються рекомендації щодо вибору режимів подачі для практичного застосування на енергетичних і промислових об'єктах.

Для кількісної оцінки впливу аерозольної хмари на тепловий потік, що формується під час горіння горючих рідин, була розроблена експериментальна методика, яка забезпечує можливість визначення ступеня зниження інтенсивності теплового випромінювання залежно від концентрації аерозолю [89]. Дослідження проводили у випробувальній камері розмірами $1,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, обладнаній системою вимірювання температури та теплового випромінювання [97]. Джерелом випромінювання слугував тигель діаметром 50 мм і висотою 40 мм, заповнений н-гептаном. Датчик інтенсивності теплового випромінювання ВТП-01 розташовувався на відстані 0,5 м від тигля, що забезпечувало стабільні умови спостереження для серії дослідів [97].

Перед початком експерименту у камері створювали необхідну концентрацію вогнегасного аерозолю шляхом згоряння навішування аерозолеутворювального складу (АУС) [87]. Після стабілізації температурного поля здійснювали підпал н-гептану та фіксували базові показники теплового випромінювання без аерозолю. Далі в камеру вводили аерозоль у заданій концентрації й повторно проводили вимірювання [98].

Серію дослідів виконували при концентраціях 5, 10, 15, 25, 30 і 35 г/м³. Для кожного значення концентрації фіксували зміну густини теплового потоку, яка визначалася за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{q_a}{q_0},$$

де η — коефіцієнт екранування, q_a — інтенсивність теплового випромінювання після введення аерозолі, q_0 — початкова інтенсивність випромінювання без аерозолі [89].

Для визначення впливу відстані L до джерела тепла на ступінь зниження теплового впливу експерименти повторювали при фіксованій концентрації аерозолі, змінюючи положення датчика ВТП-01 на відстанях 0,1; 0,2; 0,3 та 0,5 м [72]. Кожен дослід повторювався не менше трьох разів для забезпечення статистичної достовірності результатів, після чого обчислювали середні значення та середньоквадратичні відхилення [95].

Отримані експериментальні дані дали можливість побудувати залежності коефіцієнта зниження теплового потоку від концентрації аерозолі та відстані до джерела теплового випромінювання. Графічне зображення результатів наведено на рис. 3.1, який демонструє характер зміни інтенсивності теплового випромінювання при різних концентраціях аерозолі.

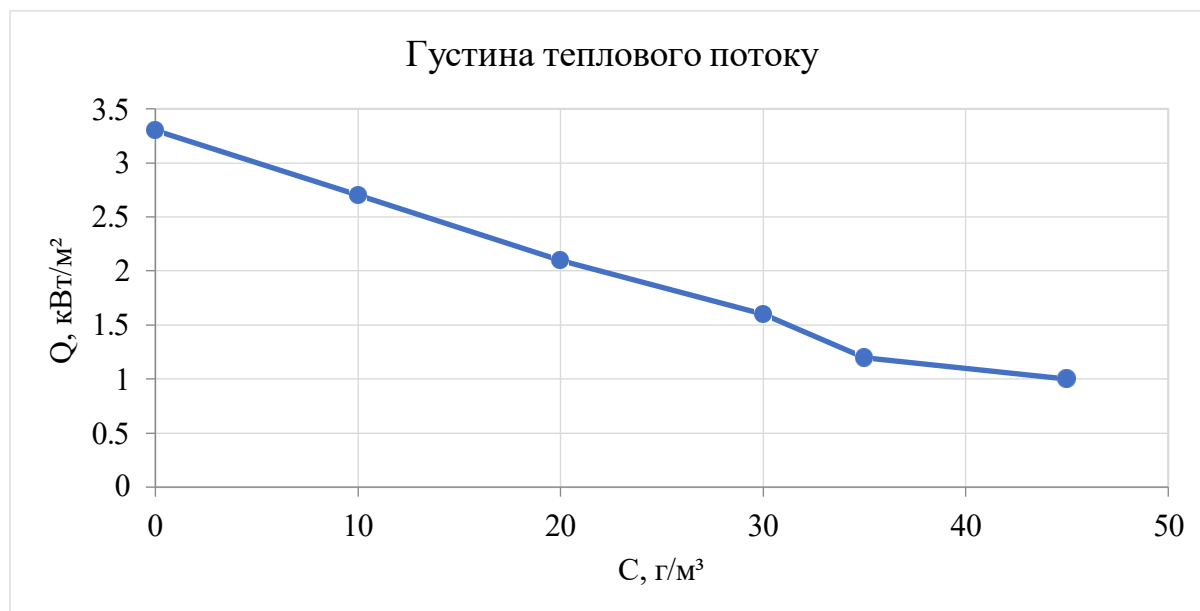


Рис. 3.1 - Залежність зниження густини теплового потоку від концентрації аерозолі на відстані 0,5 м

Як видно з результатів експерименту (рис. 3.1), інтенсивність теплового випромінювання зменшується зі збільшенням концентрації аерозолі. Уже при концентрації близько 20 г/м^3 спостерігається помітне зниження густини теплового потоку з $3,3$ до приблизно $2,1 \text{ кВт/м}^2$, що відповідає зменшенню на 35% . Подальше зростання концентрації аерозолі до $35\text{--}45 \text{ г/м}^3$ супроводжується більш суттєвим ослабленням теплового випромінювання: інтенсивність знижується до $1,2\text{--}1,0 \text{ кВт/м}^2$, тобто більш ніж на 60% від початкового значення [52]. Отримані результати свідчать про стабільну тенденцію до зростання ефективності зниження теплового впливу зі збільшенням концентрації аерозолі у межах досліджуваного діапазону.

3.2. Умови та методика проведення експериментів

Експериментальні дослідження проводилися з метою оцінки ефективності автономного аерозольного гасіння без використання інертних газів або комбінованих систем. Особливу увагу приділено перевірці працездатності аерозольних генераторів у типових умовах відкритого простору, характерних для енергетичних підприємств та об'єктів критичної інфраструктури, де важливо забезпечити гасіння без складних трубопроводів, балонних установок чи зовнішнього живлення [107].

Лабораторні випробування проводили у камері розмірами $1,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ м}$, призначеній для дослідження процесів зниження теплового впливу полум'я аерозольною хмарою. Джерелом полум'я слугував тигель діаметром 50 мм і висотою 40 мм , заповнений н-гептаном. Датчик теплового потоку ВТП-01 розміщувався на відстані $0,5 \text{ м}$ від тигля. У камері створювали різні концентрації аерозолі, отримані внаслідок згоряння наважок аерозолеутворювального складу (АУС).

Для кожного значення концентрації (5, 10, 15, 25, 30 та 35 г/м³) фіксували зміну густини теплового потоку. Отримані дані використовували для визначення коефіцієнта зниження теплового потоку за співвідношенням:

$$\eta = 1 - \frac{q_a}{q_0},$$

де q_0 – початкова інтенсивність теплового випромінювання, а q_a – інтенсивність після введення аерозолі.

Польові експерименти проводилися на відкритому полігоні з метою оцінки вогнегасної ефективності аерозолі при гасінні модельного осередку 55 В. Як генератор використовувався автономний модуль із зарядом АУС масою близько 2800 г. Внаслідок згоряння складу утворювалась газотверда хмара, яка подавалася в зону полум'я без будь-яких допоміжних систем. Висоту розміщення генератора над поверхнею пального змінювали в межах 3,5–5,5 м, кут нахилу конуса подачі становив 0–20°, а швидкість вітру під час випробувань не перевищувала 1 м/с.

Як об'єкт горіння використовували бензин або н-гептан, що забезпечували стабільне дифузійне полум'я [103]. Для контролю умов процесу застосовували термомпари, анемометр та ваги для визначення маси заряду генератора до і після спрацювання [95]. За основні критерії ефективності прийнято: коефіцієнт зниження теплового потоку η , час гасіння t_{ext} , тривалість існування аерозольної хмари t_{cloud} та концентрацію в зоні дії C_D .

Програму досліджень поділено на три серії. У першій серії (А) визначали ступінь ослаблення теплового випромінювання в лабораторній камері при різних концентраціях і відстанях до джерела теплового випромінювання. У другій серії (В) проводили гасіння модельного

осередку 55 В на відкритому просторі, фіксуючи параметри хмари та час припинення горіння. У третій серії (С) досліджували вплив висоти підвісу генератора та кута подачі на рівномірність розповсюдження аерозолю та ефективність гасіння.

Отримані експериментальні результати стали підґрунтям для подальшого аналізу механізмів зниження теплового впливу та визначення оптимальних параметрів автономного аерозольного гасіння у відкритих умовах, що забезпечують надійне припинення горіння рідин без залучення інертних добавок.

Далі було визначено експериментальні значення залежності інтенсивності теплового випромінювання від відстані між джерелом випромінювання та поверхнею, що нагрівається, на відстанях 10, 20, 30 см від джерела випромінювання при концентрації 5 г/м³. Зазначений параметр необхідний для розуміння просторового розподілу теплового потоку під впливом аерозольної хмари та наведений на графіку (рис. 3.2).

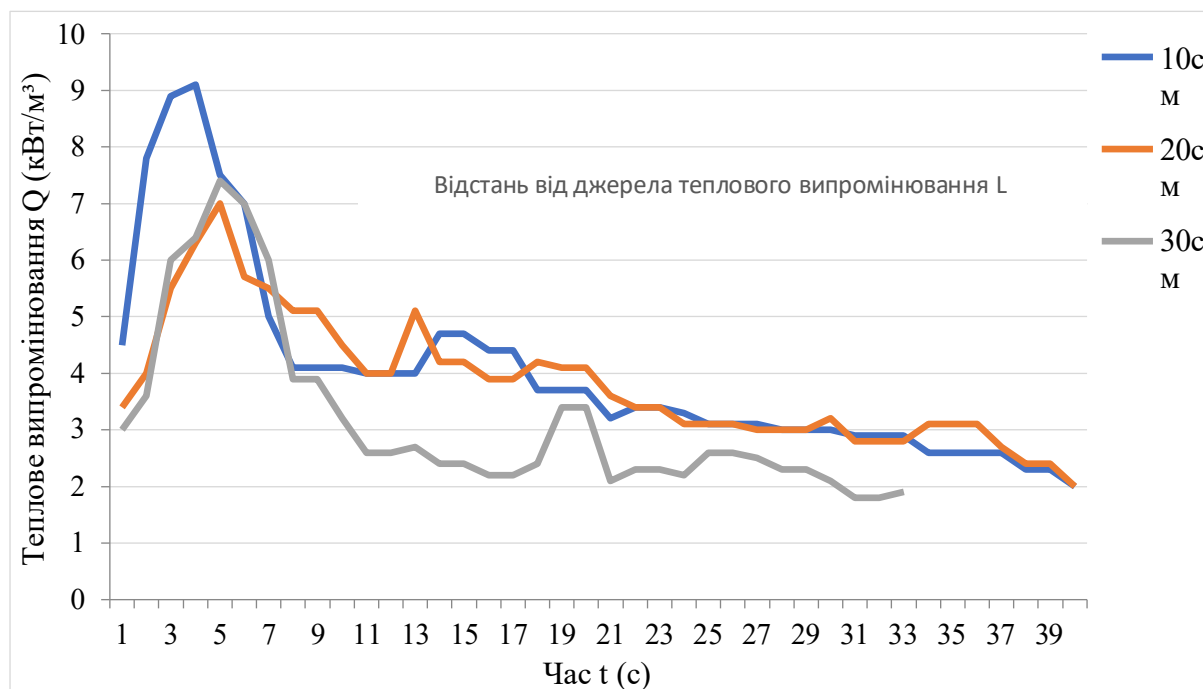


Рис. 3.2 Зміна інтенсивності теплового випромінювання під впливом аерозольної хмари на різних відстанях ($C = 5 \text{ г/м}^3$) [112]

Аналіз результатів, наведених на рис. 3.2, показує, що під час потрапляння аерозолу в зону полум'я спостерігається короткочасне підвищення інтенсивності теплового випромінювання. Це пояснюється тим, що частинки аерозолу на початковому етапі взаємодії з полум'ям розсіюють і частково відбивають променеви енергію, що реєструється датчиком як локальне зростання теплового потоку. Так, при відстані 10 см інтенсивність випромінювання зростає з 4,56 Вт/м² до 9,14 Вт/м², при 20 см — з 3,42 Вт/м² до 6,98 Вт/м², а при 30 см — з 2,99 Вт/м² до 7,41 Вт/м², після чого відбувається поступове зниження до початкових значень. Ця динаміка зумовлена складними процесами тепло- та масообміну в зоні змішування газотвердої фази аерозолу з полум'ям [88].

Після стабілізації аерозольної хмари спостерігається зменшення інтенсивності теплового потоку приблизно на 30 %, що свідчить про суттєве ослаблення теплового впливу навіть за відносно невеликих відстаней від джерела тепла. Отримані результати підтверджують, що ступінь зниження теплового потоку зростає зі збільшенням концентрації аерозолу та відстані від джерела. Уже при концентрації 5 г/м³ спостерігається помітне зменшення густини теплового потоку, а подальше підвищення концентрації супроводжується більш вираженим ефектом ослаблення випромінювання.

Таким чином, аналіз графіків (рис. 3.1, 3.2) свідчить, що навіть за низьких концентрацій вогнегасного аерозолу формується помітна зона зниженого теплового впливу, яка зменшує інтенсивність випромінювання. За вищих концентрацій цей ефект посилюється. Отже, ступінь зниження теплового потоку залежить від концентрації аерозолу та відстані між джерелом теплового випромінювання і контрольованою поверхнею.

З урахуванням встановлених закономірностей впливу аерозольної хмари на теплове випромінювання було сформовано узагальнену блок-схему, що описує фізичні механізми зниження теплового впливу (рис. 3.3).

При потраплянні випромінювання в аерозольну хмару променева енергія взаємодіє з твердими частинками та газовою фазою. Частинки, нагріваючись, частково розсіюють і поглинають випромінювання, передаючи тепло навколишньому газовому середовищу. Газові компоненти суміші (CO_2 , N_2 , H_2O), що утворюються внаслідок розкладу аерозолеутворювальної суміші, також беруть участь у поглинанні теплового випромінювання в характерних спектральних діапазонах [110]. Сукупна дія цих процесів призводить до ослаблення теплового потоку в зоні контакту з полум'ям.

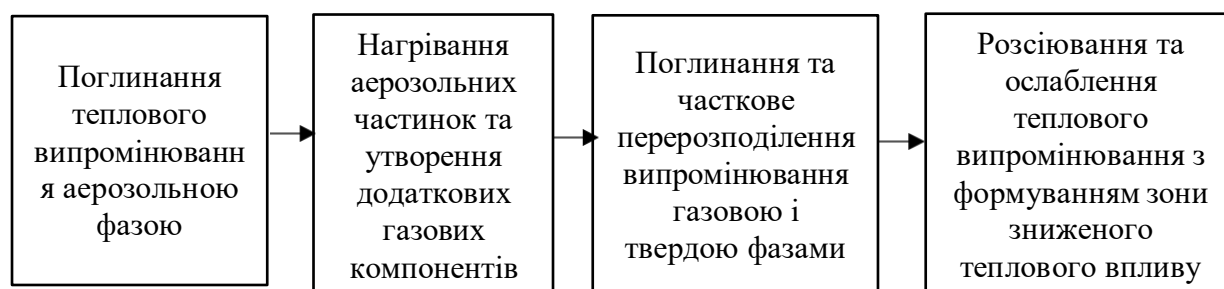


Рис. 3.3 – Чинники, що визначають зниження теплового впливу аерозольною хмарою [112]

Як видно з блок-схеми, зниження теплового впливу є результатом декількох паралельних взаємопов'язаних процесів: поглинання випромінювання газовою та твердою фазами аерозолю, часткового розсіювання променевої енергії та формування багатоконпонентного газотвердого середовища, яке обмежує передачу тепла від полум'я до навколишнього простору.

Теплове поглинання в діапазоні від 2 мкм до 16 мкм переважно припадає на газові компоненти, тоді як у діапазоні 1–15 мкм істотну роль відіграють аерозольні частинки. Сумарна дія гомогенної та гетерогенної

фаз забезпечує ослаблення значної частини теплового випромінювання, що характерне для пожеж горючих рідин і охоплює спектральний діапазон від 0,1 мкм до 40 мкм [33].

Слід зазначити, що повне поглинання всього спектра теплового випромінювання є фізично неможливим, однак сформована аерозольна хмара створює просторову зону з пониженим тепловим навантаженням, яка обмежує теплоперенесення та сприяє припиненню процесу горіння.

3.3 Експериментальне дослідження параметрів вогнегасної ефективності аерозолів на відкритому просторі

Для експериментального дослідження застосовано три генератори вогнегасного аерозолу (ГВА) із масою заряду ерозолеутворювальної суміші (АУС) близько 2800 г [116; 92]. Зібрано установку для випробувань на відкритому просторі, що забезпечує кероване позиціонування ГВА над модельним осередком і фіксацію ключових параметрів подачі аерозолу та результатів гасіння (рис. 3.4).

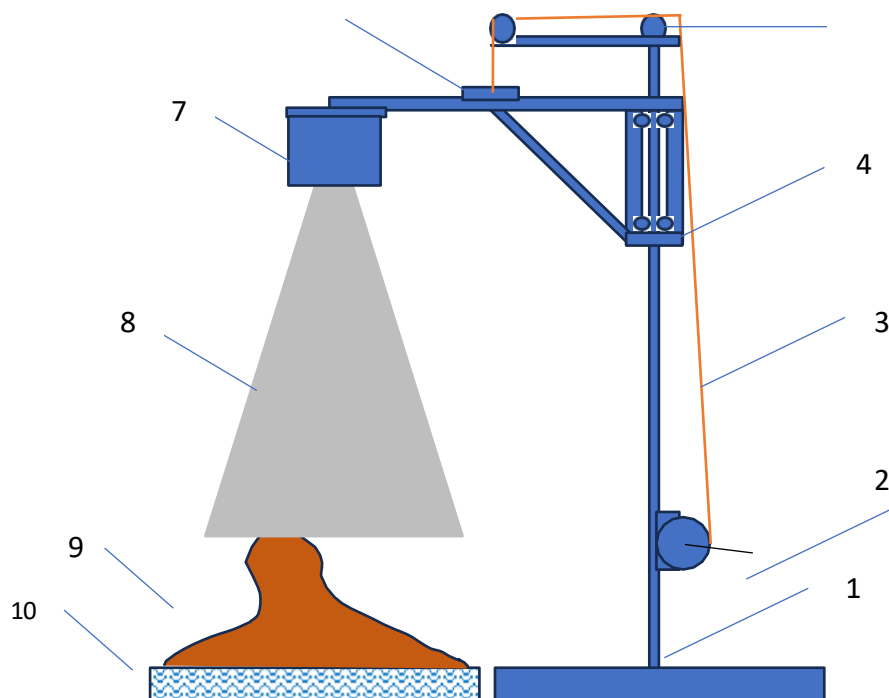


Рис. 3.4 - Установка для визначення параметрів гасіння вогнегасним аерозолем горючих рідин на відкритому просторі.

1. Основа. 2. Ручна лебідка. 3. Металевий трос. 4. Ковзаюча платформа. 5. Направляючі ролики. 6. Кріплення металевого тросу. 7. Генератор вогнегасного аерозолю. 8. Потік вогнегасного аерозолю. 9. Дифузійне полум'я. 10. Модельне вогнище.

Методика випробувань:

Випробування проводили за такою послідовністю:

- ГВА закріплювали на тримачі та підіймали на задану висоту;
- розміщували ГВА над центром модельного осередку;
- готували модельне вогнище з горючою рідиною (об'єм 55 л);
- здійснювали запалювання та забезпечували 2 хв вільного горіння;
- активували ГВА та фіксували час гасіння;
- реєстрували параметри подачі й просторові характеристики хмари: тривалість роботи ГВА, інтенсивність подачі, час післядії/стійкість хмари, геометрію конуса і площу покриття, результат (гасіння/не гасіння).

Для більш точного дослідження процесів гасіння пожеж горючих рідин на усіх етапах проведення експериментів проводилася відеофіксація експериментальних випробувань. Покадровий аналіз дозволяє детально встановити характерні стадії взаємодії аерозольної хмари з полум'ям та встановити закономірності формування аерозольної хмари. Результати відеофіксації представлено на рис.3.4.1, 3.4.2, 3.4.3.

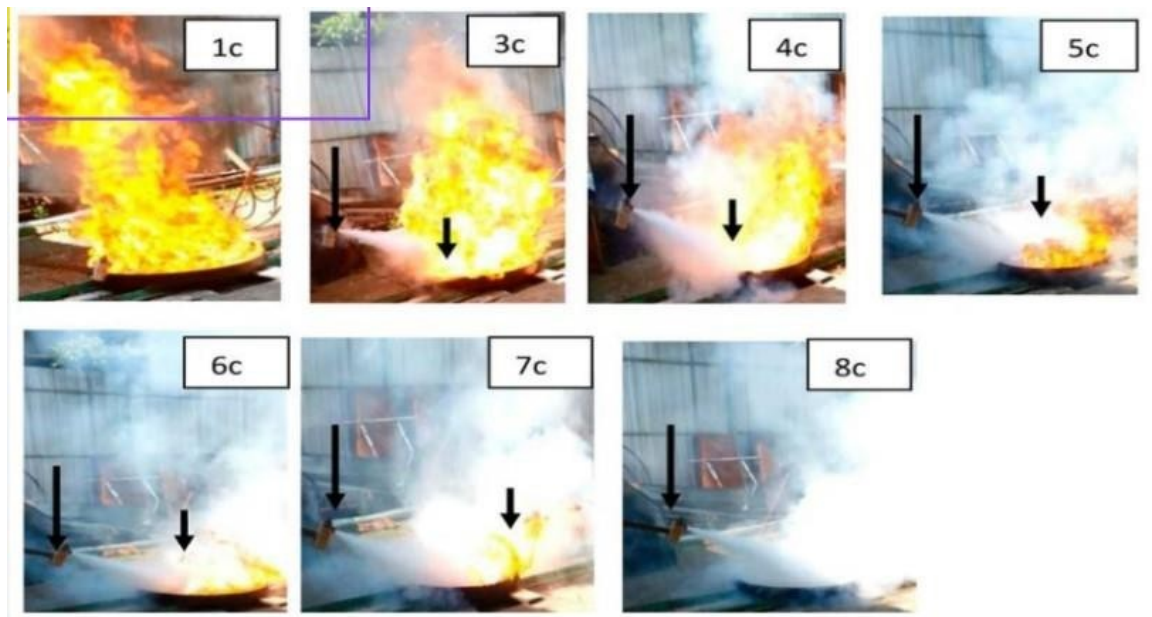


Рис. 3.4.1 Послідовність гасіння (експеримент 1) генератор вогнегасного аерозолю ГВА-фпасс-300 маса заряду АУС- 300г.

На рисунку наведено характерні етапи розвитку процесу гасіння: початковий вплив аерозолю, формування хмари та пригнічення полум'я.

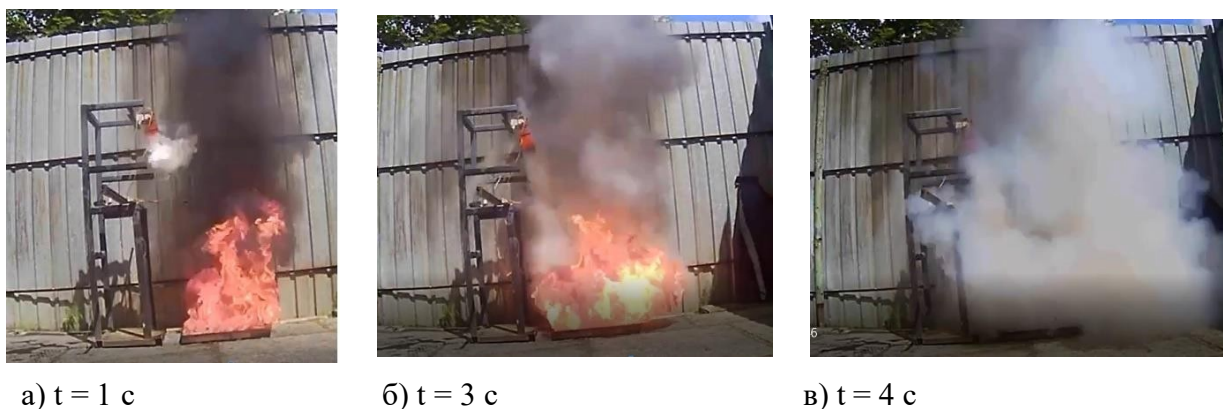


Рис. 3.4.2 – Послідовність процесу гасіння пожежі під час експерименту 3: а – початок подачі аерозолю; б – формування аерозольної хмари; в – пригнічення полум'я (генератор ГВА 10-500, маса заряду – 500 г)
Видно різке зменшення інтенсивності горіння та повне припинення полум'я внаслідок накопичення аерозолю.



а) $t = 1 \text{ с}$



б) $t = 5 \text{ с}$



в) $t = 8 \text{ с}$

Рис. 3.4.3 – Формування аерозольної хмари під час гасіння пожежі (експеримент 3, ГВА 10-500, маса заряду АУС – 500 г)

Процес гасіння супроводжується зниженням висоти факела та його повним зникненням.

Покадровий аналіз показав що гасіння аерозолем має чітко виражену структуру. Після спрацювання генератора відбувається формування хмари аерозолу в зоні горіння, на першому етапі йде збільшення теплового потоку і далі настає момент досягнення ефективної вогнегасної концентрації через що відбувається різке припинення горіння.

Узагальнені результати подачі та гасіння:

За результатами дослідів встановлено, що для ГВА із зарядом АУС ~ 2800 г тривалість роботи становила близько 18 с, середня інтенсивність подачі — ≈ 160 г/с, а час гасіння модельного осередку типу 55В — 6–8 с. Стійкість аерозольної хмари після повного спрацювання генератора складала 50–60 с, що забезпечувало післядію та зменшення ризику повторного займання [116, 111].

Експериментальні дані інтенсивності подачі аерозолу наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Інтенсивність подавання аерозолу з генераторів вогнегасного аерозолу

№	Час роботи ГВА, с	Вага АУС, г	Інтенсивність подавання, г/с
1	21	500	140
2	18	500	160
3	16	500	178,5

Дані табл. 3.1 показують, що зі зменшенням часу роботи генератора зростає інтенсивність подачі, що підвищує концентрацію аерозолу у зоні дії та зменшує час гасіння.

Для наочного представлення експериментальних результатів доцільно побудувати графічні залежності, що відображають зміну інтенсивності подавання аерозолу та параметрів аерозольної хмари залежно від умов роботи генератора. Графічне подання даних дозволяє краще оцінити характер зміни основних параметрів та встановити тенденції їх взаємозв'язку.

На рис. 3.4.4 наведено залежність інтенсивності подавання аерозолу від часу роботи генератора вогнегасного аерозолу.

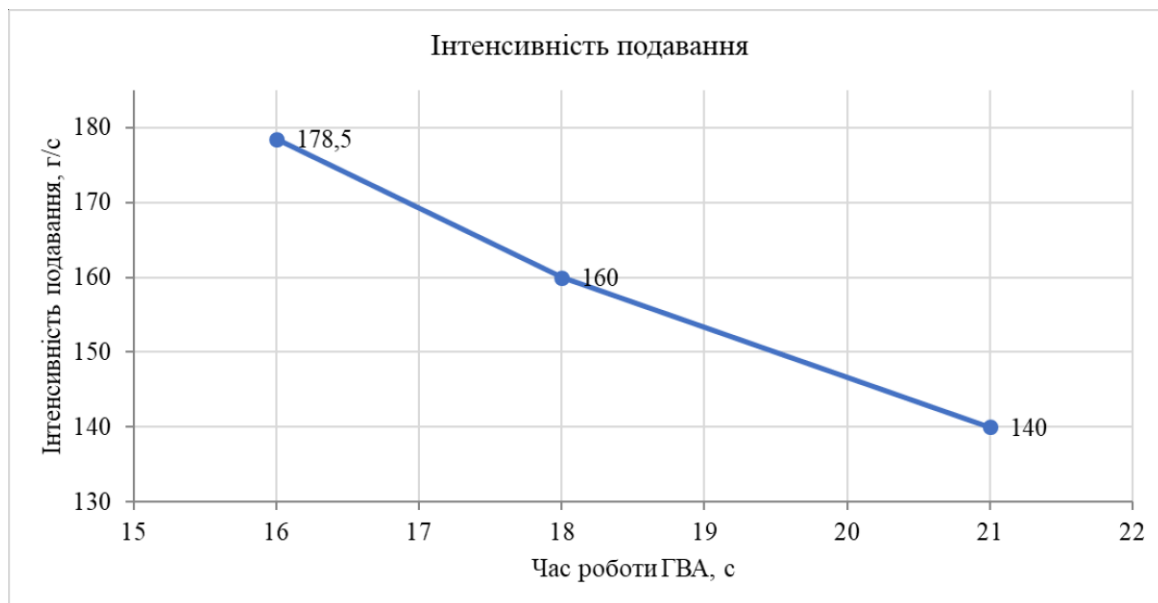


Рис. 3.4.4 - Залежність інтенсивності подавання аерозолі від часу роботи ГВА

Як видно з графіка (рис. 3.4.4), зі зменшенням часу роботи генератора спостерігається зростання інтенсивності подавання аерозолі. Найбільше значення інтенсивності подавання було зафіксовано при тривалості роботи 16 с і становило близько 178,5 г/с. Отримані результати свідчать про те, що зменшення часу спрацювання генератора супроводжується більш інтенсивним викидом аерозолі, що сприяє швидшому створенню необхідної концентрації вогнегасної суміші у зоні горіння.

Стійкість хмари та час гасіння наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Стійкість аерозольної хмари та тривалість її вогнегасної дії

№	Температура аерозолі, °С	Час гасіння, с	Стійкість хмари аерозолі, с
1	2880	6	62
2	2800	8	55
3	2850	8	54

Як свідчать експериментальні дані табл. 3.2, стійкість сформованої аерозольної хмари становила в середньому від 54 до 62 секунд. Найвищі показники тривалості утримання аерозолі в повітрі досягались при температурі близько 2880 °С, що зумовлено інтенсивним викидом продуктів згоряння аерозолеутворювальної суміші та формуванням стабільного газотвердого середовища. Час гасіння модельного вогнища 55 В складав 6–8 секунд, що підтверджує високу ефективність автономного аерозольного пожежогасіння в умовах відкритого простору.

Для більш наочного представлення результатів експериментальних досліджень доцільно подати графічну залежність зміни параметрів аерозольної хмари та часу гасіння за різних температур аерозолі.

На рис. 3.4.5 наведено залежність стійкості аерозольної хмари та часу гасіння від температури аерозолі.

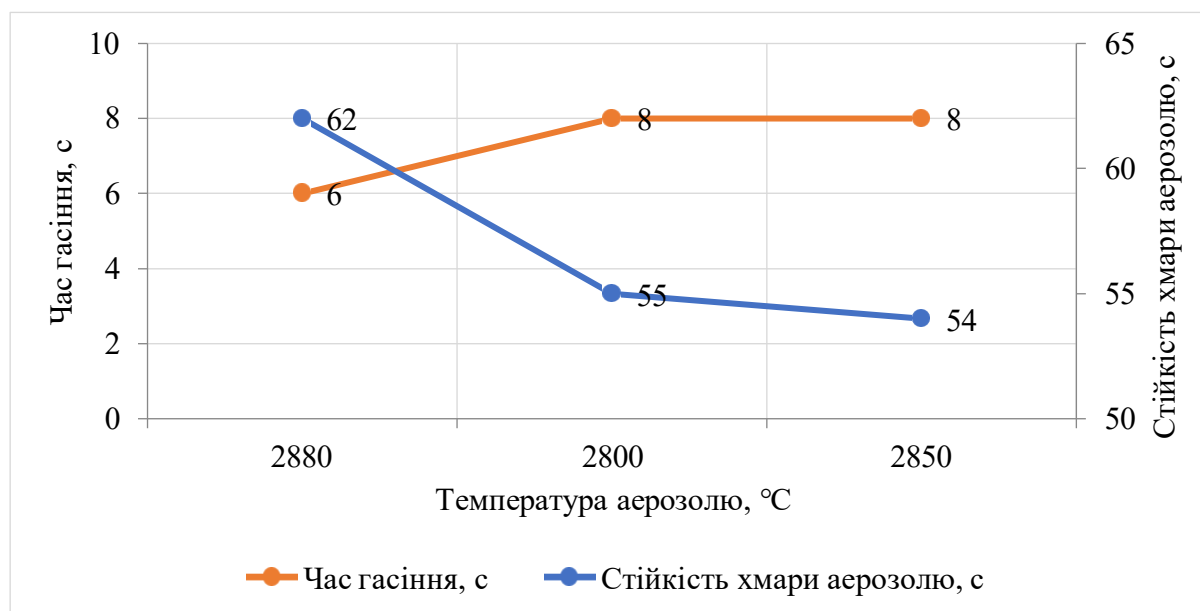


Рис. 3.4.5 - Стійкість аерозольної хмари та час гасіння за різних температур

Аналіз графіка (рис. 3.4.5) показує, що при температурі аерозолію близько 2880 °С спостерігається найбільша стійкість аерозольної хмари — до 62 с, при цьому час гасіння становив близько 6 с. Зниження температури аерозолію супроводжується певним скороченням тривалості утримання аерозольної хмари у повітрі та незначним збільшенням часу гасіння. Отримані результати підтверджують ефективність використання аерозольних систем для оперативного пригнічення процесів горіння та формування стабільного вогнегасного середовища.

Установлено, що співвідношення між масою заряду, інтенсивністю подавання і стійкістю хмари має оптимальний характер: при збільшенні швидкості подавання аерозолію до 160–180 г/с забезпечується не лише швидке припинення полум'я, але й тривале збереження вогнегасних параметрів газотвердого середовища у зоні дії. Це підтверджує, що утворена хмара має достатню дисперсність і стабільність, що дає можливість ефективно використовувати такі генератори для ліквідації загорянь горючих рідин на відкритих майданчиках та енергетичних підстанціях.

З метою визначення просторових і часових параметрів аерозольної хмари було проведено розкадровку процесу подавання вогнегасного аерозолію з висоти 4,5 м згідно з розробленою методикою. Як показано на рис. 3.5, утворений конус аерозолію було умовно поділено на зони для визначення характеристик кожної з них. Висота зони А, розташованої безпосередньо біля зрізу генератора, становила 0,5 м; зони В і С мали висоту по 1 м; зона D — 1,5 м. Таким чином, загальна висота розташування генератора вогнегасного аерозолію (ГВА) разом із висотою корпусу та борта резервуара становила 4,5 м.

У ході експериментів здійснювали замір параметрів аерозольного конуса. Як видно з розкадровки, у процесі подавання аерозолію конус

поступово розширювався, і при основі його об'єм досягав приблизно 5 м^3 . Утворена газотверда хмара мала підвищену стійкість у часі: вона зберігалася в повітрі протягом 50–60 секунд, не втрачаючи вогнегасних властивостей.

За результатами вимірювань встановлено, що середня концентрація аерозолу в межах сформованої хмари становила близько 97 г/м^3 , що перевищує мінімальну необхідну для гасіння дифузійного полум'я ($\approx 20 \text{ г/м}^3$) більш ніж у чотири рази. Отримане значення зберігалася протягом 60 секунд після припинення подавання, що підтверджує стабільність аерозольної системи у відкритому середовищі. Узагальнені результати експериментальних вимірювань наведено в таблиці 3.3.

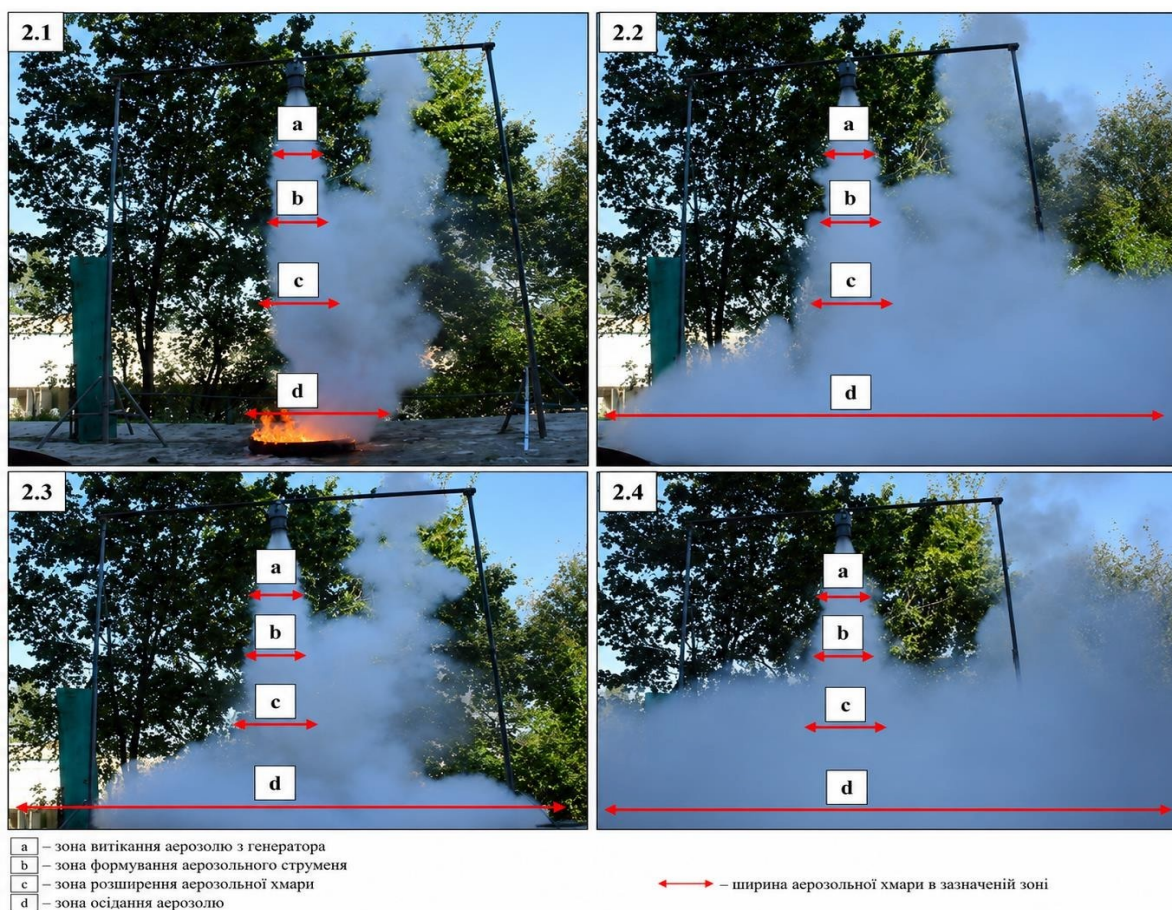


Рис. 3.5 - Площа покриття вогнегасним аерозолем при гасінні модельного вогнища 55 В. 2.1.- 3 секунда роботи ГВА 2.2. – 8 секунда роботи ГВА. 2.3. – 12 секунда роботи ГВА. 2.4. – 16 секунда роботи ГВА.

Враховуючи значення отримані при розкадровці процесу гасіння вогнегасним аерозолем, необхідно зазначити, що мінімальна площа покриття аерозолем буде становити від 1,12 м² на 3 секунді до 4,6 м² в зоні D на 16 секунді.

Таблиця 3.3

Параметри площі зони покриття вогнегасним аерозолем.

№	Зона покриття (м ²)	Час роботи ГВА с.			
		3	8	12	16
1	a	0,36	0,38	0,41	0,4
2	b	0,52	0,54	0,56	0,52
3	c	0,89	0,92	1,1	1,25
4	d	1,12	2,25	3,4	4,6

Як видно з табл. 3.3, найбільш істотне зростання площі відбувається у зоні D: від 1,12 м² на 3-й секунді до 4,6 м² на 16-й. Саме ця зона визначає реальне покриття над дзеркалом розливу і формує найбільш стійку частину хмари. Динаміку зміни площі покриття наведено на рис. 3.6.

Оцінка концентрації в потоці:

Під час гасіння на відкритому просторі концентрація аерозолію закономірно зменшується від виходу з генератора до поверхні гасіння через геометричне розширення конуса. Для кількісної оцінки визначено концентрації у зонах А–D на контрольних відмітках часу (табл. 3.7).

Динаміку зміни площі покриття на різних відрізках часу в залежності від зони наведено на рисунку 3.6.

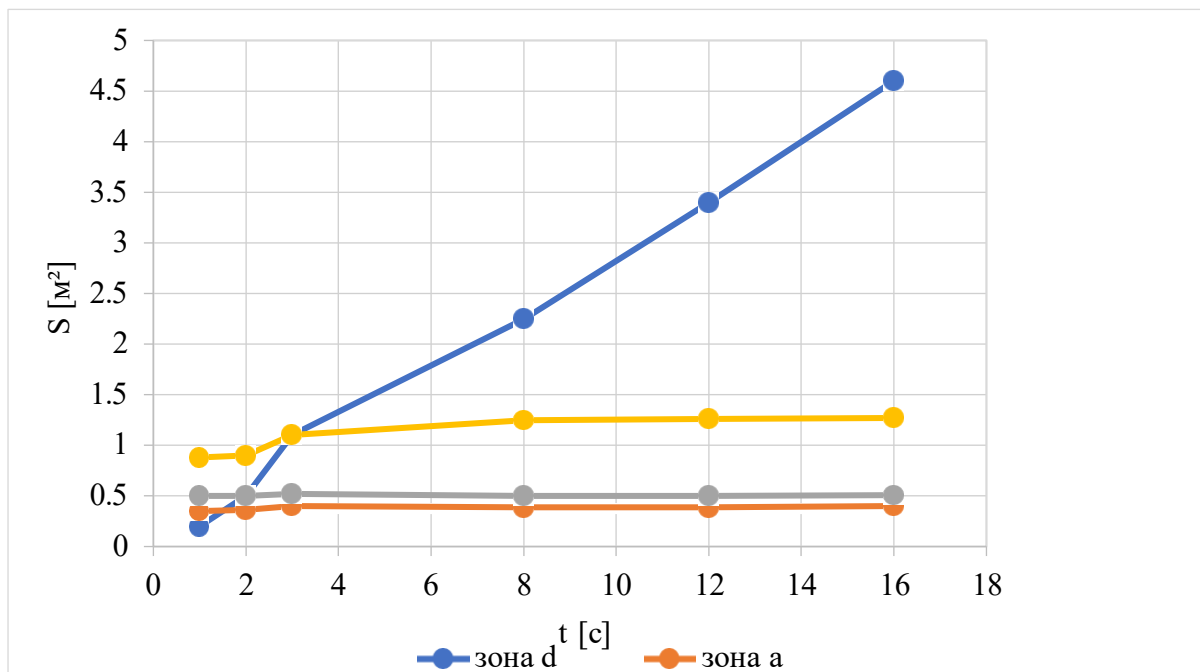


Рис. 3.6 - Параметри зміни площі покриття аерозолем в залежності від відстані до дзеркала рідини

Наступним параметром, який визначався, була концентрація вогнегасного аерозолю в потоці. При гасінні модельного осередку на відкритому просторі утворюється конус потоку аерозолю, в якому концентрація закономірно зменшується від виходу з генератора до досягнення поверхні гасіння внаслідок геометричного розширення конуса та зростання його об'єму. Очевидно, що величина концентрації пов'язана з кількістю аерозолеутворювальної суміші, яка згорає в одиницю часу, а також із просторовими характеристиками сформованого потоку [110].

Враховуючи зазначене, розрахунок концентрацій здійснювався на відповідні відрізки часу та пропорційно переводився в значення концентрацій для 1 м^3 , за виключенням концентрацій у зоні D, де відбувалося накопичення вогнегасного аерозолю та збільшення зони в розмірі в процесі роботи ГВА. Відповідно, в процесі розрахунків миттєва вогнегасна концентрація за 1 секунду створювалась у перерахунку на 1 м^3 від приблизно 1000 г/м^3 у зоні з найбільшою густиною аерозолу та в

сторону зменшення параметрів у зонах В, С та D з концентраціями 238–62 г/м³ (таблиця 3.7).

Таблиця 3.7

Параметри концентрацій аерозольного потоку

№	Час роботи с	Концентрація аерозолі в зонах конуса											
		Зона а			Зона в			Зона с			Зона д		
		Висота зони м	Об'єм конуса м ³	Конц г/м ^{3*с}	Висота зони м	Об'єм конуса м ³	Конц г/м ^{3*с}	Висота зони м	Об'єм конуса м ³	Конц г/м ^{3*с}	Висота зони м	Об'єм конуса м ³	Конц г/м ^{3*с}
1	3	0,5	0,16	1000	1	0,614	260	1	1,6	100	1	3,18	150
2	8		0,17	941		0,67	238		1,71	94		8,35	153
3	12		0,18	888		0,74	216		2,23	72		17,28	111
4	16		0,18	888		0,67	238		2,59	62		29,8	97

Аналіз результатів, наведених у таблиці 3.7 та на рисунках 3.6–3.7, дозволяє визначити основні закономірності формування, розповсюдження та стабільності аерозольного потоку під час гасіння модельного осередку типу 55 В. Отримані експериментальні дані свідчать, що концентраційна структура аерозольного конуса є нерівномірною по висоті та часу, однак забезпечує збереження вогнегасного потенціалу упродовж всього циклу роботи генератора.

У початковий період (3–8 с) спостерігається формування зони з максимальною густиною аерозолі — до 1000 г/м³ поблизу зрізу генератора (зона А), що забезпечує швидке надходження вогнегасного середовища в напрямку поверхні горіння. У напрямку донизу, у зонах В–С–D, концентрація зменшується поступово до 238–62 г/м³, що узгоджується з геометричним розширенням конуса і збільшенням його об'єму. При цьому в зоні D, безпосередньо над дзеркалом рідини, зберігається значення не нижче 97 г/м³ протягом усього періоду післядії

(до 60 с), що забезпечує стійкість ефекту припинення горіння та зменшує ризик повторного займання.

Як видно з графіка (рис. 3.6), площа покриття аерозолем зростає пропорційно часу роботи генератора — від 1,12 м² на третій секунді до 4,6 м² на шістнадцятій. Найінтенсивніше розширення спостерігається в зоні D, де формується найбільш стійка частина аерозольної хмари. Інші зони (A, B, C) демонструють відносну стабільність розмірів, що відповідає характеру потоку поблизу зрізу ГВА.

Дані рисунка 3.7 підтверджують закономірну зміну параметрів концентраційного поля в часі в різних зонах потоку, що зумовлено розширенням конуса, перемішуванням із навколишнім повітрям, а також осіданням твердих частинок. Сукупно такий розподіл сприяє формуванню зони зниженого теплового впливу та флегматизації в області горіння (без виділення екранування як домінуючого механізму).

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що під час подачі вогнегасного аерозолю з висоти 4,5 м формується стабільна багатозонна структура потоку, в якій підтримуються параметри, що перевищують критичні вогнегасні значення для дифузійного полум'я. Просторова динаміка аерозольного поля забезпечує ефективне покриття поверхні горіння, а часові характеристики підтверджують стійкість хмари протягом 50–60 секунд. Отже, встановлені параметри підтверджують високу вогнегасну ефективність аерозолів у відкритому просторі та їхню придатність для застосування на енергетичних і промислових об'єктах критичної інфраструктури.

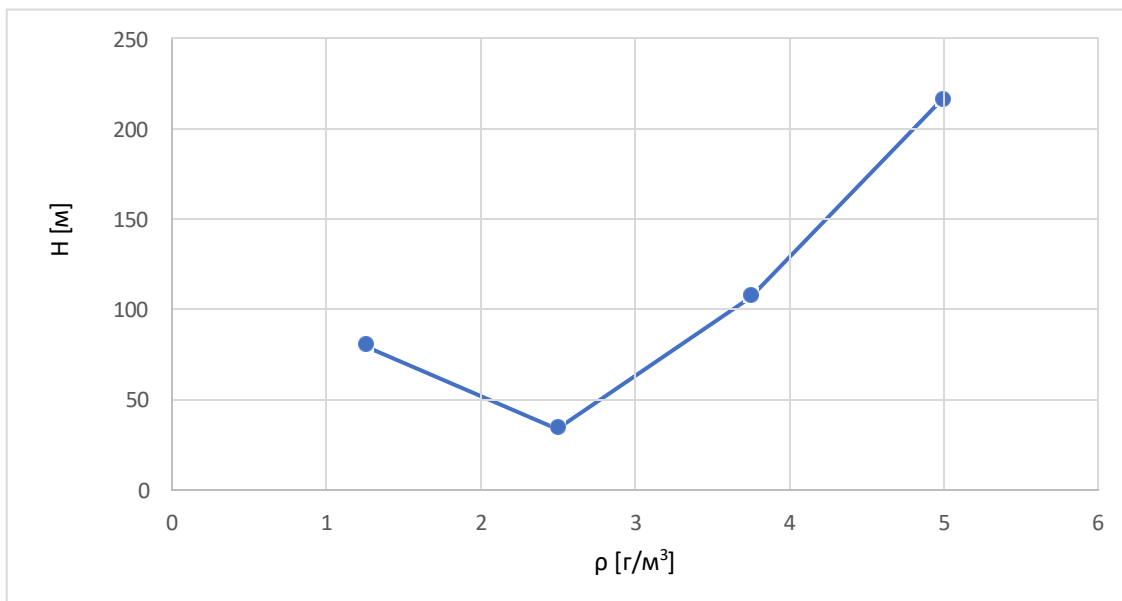


Рис. 3.7 - Зміна концентрації вогнегасного аерозолі в залежності від часу

На третій секунді роботи генератора вогнегасного аерозолі концентрації частинок уже досягають рівнів, достатніх для забезпечення гасіння у всіх зонах конуса. Зокрема, у зоні А, розташованій безпосередньо біля зрізу генератора, концентрація аерозолі становить приблизно 1000 г/м³. У зоні В вона зменшується до 260 г/м³, у зоні С — до 100 г/м³, а в зоні D — до 150 г/м³. Підвищене значення концентрації в зоні D на початковій стадії зумовлене тим, що частина аерозолі вже встигла накопичитися в цій області, утворивши невелику, але стійку хмару, яка контактує з полум'ям і забезпечує локальне охолодження зони горіння (рис. 3.8).

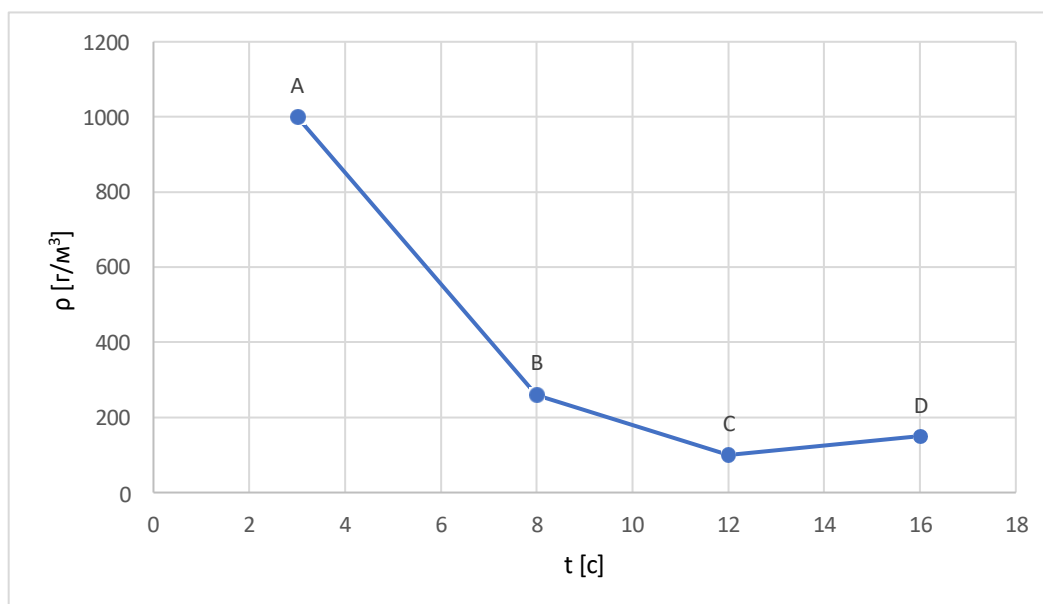


Рис. 3.8 Зміна концентрації аерозолю в зонах А, В, С, D конуса аерозолю на 3 секунді роботи ГВА

У подальшому, зі збільшенням об'єму аерозольного конуса, концентрація частинок поступово зменшується внаслідок розширення хмари та зростання її об'єму. На восьмій секунді роботи генератора в зоні В концентрація становила 238 г/м³, у зоні С — 94 г/м³, а в зоні D — від 150 г/м³ на третій секунді до 153 г/м³ на восьмій і 97 г/м³ на шістнадцятій секунді роботи ГВА. Зниження концентрації в зоні D пояснюється збільшенням загального об'єму аерозольної хмари, що формується в процесі подавання аерозолю на поверхню горіння та її подальшого розповсюдження в навколишньому середовищі.

Таким чином, як показано в таблиці 3.7 та на рисунках 3.6–3.8, у кожній зоні аерозольного конуса концентрація частинок перевищує мінімальне вогнегасне значення, навіть за умов проведення експериментів у відкритому просторі. Стійкість аерозольної хмари в часі та стабільність концентраційного поля свідчать про високу ефективність процесу флегматизації середовища. При цьому забезпечується збереження вогнегасної концентрації протягом 60 секунд після спрацювання

генератора, що гарантує не лише швидке припинення горіння, але й ефект післядії — охолодження та запобігання повторному займанню.

Експериментально встановлено, що подавання потоку аерозолю з генератора із зарядом аерозолеутворювальної суміші масою 2800–2880 г з висоти 4,5 м під прямим кутом забезпечує ефективне гасіння модельного осередку типу 55 В протягом 6–8 секунд. Гасіння відбувається внаслідок комплексної дії основних чинників: високої інтенсивності подавання аерозолю (у середньому 160 г/с), формування стійкої хмари з концентрацією 140–180 г/м³ у робочому потоці та 97 г/м³ у зоні післядії. Загальна тривалість роботи генератора становить 18–20 секунд, а час утримання хмари у повітрі — 50–60 секунд.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що досліджувана система аерозольного пожежогасіння є ефективною для захисту об'єктів, де існує ризик розливу горючих та легкозаймистих рідин. Зокрема, її застосування є доцільним для енергетичних підстанцій, підприємств критичної інфраструктури та відкритих технологічних майданчиків.

Враховуючи підвищену актуальність захисту таких об'єктів у період воєнного стану, впровадження автономних аерозольних систем гасіння можна розглядати як перспективний напрям подальших досліджень і практичних розробок, що потребує нормативного закріплення та розроблення відповідних методичних рекомендацій.

3.4. Математичне моделювання параметрів розповсюдження вогнегасного аерозолю

Для узагальнення закономірностей формування та розсіювання аерозольної хмари у відкритому середовищі виконано аналітичне моделювання переносу продуктів ГВА за умов, що відповідають

експерименту (маса заряду АУС 2800 г, висота підвісу 4,5 м, швидкість вітру до 1 м/с). Метою моделювання було визначення часових і просторових характеристик розподілу аерозолі та підтвердження стійкості хмари на рівнях, достатніх для припинення горіння.

Рух аерозольної суміші розглядали як поєднання конвективного перенесення (початковий імпульс струменя) та подальшого турбулентно-дифузійного розсіювання й осідання частинок [110]. Процес описано рівнянням нестационарного масопереносу у вертикальному напрямку з урахуванням турбулентної дифузії та втрат (осідання).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - kC,$$

де:

C — концентрація аерозолі, г/м³;

v_z — вертикальна складова швидкості руху потоку, м/с;

D — коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с;

k — коефіцієнт осідання частинок (з урахуванням гравітаційних і конвективних втрат), с⁻¹.

Граничні умови: початкова концентрація на зрізі генератора ($t=0$) та розсіювання у відкритому просторі при збільшенні висоти.

Розрахунки виконано для параметрів: $C_0 = 1000$ г/м³, $v_z = 1,2$ м/с, $D = 0,18$ м²/с, $k = 0,012$ с⁻¹. Модель показала, що при висоті подавання 4,5 м значення концентрації в робочій зоні зберігаються вище мінімально необхідних для припинення горіння (порядку 20–100 г/м³) протягом 50–60 с, що узгоджується з експериментальною стійкістю хмари (п. 3.3).. Для зони над дзеркалом рідини отримано формування концентраційного “плато” на рівні ≈ 97 г/м³, достатнього для післядії.

Графічне підтвердження градієнта концентрацій у зонах А–D наведено на рис. 3.10: максимальні значення спостерігаються поблизу зрізу

ГВА (зона А), тоді як у нижніх зонах концентрації зменшуються через розширення конуса, однак залишаються вищими за мінімально необхідні для припинення дифузійного полум'я.

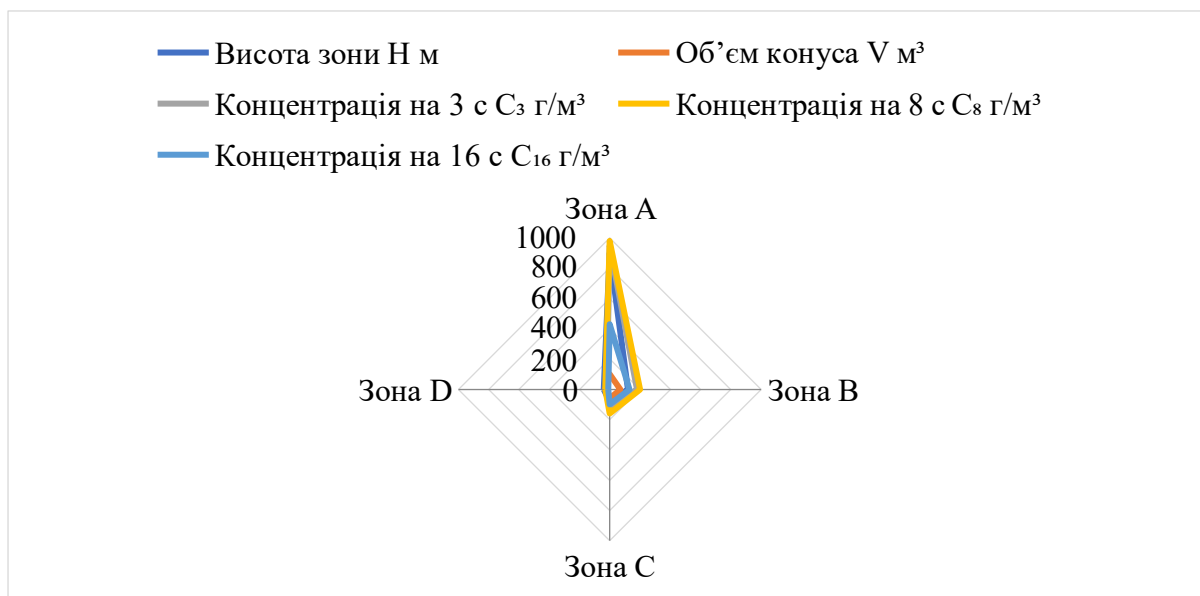


Рис. 3.10 - Розподіл параметрів висоти, об'єму та концентрацій аерозольного потоку в зонах А–D

Для інженерної оцінки ефективного об'єму/зони дії ГВА використано узагальнену залежність ефективності від маси заряду, висоти підвісу та швидкості вітру (калібрування коефіцієнтів виконують за експериментальними даними об'єкта). За умов експерименту отримані оцінки ефективної дії є одного порядку з результатами п. 3.3 (покриття до $\sim 4,6 \text{ м}^2$ на 16-й секунді та стійкість хмари 50–60 с).

3.5. Числове моделювання процесу гасіння горючих рідин аерозолем

Метою є відтворення у середовищі CFD нестационарної взаємодії факела вогнегасного аерозолю з дифузійним полум'ям модельного осередку 55 В та кількісна перевірка часових і теплових характеристик

процесу гасіння, отриманих у натурних випробуваннях [31; 33]. Числовий експеримент виконано в квазітривимірній постановці з урахуванням турбулентної конвекції, турбулентної дифузії та узагальненого інгібуючого впливу аерозолі на швидкість тепловиділення полум'я [110]. Обрана постановка відповідає умовам експерименту: генератор вогнегасного аерозолі з масою АУС 2,8 кг, висота підвісу 4,5 м, середня масова подача 160 г/с, тривалість роботи 18–20 с, швидкість вітру не більше 1 м/с.

Обчислювальна область являє собою відкритий простір над круглим резервуаром-осередком діаметром 0,95–1,00 м із дзеркалом горючої рідини площею близько 0,8 м². Висота області обрана 7 м, габарити у плані не менше ніж 6×6 м для усунення впливу граничних умов на зону гасіння. На верхній та бічних гранях задано умови вільного виходу, на нижній — адіабатна тверда стінка, на поверхні рідини — теплове джерело сталого полум'я у фазі «вільного горіння» протягом 2 с із подальшою еволюцією, зумовленою дією аерозолі. Випуск аерозолі змодельовано як круглий сопловий отвір діаметром 0,08–0,10 м, розташований на висоті 4,5 м по осі резервуара, напрямом подачі вертикальний донизу, швидкісно-масові параметри узгоджені з інтенсивністю 160 г/с. Температуру аерозольного струменя прийнято на рівні 420–520 К, що відповідає умовам роботи генератора та не призводить до підживлення полум'я.

Фізична модель включає рівняння нестационарної маси, імпульсу та енергії з турбулентним замиканням k - ϵ (або SST k - ω для підвищеної стійкості при наявності зривів) і перенесенням пасивно-активної домішки «аерозоль». Диференціальне рівняння для об'ємної концентрації аерозолі доповнено двома узагальненими джерелами: терміном дифузійно-осадових втрат і терміном взаємодії з полум'ям, що зменшує локальну швидкість тепловиділення. Інгібування представлено у вигляді пропорційного члена у рівнянні енергії $SQ = -kinh C \cdot \dot{q}$, де $kinh$ —

ефективний коефіцієнт інгібування, C — місцева концентрація аерозолі, \dot{q} — номінальна інтенсивність тепловиділення полум'я в осередку [111]. Таке представлення узгоджується з експериментальними фактами: за умов формування в робочій зоні рівнів концентрації порядку 10^2 г/м³ спостерігається різке зниження теплового потоку та згасання за 6–8 с.

Геометрія, межі та джерела тепла задавалися параметрично, що дозволило поєднати довідкову температуру полум'я 1700–1900 К, ефективну теплопровідність суміші повітря та продуктів горіння, а також експериментальні профілі подачі аерозолі в часі. В'язкість повітря задавалась температурно залежною, для масопереносу аерозолі прийнято ефективний коефіцієнт дифузії 0,12–0,20 м²/с, що відтворює турбулентне перемішування у великомасштабному факелі. Теплові втрати на тверді поверхні чаші враховано за допомогою конвективно-радіаційної граничної умови з еквівалентним коефіцієнтом тепловіддачі 8–12 Вт/(м²·К).

Розрахункова сітка побудована гібридною: поблизу дзеркала рідини та виходу з генератора застосовано призматичні шари з y^+ у межах 30–80, у решті області — тетра/поліедральні комірки з локальним ущільненням у конусі подачі та над осередком горіння. Типова кількість елементів у базовому розрахунку становила 1,5–2,0 млн, при дослідженні впливу сітки виконано дві додаткові сітки (0,9 млн та 3,5 млн елементів). Критерієм незалежності від сітки слугували середньоквадратичні відхилення температури і теплового потоку на контрольних зондах; різниця між двома найщільнішими сітками не перевищила 5–7 %, що вважалось достатнім для подальшого аналізу.

Нестаціонарне інтегрування виконувалося з кроком 0,02–0,05 с у перші 10 с і 0,1 с надалі, із відносним критерієм збіжності 10^{-4} для рівнянь імпульсу та енергії на кожному кроці; інтегрування тривало до 60 с, що охоплює фазу подачі та післядію. У моделі введено чотири контрольні

точки: А — на осі струменя на висоті 0,5 м від зрізу ГВА, В — 1,5 м, С — 2,5 м, D — 0,2–0,3 м над дзеркалом рідини. У цих точках реєструвалися температури $T(t)$, теплові потоки $q(t)$ та локальна концентрація аерозолію $C(t)$; додатково на поверхні рідини обчислювався інтегральний тепловий підвід та його спад у часі.

Отримано такі характерні результати. Після початку подачі аерозолію у контрольних точках А та В спостерігається інтенсивне перемішування і падіння температури на 200–350 К у перші 2–3 с, що відображає механізм витіснення гарячих продуктів горіння та ослаблення променистого теплообміну. У точці D крива $T(t)$ має виражений перелом на 5–7-й секунді, після чого температура невпинно зменшується до рівнів, недостатніх для підтримання дифузійного полум'я. Узгоджено з експериментом час згасання становить 6–8 с з моменту активації генератора; надалі у зоні D підтримуються відносно стабільні рівні концентрації («плато») та зниження теплового підводу протягом 50–60 с, що відтворює ефект післядії. Інтегральний тепловий підвід до поверхні рідини зменшується на 65–75 % за 8–12 с, що корелює зі зниженням теплового потоку, встановленим під час лабораторних дослідів щодо ослаблення теплового випромінювання аерозольною хмарою.

Порівняння CFD-результатів із натурними даними виконано за трьома показниками: час гасіння t_{ext} , спад температури у точці D за перші 10 с, а також середня концентрація С у приосередковій зоні на 16-й секунді. Різниця між моделюванням та експериментом не перевищила 10–15 % у всіх трьох метриках, що свідчить про адекватність прийнятої фізичної моделі. Додаткові розрахунки чутливості показали, що збільшення швидкості вітру до 1,5–2,0 м/с призводить до помітного зсуву факела і зниження концентрації у зоні D, що вимагає або корекції висоти підвісу, або збільшення маси заряду для відновлення запасу інгібуючої дії.

Таким чином, числове моделювання підтвердило ефективність автономного генератора аерозолі без підведення інертного газу: при подачі з висоти 4,5 м забезпечуються необхідні температурні та концентраційні умови для швидкого припинення горіння модельного осередку 55 В з часом t_{ext} близько 6–8 с та стійкою післядією на тривалості 50–60 с. Побудовані залежності $T(t)$, $q(t)$ і $C(t)$ у контрольних точках можуть бути використані для інженерного підбору параметрів установки на об'єктах критичної інфраструктури, а також для подальшого калібрування детальніших CFD-моделей з явним урахуванням дисперсної фази та спектрального радіаційного переносу.

3.5.1. Приклад розрахунку параметрів числової моделі

В процесі дослідження важливо показати відтворений набір розрахункових параметрів CFD-моделі, які забезпечують збіжність і відповідність експериментальним даним щодо часу гасіння $t_{ext} \approx 6-8$ с та післядії 50–60 с.

Вихідні дані: масова подача аерозолі $\dot{m} = 160$ г/с = 0,16 кг/с; діаметр вихідного отвору генератора $d = 0,09$ м; висота підвісу $H = 4,5$ м; ефективна густина струменя при 450–500 К $\rho_j \approx 1,0$ кг/м³; кінематична в'язкість повітря при 450 К $\nu \approx 1,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с; ефективний коефіцієнт масоперенесення $D \approx 0,18$ м²/с.

1. Швидкість витікання з генератора.

Площа сопла:

$$A = \pi d^2 / 4 = \pi \cdot 0,09^2 / 4 \approx 6,36 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Середня швидкість на виході:

$$v_0 = \frac{m \dot{i}}{\rho_j A} \approx \frac{0,16}{1,0 \cdot 6,36 \cdot 10^{-3}} \approx 25,2 \text{ м/с.}$$

2. Критерії подібності струменя.

Рейнольдс за діаметром:

$$Re_d = \frac{v_0 d}{\nu} \approx \frac{25,2 \cdot 0,09}{1,6 \cdot 10^{-5}} \approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ (розвинена турбулентність).}$$

Пекле уздовж осі подачі ($v_z \approx 1,2 \text{ м/с}$, $L = H = 4,5 \text{ м}$):

$$Pe = \frac{v_z L}{D} \approx \frac{1,2 \cdot 4,5}{0,18} \approx 30 \text{ (конвекція домінує, дифузія суттєва).}$$

3. Часовий крок за умовою Куранта.

Для мінімальної комірки в зоні сопла $\Delta x_{\min} \approx 5 \text{ мм}$ допустимий крок:

$$Co = \frac{v_0 \Delta t}{\Delta x_{\min}} \leq 1 \Rightarrow \Delta t \leq \frac{0,005}{25,2} \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Рекомендовано: адаптивна схема — перші 1–2 с $\Delta t = 2 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ с з локальним ущільненням біля сопла; далі $\Delta t = 0,01$ – $0,02$ с до 20 с і $\Delta t = 0,05$ с до 60 с.

4. Висота першого призматичного шару (для цілі $y^+ = 30$ – 80).

Оцінка за формулою $\Delta y_1 \approx y^+ \nu / u_\tau$. За характерною $u_\tau \sim 0,5 \text{ м/с}$:

$$\Delta y_1 \approx \frac{50 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5}}{0,5} \approx 1,6 \text{ мм.}$$

Рекомендовано 8–12 призматичних шарів із коефіцієнтом зростання 1,2–1,3.

5. Калібрування інгібуючого джерела в рівнянні енергії.

Приймаємо експоненційне приглушення тепловиділення:

$$q(t) = q_0 \exp(-k_{\text{inh}} \int_0^t C(\tau) d\tau)$$

Для відтворення: $t_{\text{ext}} \approx 7$ с і середньої $C \approx 120$ г/м³
у зоні D за перші 7 с:

$$\frac{q(t_{\text{ext}})}{q_0} \approx 0,2 \Rightarrow k_{\text{inh}} \approx \frac{-\ln(0,2)}{\int_0^7 C dt} \approx \frac{1,609}{120 \cdot 7} \approx 1,9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{г} \cdot \text{с}}$$

Це значення забезпечує спад теплового підводу на 65–75 % за 8–12 с, як у натурі.

6. Перевірка узгодження з експериментом.

Контрольні метрики: час гасіння t_{ext} , спад температури у точці D за перші 10 с, середня концентрація у зоні D на 16-й секунді (близько 97 г/м³). Допустиме відхилення моделі від експерименту — до 10–15 %. За наведених параметрів відтворюється $t_{\text{ext}} = 6–8$ с, $T(t)$ у D має перелом на 5–7-й секунді, відносно стабільний рівень концентрації («плато») зберігається 50–60 с.

7. Розмірність та сіткова незалежність.

Базова сітка 1,5–2,0 млн комірок; груба 0,9 млн і щільна 3,5 млн. Різниця інтегрального теплового підводу між двома щільнішими — не більш як 5–7 %, критерій збіжності 10^{-4} за імпульсом і енергією на крок. Розрахунковий набір параметрів v_0 , Δt , Δy_1 , k_{inh} , а також конструкція сітки забезпечують як чисельну стійкість ($Co \leq 1$ у критичних зонах, y^+ у робочому діапазоні), так і фізичну адекватність моделі: швидке інгібування полум'я за 6–8 с і стійка післядія 50–60 с без використання азотних добавок і трубопроводних систем. Якщо швидкість вітру зростає до 1,5–2,0 м/с, для збереження запасу інгібування доцільно збільшувати масу заряду або коригувати висоту/кут подачі.

3.6. Рекомендації щодо практичного застосування аерозольних систем для об'єктів критичної інфраструктури

Метою даного підпункту є узагальнення результатів експериментальних та числових досліджень і формування науково обґрунтованих технічних рекомендацій щодо застосування генераторів вогнегасного аерозолі (ГВА) для підвищення рівня пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Отримані результати підтверджують доцільність використання аерозольних систем як автономних засобів швидкого припинення горіння горючих рідин на відкритих майданчиках без необхідності залучення інертних газів або складних трубопровідних систем [107].

Встановлено, що оптимальні параметри просторового розташування ГВА визначаються висотою підвісу 4,0–4,5 м, кутом подачі від 0 до 10°, масою аерозолеутворювальної суміші 2,8–3,0 кг та ефективною площею дії до 5 м². За таких умов формується стійка аерозольна хмара з рівномірним розподілом дисперсної фази в зоні гасіння, що забезпечує зниження теплового впливу на поверхню горіння та досягнення часу припинення горіння в межах 6–8 секунд. Експериментальні дослідження підтвердили, що при висоті подачі 4,5 м і вертикальному напрямку струменя забезпечується ефективне охоплення площі до 5 м² та підтримання параметрів середовища, достатніх для стійкого інгібування процесів горіння.

Для практичного впровадження систем аерозольного гасіння рекомендовано здійснювати монтаж генераторів над потенційно небезпечними ділянками, такими як трансформаторні відсіки, резервуарні зони або майданчики зберігання паливно-мастильних матеріалів [81, 117]. Доцільним є розміщення ГВА групами по дві–три одиниці на жорстких металевих опорах або фермах з можливістю автономного спрацювання — як від температурного сенсора, так і від ручного пуску. Відстань між генераторами повинна забезпечувати перекриття зон дії не менше ніж на

10–15 %, що створює суцільну зону аерозольного впливу на площі до 15 м².

Результати експериментів і моделювання засвідчують низку технічних переваг аерозольних систем порівняно з традиційними газовими або порошковими установками. До них належать відсутність потреби у трубопроводах, компресорах чи балонах, мінімальний час реакції системи (менше 1 с після активації), незалежність від зовнішніх джерел живлення, а також стійкість до низьких температур, атмосферних впливів і механічних навантажень [82]. Сформована аерозольна хмара зберігає активні вогнегасні властивості протягом 50–60 секунд, що забезпечує ефект післядії та зменшує ризик повторного займання.

Важливою характеристикою систем є їх екологічна безпечність [85]. У процесі згоряння аерозолеутворювальної суміші не утворюються озоноруйнівні компоненти, а тверді частинки осідають у вигляді хімічно стабільних сполук [86]. Це дає можливість застосовувати генератори поблизу енергетичного обладнання та резервуарів з нафтопродуктами без істотного впливу на навколишнє середовище. Дослідження показали, що ефективність формування аерозольної хмари зберігається при швидкості вітру до 1 м/с, що підтверджує можливість її застосування у відкритих умовах.

Окрім технічних та екологічних переваг, система аерозольного гасіння характеризується економічною доцільністю. Вартість монтажу та технічного обслуговування таких установок на 25–30 % нижча порівняно з традиційними газовими або спринклерними системами. Відсутність складної інженерної інфраструктури, скорочення строків введення в експлуатацію та мінімальні експлуатаційні витрати роблять аерозольні системи ефективним рішенням для модернізації протипожежного захисту на об'єктах критичної інфраструктури.

З урахуванням отриманих результатів доцільним є розроблення нормативної бази, що регламентуватиме вимоги до проектування, випробувань і експлуатації генераторів вогнегасного аерозолю для відкритого простору. Параметрами, які підлягають стандартизації, мають бути висота встановлення, характеристики подачі, площа покриття, часові параметри післядії, а також показники зниження теплового впливу в зоні горіння та вимоги до безпечної утилізації продуктів згорання.

Для забезпечення широкого впровадження доцільним є проведення додаткових досліджень щодо впливу метеорологічних умов, геометрії факела та багатофакторної взаємодії аерозольної хмари з полум'ям. Отримані результати можуть бути використані для розроблення стандартів, методичних рекомендацій та галузевих настанов з проектування автономних аерозольних систем гасіння на об'єктах підвищеної небезпеки.

Таким чином, результати досліджень підтверджують перспективність використання автономних аерозольних систем пожежогасіння як ефективного, технологічно простого, економічно доцільного та екологічно безпечного засобу протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури. Їх впровадження дозволяє знизити тепловий вплив пожежі, скоротити час реагування, забезпечити стабільність дії у складних умовах та підвищити загальний рівень безпеки стратегічно важливих об'єктів.

Висновки до розділу 3

Проведені експериментальні та числові дослідження дозволили комплексно оцінити закономірності формування аерозольної хмари у відкритому середовищі, зниження теплового впливу пожежі та процес припинення горіння горючих рідин автономними генераторами вогнегасного аерозолю. Отримані результати мають не лише наукове, а й

виражене прикладне значення для об'єктів критичної інфраструктури, де важливими є автономність, швидкодія та можливість роботи в умовах ускладненого доступу й відкритого простору, зокрема у воєнний час.

Експериментально встановлено, що аерозольна хмара, утворена при згорянні аерозолеутворювальної суміші, забезпечує істотне ослаблення променистого теплообміну та зниження густини теплового потоку. При зміні концентрації частинок у діапазоні від 5 до 35 г/м³ коефіцієнт ослаблення теплового випромінювання зростає до 70–75 %, що забезпечує зменшення теплового потоку до 1,0–1,2 кВт/м². Навіть за мінімальних концентрацій формується зона зниженого теплового впливу, яка обмежує нагрівання навколишнього середовища та сприяє стабілізації температурного поля пожежі. Визначено, що зменшення теплового підводу зумовлене сумарною дією поглинання випромінювання газовими компонентами суміші (CO₂, H₂O, N₂), розсіюванням на твердих частинках та формуванням просторової дисперсної структури хмари, яка знижує інтенсивність променистого теплообміну між полум'ям і навколишнім середовищем.

У процесі експериментів з гасіння модельних осередків типу 55В встановлено, що при подачі аерозолю з висоти 4,5 м та масі заряду 2800–2880 г забезпечується швидке й стабільне припинення горіння протягом 6–8 секунд. Формування аерозольного конуса супроводжується створенням багатозонної структури з концентраціями від 1000 г/м³ біля зрізу генератора до 97 г/м³ у зоні над поверхнею горіння. Утримання необхідних параметрів аерозольного середовища протягом 50–60 секунд після спрацювання генератора забезпечує ефект післядії — тривале інгібування та зменшення теплового підводу, що суттєво знижує ризик повторного займання. Визначено, що площа покриття аерозолем досягає 4,6 м², що відповідає ефективній зоні дії одного модуля ГВА у відкритих умовах.

Розроблене аналітичне та числове моделювання підтвердило результати натурних експериментів і дозволило відтворити динаміку формування, перемішування та розсіювання аерозольної хмари. Розрахунки показали, що значення концентрації у приосередковій зоні перевищують мінімально необхідні для припинення дифузійного полум'я більш ніж у чотири рази та зберігаються на стабільному рівні протягом 55–60 секунд. Порівняння CFD-моделі з експериментальними даними продемонструвало відповідність часу гасіння (6–8 с), динаміки зниження температури та розподілу концентрацій у контрольних точках із похибкою не більше 10–15 %. Це підтверджує адекватність побудованої моделі та можливість її використання для інженерного прогнозування параметрів подачі для об'єктів відкритого типу.

Проведені дослідження дозволили кількісно встановити основні параметри, що визначають ефективність автономного аерозольного пожежогасіння: інтенсивність подачі 140–180 г/с, середні значення концентрації в зоні дії 90–110 г/м³, тривалість утримання хмари 50–60 секунд і площу ефективного покриття до 5 м². Визначено, що оптимальними умовами подачі є висота розташування генератора 4,0–4,5 м, кут нахилу потоку 0–10° та швидкість вітру не більше 1 м/с, що забезпечує формування стійкої аерозольної хмари з параметрами, достатніми для припинення горіння у відкритому просторі та збереження ефекту післядії.

Розроблено рекомендації для практичного застосування аерозольних систем гасіння на енергетичних і промислових об'єктах. Доведено доцільність використання таких систем на відкритих майданчиках без трубопроводів і балонних установок, що зменшує вартість монтажу та обслуговування на 25–30 % порівняно з традиційними системами. Висока автономність, швидкодія (менше однієї секунди від моменту активації) та

стійкість до зовнішніх впливів роблять ці системи практичним рішенням для об'єктів критичної інфраструктури, зокрема в умовах обмеженого доступу.

Окремо встановлено, що отримані параметри подачі та зафіксоване зниження теплового потоку створюють передумови для зменшення теплового впливу до рівня, безпечного для перебування людей і рятування людини, а також для підвищення ефективності дій пожежно-рятувальних підрозділів під час ліквідації пожеж на відкритих об'єктах. Цей аспект є критично важливим для об'єктів відкритого типу та зон, де можливе перебування персоналу.

Підтверджено екологічну безпечність досліджуваних складів: продукти згоряння аерозолеутворювальної суміші не містять озоноруйнівних речовин і не спричиняють істотного вторинного забруднення навколишнього середовища, що дозволяє застосовувати системи поблизу енергетичного обладнання, резервуарів з ПММ і відкритих технологічних майданчиків.

Отримані результати стали підґрунтям для формування технічних рекомендацій та пропозицій щодо розроблення нормативної бази з проектування, випробувань і експлуатації автономних генераторів вогнегасного аерозолу у відкритому просторі. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення впливу атмосферних факторів, геометрії факела та багатфакторної взаємодії аерозольної хмари з полум'ям з метою підвищення точності розрахункових моделей і практичної надійності застосування. Окремого значення набуває також удосконалення нормативно-технічного забезпечення випробувань та оцінювання якості вогнегасних систем і засобів [113].

Таким чином, результати розділу 3 комплексно підтверджують ефективність, надійність і практичну придатність автономних аерозольних

систем пожежогасіння для застосування на об'єктах критичної інфраструктури. Вони демонструють здатність забезпечувати швидке й стабільне припинення горіння, істотне зниження теплового впливу, технологічну простоту, екологічну безпечність та економічну доцільність впровадження відповідно до сучасних вимог пожежної безпеки.

Розділ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальні положення та концепція впровадження

Пожежі горючих рідин на відкритих майданчиках характеризуються інтенсивним тепловиділенням, швидким розвитком полум'я та значним радіаційним впливом на навколишнє середовище [76]. Відсутність замкненого об'єму, дія вітру та турбулентних потоків повітря сприяють активному перенесенню тепла, що ускладнює локалізацію осередку горіння. У таких умовах теплове навантаження швидко поширюється на технологічне обладнання, металеві конструкції та суміжні ділянки, створюючи ризик вторинних займань і розвитку аварійної ситуації.

Особливої актуальності це набуває для об'єктів критичної інфраструктури, де пожежі можуть призвести не лише до матеріальних збитків, а й до загрози життю персоналу та рятувальників. Інтенсивне теплове випромінювання обмежує можливість наближення до осередку пожежі, ускладнює проведення евакуаційних заходів і скорочує часовий резерв для прийняття рішень. Саме тому контроль теплового режиму є ключовим фактором підвищення рівня безпеки в умовах відкритого горіння.

Як показано у розділах 1–3, традиційні водяні, пінні та порошкові засоби пожежогасіння в умовах відкритого простору, особливо за наявності вітру, не завжди забезпечують стабільне та прогнозоване зниження температури й густини теплового потоку [106]. Частина вогнегасної речовини втрачається через розсіювання, а ефект впливу на теплове випромінювання є недостатнім для швидкої локалізації пожежі [104]. Це обумовлює доцільність застосування аерозольної технології як засобу оперативного впливу саме на теплову складову процесу горіння.

Проведені дослідження підтвердили, що подача вогнегасного аерозолю в зону горіння сприяє зниженню температури полум'я, зменшенню інтенсивності випаровування горючої рідини та зниженню густини теплового потоку до її поверхні. Формування дисперсної аерозольної зони створює умови для стабілізації теплового режиму та поступового припинення горіння. Важливо, що саме зниження теплового впливу дозволяє зменшити ризик теплових уражень персоналу та створити безпечніші умови для роботи пожежно-рятувальних підрозділів.

Таким чином, практична реалізація результатів дослідження спрямована насамперед на контроль теплового впливу в зоні пожежі, скорочення часу її локалізації та підвищення рівня захисту людей.

Метою впровадження системи є забезпечення швидкої локалізації пожежі шляхом формування в зоні горіння середовища зі зниженим тепловим навантаженням та обмеженою інтенсивністю випаровування. Основні практичні завдання полягають у:

- зменшенні теплового навантаження на конструкції та особовий склад;
- підтриманні стабільних параметрів аерозольної фази протягом часу гасіння;
- скороченні тривалості процесу та витрат вогнегасної речовини;

– забезпеченні працездатності системи за впливу вітру та турбулентних потоків.

Зниження теплового навантаження пов'язане передусім зі зменшенням інтенсивності теплового випромінювання та температури полум'я. Для оцінювання теплового потоку використовується залежність:

$$q = \varepsilon \sigma T^4,$$

де ε – ступінь чорноти поверхні, σ – стала Стефана–Больцмана, T – абсолютна температура полум'я. Зниження T унаслідок дії аерозолу прямо пропорційно зменшує тепловий вплив на критичні елементи об'єкта, що підвищує їх термостійкість і зменшує ризики теплових руйнувань.

Ефективність системи також залежить від підтримання достатнього вмісту аерозольної фази в зоні горіння. Динаміка її зміни описується експоненційною залежністю:

$$C(t) = C_0 e^{-kt},$$

де C_0 – початкова концентрація, k – коефіцієнт розсіювання. Вибір оптимальних параметрів генерації дає змогу мінімізувати швидкість спаду концентрації, що забезпечує тривале збереження теплоізоляційних властивостей аерозолу.

Експериментально встановлено, що ефективність дії системи значною мірою визначається параметрами генераторів — швидкістю викиду, кутом розкриття факела, тривалістю подачі та масою аерозолу. Саме ці характеристики впливають на просторовий розподіл дисперсної фази, стабільність її перебування в зоні горіння та здатність забезпечувати прогнозоване зниження теплового впливу.

Для відкритих об'єктів це має особливе значення, оскільки вітер і турбулентність можуть змінювати напрямок та інтенсивність перенесення аерозолі. Неврахування цих факторів призводить до нерівномірного насичення зони гасіння і, як наслідок, до зниження ефективності впливу на тепловий режим пожежі. Тому вибір параметрів генерації повинен здійснюватися з урахуванням реальних умов експлуатації об'єкта.

Структурно система включає засоби виявлення пожежі, блок керування та генератори аерозолі, що працюють як єдиний інтегрований комплекс. Узагальнену функціональну схему наведено на рисунку 4.1.

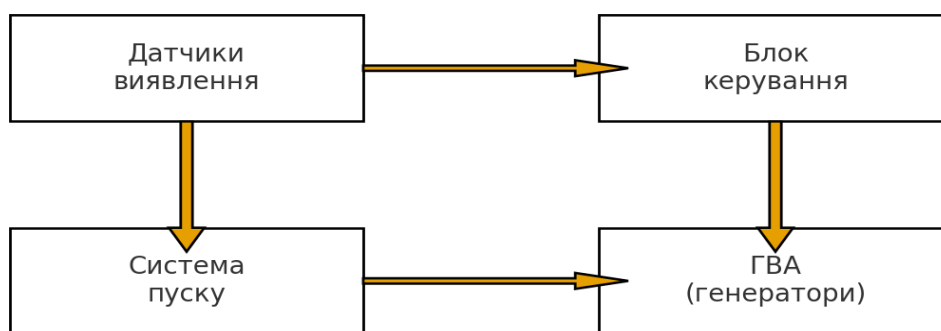


Рис .4.1 - Функціональна схема інтегрованої аерозольної системи пожежогасіння

Система функціонує за послідовним принципом: виявлення загоряння → обробка сигналу → прийняття рішення → запуск генераторів → подача аерозолі в зону пожежі.

Такий алгоритм дозволяє мінімізувати час реагування та забезпечити оперативний вплив на осередок займання ще до досягнення критичних температур.

До основних вимог впровадження належать: забезпечення достатнього рівня аерозольного насичення в зоні гасіння, перекриття потенційно небезпечної площі без утворення ділянок зі зниженим впливом, надійність спрацювання пускових механізмів та регламентоване технічне обслуговування. Не менш важливою є регулярна перевірка працездатності системи, оскільки саме її готовність у критичний момент визначає ефективність реагування.

Дотримання цих умов забезпечує стабільне зниження теплового навантаження, скорочення часу локалізації пожежі та підвищення рівня безпеки особового складу й персоналу об'єкта.

Отже, отримані результати формують практичну основу для впровадження аерозольної технології як керованого інструменту контролю теплового режиму пожеж горючих рідин у відкритому середовищі, з орієнтацією на підвищення ефективності гасіння та збереження життя людей.

4.2 Технологічна схема інтеграції аерозольної системи пожежогасіння

Технологічна схема інтеграції аерозольної системи пожежогасіння для об'єктів зберігання горючих рідин (резервуарні парки, нафтобази) спрямована на оперативне зниження теплового впливу в зоні горіння та пригнічення випаровування горючих фракцій [79]. Значні площі відкритої поверхні рідини, інтенсивне випромінювання, дія вітру й турбулентних потоків вимагають узгодження параметрів генерації аерозолі з геометрією резервуарів і наявною протипожежною інфраструктурою [77].

Логіка роботи системи є послідовною: виявлення загоряння → обробка сигналу → запуск → подача аерозолі в зону пожежі.

Виявлення здійснюється датчиками полум'я, температури та/або диму. Сигнали надходять до блока керування, де аналізуються та перевіряються для уникнення хибного спрацювання. Після підтвердження пожежі активується необхідна кількість генераторів — одночасно або поетапно залежно від площі об'єкта.

Генератори забезпечують подачу дисперсної фази з параметрами, достатніми для рівномірного покриття зони горіння: кут розкриття, швидкість викиду, тривалість генерації, маса аерозолу та дисперсність частинок. Ключовим є досягнення мінімально необхідного рівня аерозольного насичення, який забезпечує зменшення теплового випромінювання та уповільнення випаровування. Це визначається кількістю модулів, схемою їх розміщення та режимом запуску.

Подача аерозолу умовно поділяється на три фази:

- початкова — формування факела та первинної аерозольної зони;
- основна — поширення й ущільнення дисперсної фази над поверхнею рідини;
- завершальна — підтримання зниженого теплового впливу після згасання полум'я.

Тривалість дії залежить від маси поданого аерозолу, дисперсності частинок і швидкості їх розсіювання у відкритому середовищі.

Проектування системи для резервуарного парку включає аналіз геометрії об'єкта, визначення можливих сценаріїв пожежі, розрахунок кількості генераторів і зон їх покриття, побудову схеми взаємодії датчиків і пускових контурів, а також монтаж і пусконаладження. При цьому враховуються вимоги надійності пускових ланцюгів та захисту комунікацій від зовнішніх впливів.

Для систематизації параметрів генераторів, що застосовуються під час гасіння резервуарів з горючими рідинами, наведено узагальнену таблицю технічних характеристик.

Таблиця 4.1

Технічні параметри генераторів вогнегасного аерозолю, застосовуваних для гасіння резервуарів з горючими рідинами

Параметр	Позначення	Типове значення	Призначення
Початкова швидкість факела	v_0	28–35 м/с	Забезпечує перенесення аерозолю на необхідну відстань
Кут розкриття факела	θ	60–90°	Визначає ширину зони первинного покриття
Тривалість генерації	τ	8–12 с	Визначає час формування аерозольної хмари
Маса аерозолю	m	400–900 г	Забезпечує необхідну концентрацію в зоні гасіння
Дисперсність частинок	d	1–5 мкм	Впливає на стабільність екранувального шару
Дальність перенесення	L	3–7 м	Визначає максимальний розмір резервуара для одного модуля

Раціональною для резервуарів є кільцева схема розміщення генераторів із перекриттям зон подачі, що мінімізує ризик локальних ділянок з недостатнім аерозольним впливом.

Комплект технічної документації має включати схеми підключення датчиків і пускових пристроїв, креслення розміщення модулів, інструкції з монтажу та регламенти обслуговування. Під час інтеграції в існуючі системи враховуються конструктивні особливості об'єкта та взаємодія з іншими засобами протипожежного захисту.

Отже, технологічна схема інтеграції визначає порядок проектування та роботи системи й забезпечує стабільне зниження теплового впливу під час гасіння пожеж горючих рідин у складних умовах відкритих резервуарних об'єктів.

4.3 Верифікація результатів та дослідно-промислове випробування

Верифікація теоретичних положень і результатів, отриманих у розділах 1–3, проводилася з метою підтвердження працездатності та ефективності аерозольної системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації [95, 113]. Порівнювалися розрахункові параметри (розподіл аерозольної фази, температурні та радіаційні характеристики) з даними лабораторних і дослідно-промислових випробувань [99].

На першому етапі виконано лабораторні дослідження на стендах і макетах, що відтворювали процес горіння горючих рідин та роботу генераторів аерозолю. Вимірювали час формування аерозольної зони, динаміку зниження температури в приповерхневій області, зміну густини теплового потоку та параметри аерозольної фази.

Другий етап передбачав дослідно-промислові випробування на відкритому майданчику, який моделював умови резервуарних об'єктів. Використовувалися зразки горючої рідини з заданими характеристиками та система датчиків, розміщених на різних відстанях від осередку. Протягом усього циклу фіксувалися температура повітря, швидкість і напрямок вітру, вологість та атмосферний тиск, що дозволило врахувати вплив зовнішніх факторів.

Аналіз розбіжностей між розрахунковими та експериментальними даними здійснювався за температурою, інтенсивністю теплового випромінювання та часовими характеристиками формування аерозольної зони. Найбільші відхилення спостерігалися на початковій стадії пожежі та за умов активної турбулентності повітря. Похибки прогнозування концентрації були пов'язані переважно з локальними змінами швидкості повітряних потоків. Водночас ці відмінності не впливали на кінцевий результат — припинення горіння.

Експериментально підтверджено, що після подачі аерозолі температура в приповерхневій зоні знижується швидше, ніж у контрольних дослідах, а густина теплового потоку істотно зменшується. Це супроводжується уповільненням випаровування, що знижує ймовірність повторного займання після згасання полум'я.

Статистичну обробку вимірювань температури, густини теплового потоку та концентрації аерозолі виконано із визначенням середніх значень, вибірових відхилень і довірчих інтервалів. Для ілюстрації підходу наведено умовні експериментальні дані та результати їх обробки (табл. 4.2–4.3).

Таблиця 4.2

Умовні вихідні експериментальні дані для статистичної оцінки параметрів процесу гасіння

№ досліджу	Температура у зоні гасіння, °С	Густина теплового потоку, кВт/м ²	Концентрація аерозолі, г/м ³
1	340	11,5	102
2	330	10,8	98
3	335	11,2	100
4	325	10,9	101
5	338	11,1	99
6	332	10,7	103
7	329	11,0	97
8	336	10,6	100
9	331	11,3	102
10	334	11,0	99

Таблиця 4.3

Результати статистичної обробки умовних експериментальних даних

Параметр	Кількість вимірювань, n	Середнє значення (\bar{x})	Вибіркове СКВ s	Довірча похибка Δ	Довірчий інтервал ($[\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta]$)	Відносна похибка, %
Температура у зоні гасіння, °С	10	333,0	4,5	3,2	329,8 – 336,2	1,0
Густина теплового	10	11,01	0,28	0,20	10,81 – 11,21	1,8

поток, кВт/м ²						
Концентрація аерозоллю, г/м ³	10	100,1	1,9	1,4	98,7 – 101,5	1,4

Отримані результати показують, що відносні похибки не перевищують 2 %, а довірчі інтервали є достатньо вузькими, що свідчить про відтворюваність вимірювань і стабільність процесу гасіння.

Узагальнення лабораторних і дослідно-промислових випробувань підтверджує практичну придатність аерозольної системи для застосування на об'єктах зберігання горючих рідин. Виявлені відхилення пояснюються впливом метеорологічних факторів і не виходять за межі допустимих значень для відкритих умов.

4.4 Техніко-економічна оцінка впровадження аерозольної системи пожежогасіння

Техніко-економічна оцінка впровадження аерозольної системи пожежогасіння для резервуарних парків і промислових об'єктів виконана з урахуванням капітальних вкладень, експлуатаційних витрат та очікуваного економічного ефекту від скорочення часу гасіння й зменшення можливих збитків. Для об'єктивності результати порівнювалися з показниками традиційних пінних, водяних і порошкових систем [106, 113].

До складу капітальних витрат входять генератори вогнегасного аерозоллю, система керування та запуску, датчики виявлення пожежі, кабельні мережі та монтажні роботи. Орієнтовні витрати для об'єктів різного масштабу наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Орієнтовні капітальні витрати на впровадження аерозольної системи
пожежогасіння

Масштаб об'єкта	Кількість ГВА	Вартість обладнання, тис. грн	Монтаж та налаштування, тис. грн	Загальна сума, тис. грн
Малий	12–18	480–620	110–150	590–770
Середній	24–36	920–1350	220–310	1140–1660
Великий	48–72	1850–2750	430–610	2280–3360

Експлуатаційні витрати аерозольної системи є суттєво нижчими порівняно з пінними та порошковими установками. Генератори не потребують регулярного поповнення реагентів, не містять насосних агрегатів і не вимагають складного сервісного обслуговування. Орієнтовні показники експлуатаційних витрат наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Порівняння експлуатаційних витрат різних систем пожежогасіння

Тип системи	Річні витрати на обслуговування, тис. грн	Потреба у реагентах	Вартість оновлення обладнання	Загальна оцінка витрат
Пінна	180–260	Висока	Середня–висока	Висока
Водяна	120–170	Середня	Середня	Середня
Порошкова	150–230	Середня–висока	Висока	Висока
Аерозольна	40–70	Мінімальна	Низька	Низька

Для наочності річні витрати подано у вигляді графіка (рис. 4.2), який демонструє мінімальне ресурсне навантаження аерозольної системи серед розглянутих варіантів.

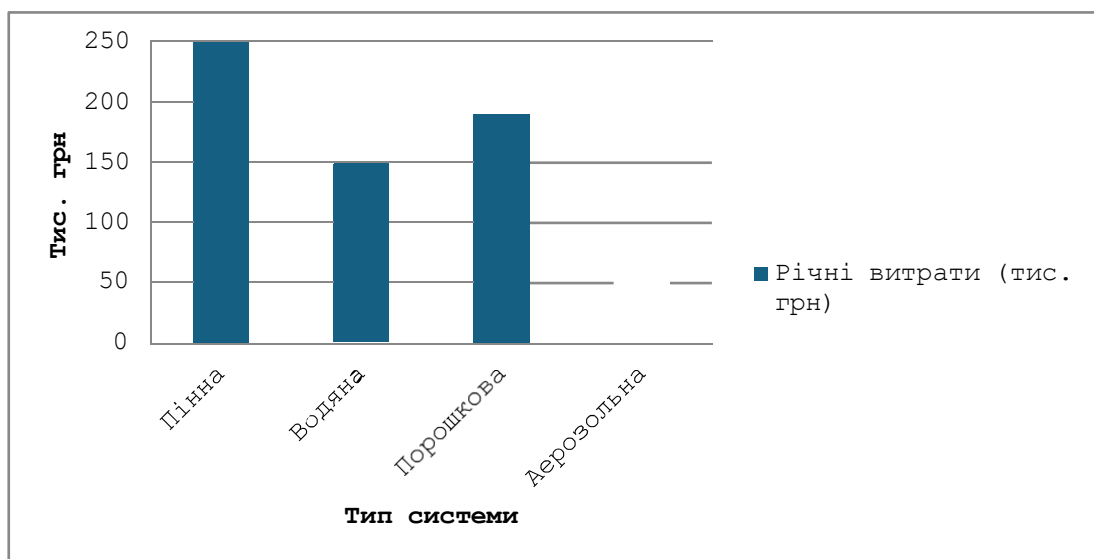


Рис.4.2 - Порівняння річних експлуатаційних витрат різних систем пожежогасіння

Строк окупності визначали за співвідношенням: $\text{строк окупності} = (\text{додаткові капітальні витрати}) / (\text{річна економія експлуатаційних витрат})$.

Для резервуарного парку середнього масштабу (перехід від пінної системи з витратами 220 тис. грн/рік до аерозольної з витратами 55 тис. грн/рік за умови модернізації вартістю 600 тис. грн) строк окупності становить близько 3,6 року. Отримане значення відповідає типовому діапазону 2,5–4 роки залежно від масштабу об'єкта та режиму його експлуатації.

Таким чином, результати розрахунків свідчать про економічну доцільність впровадження аерозольної системи. Вона забезпечує прийнятний рівень капітальних вкладень і значно нижчі експлуатаційні витрати порівняно з традиційними рішеннями, одночасно підвищуючи ефективність локалізації пожеж горючих рідин.

4.5. Екологічна та санітарно-гігієнічна оцінка безпечності

Оцінка екологічної та санітарно-гігієнічної безпечності є невід'ємною складовою обґрунтування практичного застосування

аерозольної системи пожежогасіння на промислових об'єктах, особливо тих, що належать до критичної інфраструктури. У сучасних умовах питання ефективності гасіння нерозривно пов'язане з питанням безпеки людей та мінімізації негативного впливу на довкілля. Технологічне рішення, яке дозволяє знизити теплове навантаження під час пожежі, має одночасно відповідати вимогам екологічної відповідальності та санітарних норм.

Під час роботи генераторів утворюється дрібнодисперсна аерозольна фаза, що складається переважно із солей лужних металів, оксидів, нейтралізованих продуктів згоряння та інертних газів. У її складі відсутні хлорфторвуглеводні, фторвмісні поверхнево-активні речовини та інші стійкі токсичні сполуки, які можуть накопичуватися у навколишньому середовищі [85]. Це принципово відрізняє аерозольну технологію від ряду традиційних пінних систем, де використання синтетичних компонентів може супроводжуватися тривалим забрудненням ґрунтів або водних об'єктів.

Проведений аналіз показує, що застосування аерозоллю не призводить до утворення довготривалих токсичних речовин або компонентів, здатних до біоаккумуляції. Після припинення генерації дисперсна фаза поступово розсіюється в повітрі та осідає на поверхнях. Подальші процеси трансформації відбуваються під впливом атмосферної вологи та природних факторів середовища. У відкритому просторі цей процес відбувається достатньо швидко, що знижує ризик накопичення залишкових речовин.

Потенційний вплив на ґрунти та водні об'єкти є обмеженим і, як правило, значно меншим порівняно з пінними системами. Відсутність великого об'єму рідких вогнегасних засобів мінімізує ризик стікання реагентів у дренажні системи або природні водойми. Таким чином, у

випадку застосування аерозольної системи екологічне навантаження після ліквідації пожежі є контрольованим і не створює додаткових загроз для території об'єкта.

З санітарно-гігієнічної точки зору важливо, що в умовах відкритого простору концентрація аерозольної фази швидко знижується до рівнів, безпечних для персоналу. За дотримання регламентів запуску та організації робіт гранично допустимі концентрації у повітрі не перевищуються. Це особливо важливо для ситуацій, коли пожежогасіння здійснюється поблизу робочих місць або в умовах часткової евакуації персоналу.

У закритих або напівзакритих приміщеннях після спрацювання системи доцільно забезпечувати природну чи примусову вентиляцію. Це дозволяє прискорити осадження частинок і зменшити тимчасове задимлення, забезпечуючи комфортніші та безпечніші умови для подальшої роботи.

Порівняно з порошковими вогнегасними засобами аерозоль не містить абразивних компонентів, які можуть пошкоджувати обладнання або створювати додаткові ризики для органів дихання. Рівень подразнювальної дії на слизові оболонки та дихальні шляхи є нижчим, а короточасне перебування персоналу в зоні його дії за умови дотримання стандартних заходів безпеки не призводить до негативних наслідків. Це має особливе значення для пожежно-рятувальних підрозділів, які працюють у безпосередній близькості до осередку горіння.

Аерозольні генератори відповідають вимогам національних і міжнародних нормативних документів у сфері пожежної та екологічної безпеки, зокрема чинним стандартам ДСТУ, EN та рекомендаціям NFPA щодо допустимого впливу на довкілля і персонал. Після спрацювання системи спеціальні процедури поводження з небезпечними відходами, як

правило, не потрібні. Очищення території може виконуватися стандартними механічними способами без застосування складних технологій утилізації.

З урахуванням зазначеного можна зробити висновок, що аерозольна система пожежогасіння поєднує здатність ефективно знижувати теплове навантаження під час пожежі з прийнятним рівнем екологічної та санітарної безпечності. Це дозволяє розглядати її як технологічно виважене рішення для промислових об'єктів, де одночасно важливими є захист людей, збереження інфраструктури та мінімізація впливу на довкілля.

4.6. Рекомендації щодо впровадження результатів у практику

Отримані у дисертаційному дослідженні результати мають не лише технічне, а й виразне соціальне значення. В умовах зростання ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, зокрема в період воєнних загроз, питання швидкої локалізації пожеж горючих рідин безпосередньо пов'язане із збереженням життя людей та мінімізацією масштабів наслідків надзвичайних ситуацій.

Запропонована аерозольна система пожежогасіння орієнтована передусім на оперативне зниження теплового впливу в зоні горіння. Саме контроль теплового потоку дозволяє:

- зменшити ризик теплових уражень персоналу;
- забезпечити безпечні умови для роботи пожежно-рятувальних підрозділів;
- запобігти руйнуванню технологічних конструкцій і подальшому розвитку аварії;
- скоротити час локалізації пожежі на початковій стадії.

У практичному вимірі це означає підвищення ймовірності збереження життя працівників об'єкта та рятувальників, які змушені працювати в умовах інтенсивного теплового випромінювання. Зниження температурного навантаження створює додатковий часовий ресурс для евакуації людей і прийняття зважених управлінських рішень у критичній ситуації.

Для резервуарних парків, складів паливно-мастильних матеріалів, енергетичних вузлів і промислових майданчиків доцільним є впровадження модульної конфігурації системи. Такий підхід дозволяє адаптувати її до конкретної геометрії об'єкта та розмістити генератори таким чином, щоб забезпечити рівномірний вплив у зоні можливого займання. При цьому ключовим є своєчасне виявлення пожежі — ефективність гасіння на ранніх стадіях безпосередньо впливає на рівень ризику для людей.

Особливу увагу слід приділяти інтеграції системи з автоматизованими засобами моніторингу та керування. Дистанційний контроль і можливість швидкого запуску дозволяють мінімізувати перебування персоналу в небезпечній зоні [102, 115]. Це є принципово важливим для об'єктів із підвищеним рівнем загрози, де людський фактор і час реагування мають вирішальне значення.

Експлуатація системи повинна супроводжуватися регулярним технічним контролем, навчанням персоналу та відпрацюванням алгоритмів дій у разі пожежі. Належна підготовка знижує ризик помилок і підвищує готовність об'єкта до реагування в екстремальних умовах.

Перспективним напрямом є використання отриманих у роботі параметрів аерозольного струменя та коефіцієнтів зниження теплового потоку для розроблення мобільних або автономних засобів пожежогасіння [101]. Такі рішення можуть бути застосовані у складних та динамічних

умовах, де традиційні методи виявляються недостатньо ефективними. У цьому контексті аерозольна технологія виступає не лише інструментом гасіння, а й засобом активного захисту людей у зоні потенційної небезпеки.

Отже, впровадження аерозольної системи пожежогасіння слід розглядати як комплексне рішення, спрямоване на підвищення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, зменшення теплового впливу під час пожежі та створення умов для збереження життя людей. Саме цей аспект надає отриманим результатам особливої практичної значущості та визначає перспективність подальшого розвитку аерозольних технологій у сфері пожежної безпеки.

Висновки до розділу 4

Практична реалізація запропонованих науково-технічних рішень підтвердила можливість ефективного застосування аерозольної технології для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі. Отримані результати дозволили сформулювати цілісний підхід до використання аерозольних систем, орієнтований насамперед на оперативне зниження теплового навантаження в зоні горіння, обмеження поширення пожежі та підвищення рівня безпеки персоналу й пожежно-рятувальних підрозділів.

Розроблена технологічна схема інтеграції аерозольної системи пожежогасіння забезпечує її сумісність із наявними засобами протипожежного захисту об'єктів зберігання та транспортування горючих рідин. Встановлено, що формування аерозольної хмари сприяє зниженню інтенсивності теплового випромінювання, зменшенню температури в зоні горіння та створенню умов для більш ефективної локалізації пожежі навіть за наявності несприятливих зовнішніх факторів.

Результати верифікації та дослідно-промислових випробувань підтвердили достовірність отриманих теоретичних і експериментальних даних. Виявлено, що застосування аерозольної технології забезпечує стабільне зниження теплового впливу на навколишні конструкції, скорочує час локалізації осередку горіння та зменшує ймовірність розвитку вторинних аварійних процесів.

Проведена техніко-економічна оцінка засвідчила доцільність впровадження запропонованої системи на об'єктах критичної інфраструктури. Її використання дозволяє зменшити можливі матеріальні збитки від пожеж, скоротити витрати на ліквідацію наслідків надзвичайних ситуацій та підвищити загальну ефективність функціонування систем протипожежного захисту. Результати екологічної та санітарно-гігієнічної оцінки підтвердили безпечність запропонованого рішення за умови дотримання встановлених режимів експлуатації.

Отримані результати свідчать про практичну придатність аерозольної технології для захисту об'єктів критичної інфраструктури та створюють передумови для її подальшого впровадження у системи пожежної безпеки. Застосування запропонованих рішень сприятиме зниженню ризиків для людей, підвищенню рівня захищеності технологічних об'єктів і мінімізації наслідків пожеж горючих рідин в умовах відкритого простору.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-практичну задачу підвищення ефективності гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі шляхом комплексного теоретичного аналізу, математичного моделювання, експериментального дослідження та розроблення практичних рішень щодо застосування вогнегасних аерозолів. Основну увагу зосереджено на керованому зниженні теплового впливу в зоні пожежі та підвищенні рівня безпеки персоналу в умовах відкритого середовища.

1. Виконано аналіз сучасного стану проблеми гасіння пожеж горючих рідин. Узагальнено переваги та обмеження традиційних водяних, пінних і порошкових засобів у відкритих умовах. Показано, що за наявності вітру та інтенсивного теплового випромінювання їх ефективність знижується через складність стабільного впливу на тепловий режим осередку. Обґрунтовано місце аерозольних технологій як альтернативного або допоміжного інструмента в системі протипожежного захисту відкритих об'єктів.

2. Теоретично обґрунтовано доцільність використання вогнегасних аерозолів для гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі. Розкрито фізико-хімічні механізми формування аерозольної хмари та її взаємодії з полум'ям. Показано, що вплив аерозолу пов'язаний із комплексним зниженням температури полум'я, інтенсивності випаровування та густини теплового потоку, що створює умови для припинення горіння.

3. Розроблено фізико-математичну модель процесу гасіння, яка описує перенесення аерозолу, тепло- і масообмін у системі «джерело полум'я – аерозольна хмара – навколишнє середовище» для характерних

умов відкритого простору. Модель враховує геометрію осередку, вітрове навантаження, зміну параметрів дисперсної фази та динаміку теплового поля. Проведено чисельні дослідження, що дозволили визначити раціональні параметри подачі аерозолію для стабільного припинення горіння.

4. Визначено основні чинники, що впливають на ефективність аерозольного гасіння у відкритому середовищі: параметри формування аерозольної хмари, дисперсний склад частинок, швидкість і напрям подачі, конфігурація осередку горіння та метеорологічні умови. Кількісно оцінено їхній внесок у зміну теплового впливу та тривалість гасіння. Показано, що ключовим фактором є узгодження режиму подачі з реальними умовами експлуатації.

5. Розроблено експериментальну методику та спеціалізовану установку для дослідження параметрів зниження теплового впливу аерозольною хмарою. Забезпечено можливість варіювання висоти, напрямку та інтенсивності подачі, а також реєстрації температури й густини теплового потоку. Це створило основу для об'єктивної перевірки теоретичних положень.

6. Виконано серію лабораторних і натурних експериментів. Встановлено, що застосування аерозолію дозволяє зменшити густину теплового випромінювання більш ніж на 30 % у межах оптимальних режимів подачі. Підтверджено стабілізацію температурного поля та скорочення часу гасіння порівняно з контрольними дослідженнями. Отримані результати узгоджуються з прогнозами моделі та підтверджують її адекватність.

7. Розроблено технологічну схему інтеграції аерозольних систем у комплекси протипожежного захисту резервуарних парків, енергетичних підстанцій та інших відкритих об'єктів. Схема базується на принципах

модульності, автономності та мінімального втручання в існуючу інфраструктуру. Обґрунтовано можливість використання систем як основного або резервного засобу гасіння залежно від категорії об'єкта.

8. Виконано техніко-економічну оцінку впровадження аерозольної технології. Показано, що за рахунок нижчих експлуатаційних витрат та скорочення часу ліквідації пожеж строк окупності є конкурентним порівняно з традиційними системами. Додатковим фактором ефективності є зменшення потенційних збитків і ризиків для персоналу.

9. Сформульовано рекомендації щодо впровадження результатів дослідження на об'єктах критичної інфраструктури в умовах мирного та воєнного часу. Особливий акцент зроблено на ранньому зниженні теплового впливу як факторі, що підвищує безпеку людей, створює умови для евакуації та зменшує ризик розвитку масштабних аварій.

Узагальнення результатів дослідження свідчить про досягнення поставленої мети — підвищення ефективності гасіння пожеж горючих рідин на відкритому просторі шляхом науково обґрунтованого застосування вогнегасних аерозолів з урахуванням їх впливу на теплове поле пожежі та особливостей функціонування на об'єктах критичної інфраструктури.

У ході роботи послідовно розкрито проблему недостатньої результативності традиційних засобів пожежогасіння в умовах відкритого середовища. Показано, що визначальним фактором у таких умовах є не лише хімічне гальмування реакцій горіння, а передусім здатність системи оперативно впливати на тепловий режим осередку. Саме контроль теплового навантаження дозволяє стабілізувати процес, зменшити швидкість випаровування горючої рідини та створити умови для припинення полум'я.

Розроблена модель та експериментальна методика забезпечили можливість кількісно оцінити зміну теплового потоку під дією аерозольної хмари та встановити параметри, за яких досягається найбільша ефективність гасіння. Отримані результати підтвердили, що при раціональному виборі швидкості, напрямку та висоти подачі аерозолію забезпечується суттєве зниження теплового випромінювання і скорочення часу ліквідації пожежі.

Важливим підсумком роботи є доведення того, що ефективність аерозольних систем у відкритому просторі визначається комплексом факторів: геометрією осередку, метеорологічними умовами, параметрами формування аерозольної хмари та організацією її подачі. Це дозволило сформуванати інженерні критерії вибору режимів роботи генераторів і закласти основу для їх практичного впровадження.

Отримані результати мають прикладне значення для проєктування систем захисту резервуарних парків, енергетичних підстанцій, логістичних центрів та інших об'єктів критичної інфраструктури. У сучасних умовах, коли об'єкти можуть зазнавати руйнувань або функціонувати при обмеженому доступі пожежно-рятувальної техніки, автономність та швидкодія системи набувають особливої ваги. Зниження теплового впливу на ранній стадії розвитку пожежі створює додатковий часовий ресурс для евакуації людей та зменшує ризик ланцюгового пошкодження технологічних вузлів.

Техніко-економічна оцінка підтвердила доцільність застосування аерозольної технології з урахуванням витрат на створення та експлуатацію систем, а також потенційного зменшення збитків від пожеж і ризиків для персоналу. Це свідчить про можливість інтеграції розроблених рішень у практику протипожежного захисту без надмірного фінансового навантаження на об'єкти.

Таким чином, виконане дослідження формує цілісну науково-практичну основу для застосування вогнегасних аерозолів у відкритому середовищі, поєднуючи теоретичне моделювання, експериментальне підтвердження та інженерні рекомендації. Отримані результати розширюють сучасні підходи до гасіння пожеж горючих рідин і сприяють підвищенню рівня пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури в умовах мирного та воєнного часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Abramov Y. A., Basmanov O. E., Mikhayluk A. A., Salamov J. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. *Naukovyi Visnyk NHU*. 2018. Vol. 2. P. 95–100. DOI: 10.29202/nvngu/2018-2/12.
2. Tian C., Zhao J., Yang J., Zhang J., Yang R. Preparation and characterization of fire-extinguishing efficiency of novel gel-protein foam for liquid pool fires. *Energy*. 2023. Vol. 263. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125949.
3. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37, Issue 1. P. 63–77.
4. Falkenstein-Smith R., Sung K., Chen J., Hamins A. Chemical structure of medium-scale liquid pool fires. *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 120. Article 103099. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.103099.
5. Fei T., Lei D., Qing H., Zhang J. Mass burning rate and merging behaviour of double liquid pool fires under cross winds. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2023. Vol. 39, Issue 3. P. 4041–4052. DOI: 10.1016/j.proci.2022.09.032.
6. Feng Z., Zhang M., Tang X., Yang J., Zhang J. Modeling failure time of atmospheric tanks with safety barriers under multiple pool fires. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2025. Vol. 96. Article 105619. DOI: 10.1016/j.jlp.2025.105619.
7. Wang J., Chen X., Zhang Y., Zhang J., Chen Q., Liu S. The impact of initial fuel depth on the combustion efficiency of pool fire in an enclosed compartment: a study based on zone model theory. *Fire Safety Journal*. 2025. Vol. 152. Article 104316. DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104316.

8. Zhang J., Yang J., Huang Z., Kong R., Zhang J. Development of an environmentally friendly gel foam and assessment of its thermal stability and fire suppression properties in liquid pool fires. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. Vol. 692. Article 133990. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133990.

9. Klymas R., Nizhnyk V., Nekora O., Nekora V., Stylyk I. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation. *The Scientific Heritage*. 2021. Vol. 1, No. 79. P. 36–44.

10. van Gelderen L., Rojas Alva U., Mindykowski P., Jomaas G. Thermal properties and burning efficiencies of crude oils and refined fuel oil. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2017. P. 985–1005. DOI: 10.7901/2169-3358-2017.1.985.

11. Li M., Zhang C., Wang C., Li Z., Wang B. Ignition behavior and critical distance of flammable liquids by radiant heat flux from adjacent pool fire. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Vol. 168. Article 107043. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107043.

12. Saravanan S. M., Mangarjuna Rao P., Raghupathy S. Analysis of liquid sodium spills spreading on floor surface pertaining to sodium pool fire events in SFR cells. *Nuclear Engineering and Design*. 2020. Vol. 363. Article 110614. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110614.

13. Muthu S., Mangarjuna P., Raghupathy S. Analysis of liquid sodium spills spreading on floor surface pertaining to sodium pool fire events in SFR cells. *Nuclear Engineering and Design*. 2020. Vol. 363.

14. Robane N. S. A., Chong Vui San M., Md Said M. S., Mohd Tohir M. Z. Parametric investigation of acetone liquid pool fire experiments on fire characteristics. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 194. P. 604–618. DOI: 10.1016/j.psep.2024.11.132.

15. Richard J., Garo J. P., Souil J. M., Vantelon J. P., Lemonnier D. Addition of a water mist on a small-scale liquid pool fire: effect on radiant heat transfer at the surface. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002. Vol. 29, Issue 1. P. 377–384. DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80050-5.
16. Hariharan S. B., Farmahini Farahani H., Rangwala A. S., Dowling J. L., Oran E. S., Gollner M. J. Comparison of particulate-matter emissions from liquid-fueled pool fires and fire whirls. *Combustion and Flame*. 2021. Vol. 227. P. 483–496. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.12.033.
17. Beji T., Lafdal B., Mehaddi R. Transient heating of liquids in pool fires. *Fire Safety Journal*. 2024. Vol. 142. Article 104044. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.104044.
18. Isojärvi T., Bordbar H., Hostikka S. Spectrally resolved calculation of thermal radiation penetration into liquid n-heptane in pool fires. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 127. P. 1101–1109. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.108.
19. Zyma O., Pahomov R., Dyachenko E. Analysis of emergency management methods in oil and oil-product reservoirs. In: Onyshchenko V., Mammadova G., Sivitska S., Gasimov A., eds. *Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham: Springer, 2020. Vol. 73. DOI: 10.1007/978-3-030-42939-3_34.
20. Акмен Р. Г. *Паливо, основи теорії горіння та паливні пристрої*. Харків: НТУ «ХПІ», 2010. 95 с.
21. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Герасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. *Пожежна безпека*. 2022. № 41. С. 12–19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.

22. Боровиков В. О. Одержання та застосування екологічно безпечних піноутворювачів для гасіння пожеж: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Київ, 2002. 237 арк.

23. Войтович Т. М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами: дис. ... д-ра філософії: 261 «Пожежна безпека». Львів, 2020. 216 с.

24. Гуліда Е. М., Коваль О. М. *Забезпечення пожежної безпеки та ліквідація пожеж на деревообробних підприємствах: монографія*. Львів: ПАІС, 2017. 272 с.

25. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. *Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: монографія*. Харків: НУЦЗУ, 2021. 240 с.

26. Дадашов І. Ф. Розвиток наукових основ гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Харків, 2019. 340 с.

27. Жук В. М. Регулювання витрати рідини в трубопроводах введенням у потік гідродинамічно активних додатків: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.16 / Державний ун-т «Львівська політехніка». Львів, 1999. 157 с.

28. Журбинський Д. А. Флегматизування газових горючих середовищ сумішами вогнегасних аерозолів та газових вогнегасних речовин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02 / Держ. служба України з надзв. ситуацій, Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2014. 20 с.

29. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях: автореф. дис. ... канд.

техн. наук: 21.06.02 / Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 24 с.

30. Ковальов А. І. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості вогнезахищених залізобетонних будівельних конструкцій: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Харків, 2023. 366 с.

31. Колесніков Д. В., Стась С. В., Мигаленко К. І. *Створення розпилених струменів води для автоматичних установок пожежогасіння: монографія*. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. 122 с.

32. Костенко Т. В. Розвиток наукових основ підвищення безпеки рятувальників під час ведення оперативних дій в умовах нагрівного мікроклімату: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01. Покровськ, 2018. 40 с.

33. Hulida E., Kozak Y., Vasiliev M. Дослідження межі вогнестійкості сухої стінки резервуара для зберігання нафтопродуктів. *Пожежна безпека*. 2020. № 37. С. 37–43. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.06.

34. Нуянзін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей: дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.02. Львів, 2023. 418 с.

35. Присяжнюк В. В. Підвищення ефективності гасіння пожеж з використанням переносного засобу димо- та тепловидалення: дис. ... канд. техн. наук (д-ра філософії): 21.06.02. Львів, 2023. 198 с.

36. Сировий В. В., Сенчихін Ю. М., Лісняк А. А., Дерев'янка І. Г. *Основи тактики гасіння пожеж: навч. посіб.* Харків: НУЦЗУ, 2015. 216 с.

37. Уханський Р. В. Обґрунтування ефективних умов застосування для пожежогасіння водної вогнегасної речовини на основі полімерів

гуанідинового ряду: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Київ, 2013. 22 с.

38. Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А. *Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин: навч. посіб.* Харків: НУЦЗУ, 2023. 229 с.

39. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Львів, 2016. 141 с.

40. Сидоров О. Є., Шевчук В. Г., Німич А. В., Опарін А. С. Фізичні аспекти пожежовибухонебезпеки горючого пилу. Частина 2. Автохвильові режими горіння. *Фізика аеродисперсних систем.* 2023. № 61. С. 102–115.

41. Федорчук М., Великий І., Томенко В. Дослідження аерозольних систем автоматичного пожежогасіння. В: *Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.* Черкаси, 2024. С. 232–233.

42. Дубінін Д. П. Дослідження вимог до перспективних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. *Проблеми надзвичайних ситуацій.* 2021. Вип. 33. С. 15–29. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-33-2.

43. Маховський В. О. *Поверхневі явища та дисперсні системи: конспект лекцій.* Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2018. 52 с.

44. Алексеев А. та ін. Екологічні наслідки пожеж на поверхні водою та способи зниження їх негативного впливу. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація.* 2019. Т. 3, № 2. С. 5–12.

45. Balanyuk V., Kozyar N., Kravchenko A. Підшарове гасіння спиртів бінарними сумішами вогнегасного аерозолю та CO₂. *Пожежна безпека.* 2020. № 36. С. 5–9. DOI: 10.32447/20786662.36.2020.01.

46. Гарасимюк О. І. Розвиток наукових аспектів комбінованого застосування вогнегасних аерозолів, газів та порошків: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Львів, 2016. 210 с.

47. *Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013–2016 роки: статистичний збірник аналітичних матеріалів* / за ред. В. С. Кропивницького. Київ: УкрНДІЦЗ, 2018. 100 с.

48. Боднар Д., Поліщук С., Бранко Б. *Методичні рекомендації щодо порядку дії аварійно-рятувальних формувань ДСНС під час гасіння пожеж на сонячних електростанціях*. Хмельницький, 2020. 53 с.

49. В ОГП назвали кількість енергооб'єктів, вражених ударами РФ: яка статистика по регіонах: вебсайт. URL: <https://delo.ua/energetics/v-ogp-nazvali-kilkist-energoobjektiv-vrazenix-udarami-rf-yaka-statistika-po-regionax-412112/> (дата звернення: 15.11.2025).

50. У ПРООН озвучили оцінки збитків для енергетики України від війни у 2022 році: вебсайт. URL: <https://delo.ua/energetics/u-proon-ozvucili-ocinki-zbitkiv-dlya-energetiki-ukrayini-vid-viini-u-2022-roci-414396/> (дата звернення: 18.01.2025).

51. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях: дис. ... д-ра філософії. Львів, 2022. 169 с.

52. Bartley W. H. Analysis of transformer failures. В: *International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference*. Stockholm, 2003. 14 p.

53. Zhang J., Hu Y., Qiu X. et al. A review on fire research of electric power grids of China: state-of-the-art and new insights. *Fire Technology*. 2022. DOI: 10.1007/s10694-022-01343-x.

54. Transformer protector: вебсайт. URL: <https://sergi-tp.com/solutions/transformer-protector/> (дата звернення: 03.05.2025).

55. Климась Р. В. Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. В: *Science, Education, Innovation: Topical Issues and Modern Aspects: матеріали V міжнар. наук.-практ. конф.* Tallinn, 2021. С. 574–578.

56. Sun R., Wang J., Yang X., Chen P. Experimental research on the combustion characteristics of transformer oil jet fires in oil-filled equipment under heat. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, No. 47. P. 31843–31853. DOI: 10.1021/acsomega.1c04551.

57. Amadi H. N., Izuegbunam F. I. Analysis of transformer loadings and failure rate in Onitsha electricity distribution network. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2016. Vol. 4, No. 6. P. 157–163. DOI: 10.12691/ajeee-4-6-2.

58. Lu J., Chen B. H., Liang P. et al. Experimental evaluation of protecting high-voltage electrical transformers using water mist with and without additives. *Fire Technology*. 2019. Vol. 55. P. 1671–1690. DOI: 10.1007/s10694-019-00825-9.

59. Engineered fire suppression systems: вебсайт. URL: <https://www.firetrace.com/engineered-fire-suppression-systems> (дата звернення: 05.01.2025).

60. Meenakshi R. Condensed aerosol based fire extinguishing system covering versatile applications: a review. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58. P. 327–351. DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4.

61. National Fire Protection Association. *Recommended practice for fire protection for electric generating plants and high voltage direct current converter stations*. Quincy, 2015.

62. Liu Y., Li B., Wu C., Chen B., Pan B. Effectiveness test and evaluation of transformer fire extinguishing system. *Fire Technology*. 2022. Vol. 58. P. 3167–3190. DOI: 10.1007/s10694-022-01297-0.

63. Li W. et al. Experimental study on effects of nozzle explosion damage on performance of water spray fire protection system of ultra-high voltage transformer. В: *6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*. Chongqing, 2021. P. 1200–1206. DOI: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437001.

64. Баланюк В. М. Визначення ефективності гасіння вогнегасними аерозолями горючих рідин на відкритому просторі. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 5/10 (77). DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399.

65. Кодрик А., Борисов А., Тітенко О., Іллюченко П. Особливості гасіння пожеж на об'єктах і спорудах із наявністю альтернативних джерел енергії. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2023. № 1 (15). С. 128–140. DOI: 10.33269/nvcz.2023.1(15).128-140.

66. Виноградов А. Г. Поглощение лучистого теплового потока в распылённой водяной струе.

67. Виноградов А. Г. Розсіяння теплового випромінювання сферичними краплями води. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: *Машинобудування*. 2005. № 47. С. 51–54.

68. Стилик І., Бенедюк В., Тимошенко О., Грачов А. Шляхи та проблемні питання впровадження водяних протипожежних завіс в Україні. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 2 (10). С. 22–31.

69. Balanyuk V., Kozyar N., Garasymiuk O. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 3(10). С. 4-11. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2016_3\(10\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2016_3(10)_2).

70. Balanyuk V. M. The effectiveness of open space fire extinguishing with flammable liquid fighting aerosols. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015.
71. Школьний Є. П. *Фізика атмосфери*. Одеса, 2005. 507 с.
72. Dembele J., Wen X., Sacadura J. F. Analysis of the two-flux model for predicting water spray transmittance in fire protection application. *ASME Journal of Heat Transfer*. 2000. Vol. 122, No. 1. P. 183–186.
73. Bohren C., Huffman D. *Absorption and scattering of light by small particles*. Москва: Мир, 1986. 664 с.
74. Малишев В. В., Кретов В. В., Гладка Т. М. *Технічна термодинаміка та теплопередача*. Київ: Університет «Україна», 2015. 258 с.
75. Widmann J. F., Duchez J., Yang J. C., Conny J. M., Mulholland G. W. Measurement of the optical extinction coefficient of combustion-generated aerosol. *Journal of Aerosol Science*. 2005. Vol. 36, Issue 2. P. 283–289. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.09.005.
76. Баратов А. Н., Иванов Е. Н., Корольченко А. Я. *Пожарная безопасность. Взрывобезопасность*. Москва: Химия, 1987. 269 с.
77. Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. *Пінне гасіння*. Львів: СПОЛОМ, 2007. 137 с.
78. Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Грушовінчук О. В. Експериментальні дослідження процесу взаємодії струменів повітряно-механічної піни різної кратності під час їх польоту. *Пожарна безпека*. 2018. № 32.
79. Корольов Р. А., Ковалишин В. В., Штайн Б. В. Аналіз способів гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами комбінованим способом. *ScienceRise*. 2017. № 6 (35).

80. Боровиков В. О. Вогнегасні речовини: минуле, сучасність і майбутнє. Частина II: плоди «століття технологій». URL: http://security-info.com.ua/articles/?ELEMENT_ID=775 (дата звернення: 09.10.2025).
81. НАПБ 05.035–2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Київ, 2004.
82. Бондаренко С. Н. *Сучасні системи автоматичного пожежогасіння*. Харків: НУЦЗУ, 2001. 176 с.
83. Козяр Н. М. Підвищення ефективності об'ємного пожежогасіння. *Пожежна безпека*. 2014. № 25.
84. Скоробагатько Т. М., Копильний М. І., Боровиков В. О. Ефективність гасіння деякими газовими вогнегасними речовинами біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1 (3).
85. Монреальський протокол про речовини, що руйнують озоновий шар: міжнародний документ ООН від 16.09.1987. URL: <http://parusconsultant.com/?doc=053O65D021> (дата звернення: 08.12.2025).
86. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату: міжнародний документ ООН від 11.12.1997. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801 (дата звернення: 08.11.2023).
87. Копистинський Ю. О., Баланюк В. М., Кошеленко В. В. Особливості механізму гасіння дифузійного полум'я аерозолями на основі хлоридів та карбонатів калію. В: *Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції*. Львів, 2009.
88. Каримов Ф. Ф. О гомогенно-гетерогенном механизме протекания каталитических реакций в аэрозолях. Київ, 1996. 44 с.

89. Баланюк В. М., Лавренюк О. І., Гарасим'юк О. І., Голонько О. Я. Особливості гасіння твердих та рідких горючих речовин вогнегасним аерозолем на основі солей калію. *Пожежна безпека*. 2008. № 12. С. 60–64.
90. ДСТУ EN 15004-1:2014. Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи газового пожежогасіння. Частина 1. Проектування, монтування та технічне обслуговування. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 102 с.
91. ДСТУ 5092:2008. Пожежна безпека. Вогнегасні речовини. Діоксид вуглецю (EN 25923:1993 (ISO 5923:1989), MOD). Київ: УкрНДПБ МНС України, 2008. 10 с.
92. Бондаренко С. М. Розробка генераторів вогнегасячого аерозолю із покращеними характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. Харків, 2004. 184 с.
93. Кравченко А. В. Підшарове гасіння спиртів вогнегасним аерозолем: дис. ... д-ра філософії. Львів, 2021. 189 с.
94. van den Berg A., Legemaate D., van der Mei R., Pieter L. Increasing the responsiveness of firefighter services by relocating base stations in Amsterdam. *INFORMS Journal on Applied Analytics*. 2017. Vol. 47, No. 4. DOI: 10.1287/inte.2017.0897.
95. Särndqvist S., Holmstedt G. Correlation between firefighting operation and fire area: analysis of statistics. *Fire Technology*. 2000. Vol. 36. P. 109–130. DOI: 10.1023/A:1015450308130.
96. Інформація з вебсайту: вебсайт. URL: <https://glavcom.ua/world/world-politics/dsns-povidomila-skilki-zahinulo-rjatuvalnikiv-za-chas-povnomasshtabnoji-vijni-994678.html> (дата звернення: 08.11.2025).
97. Degroote E., García Ybarra P. Flame propagation over liquid alcohols. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2005. Vol. 80. P. 541–548. DOI: 10.1007/s10973-005-0735-1.

98. Samim S., Sadeq A., Ahmed S. Measurements of laminar flame speeds of gas-to-liquid diesel fuel blends. *ASME Journal of Energy Resources Technology*. 2016. Vol. 138, No. 5. DOI: 10.1115/1.4033627.

99. Циганков А., Ніжник В., Балло Я., Сізіков О., Жихарев О., Тесленко О. Вплив часу прибуття підрозділів пожежної охорони до місця виклику на тривалість гасіння пожежі на території зони відчуження. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2 (12). С. 11–19. DOI: 10.33269/nvcz.2021.2(12).11-19.

100. Одинець А., Ніжник В., Сізіков О., Фещук Ю., Балло Я., Климась Р., Жихарев О. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1 (13). С. 72–79. DOI: 10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79.

101. Mohd Aliff M., Sani N. S., Yusof Azavitra Zainal M. I. Development of fire fighting robot (QRob). *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. Vol. 10, No. 1. DOI: 10.14569/IJACSA.2019.0100118.

102. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. Vol. 5, No. 3. DOI: 10.3390/fire5030075.

103. Wu C., Zhou T., Chen B. et al. Experimental study on burning characteristics of the large-scale transformer oil pool fire with different extinguishing methods. *Fire Technology*. 2021. Vol. 57. P. 461–481. DOI: 10.1007/s10694-020-01012-x.

104. Li Z., Zhu H., Zhao J., Zhang Y., Hu L. Experimental research on the effectiveness of different types of foam for extinguishing methanol and diesel pool fires. *Combustion Science and Technology*. 2022. Vol. 196, No. 12. P. 1791–1809. DOI: 10.1080/00102202.2022.2125306.

105. Zhi H., Bao Y., Wang L., Mi Y. Extinguishing performance of alcohol-resistant firefighting foams on polar flammable liquid fires. *Journal of Fire Sciences*. 2020. Vol. 38, No. 1. P. 53–74. DOI: 10.1177/0734904119893732.
106. Rajput S. Fire extinguishing agents: sort and comparison. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2018. Vol. 6. P. 557–667. DOI: 10.22214/ijraset.2018.3090.
107. Kroca D., Klouda K. Application of aerosol extinguishing agents to increase infrastructure safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 444. DOI: 10.1088/1755-1315/444/1/012030.
108. Баланюк В., Мирошкін В., Гузар Н., Гарасим'юк О., Копистинський Ю. Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів. *Пожежна безпека*. 2023. № 43. DOI: 10.32447/20786662.43.2023.02.
109. Muller S., Brady R., De Bressy G., Magnier P. Prevention of transformer tank explosion: Part 1 — experimental tests on large transformers. В: *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. 2008. DOI: 10.1115/PVP2008-61526.
110. Zhang X., Ismail M. H. S., Ahmadun F. R. A., Norhafizah H. Hot aerosol fire extinguishing agents and the associated technologies: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2015. Vol. 32, No. 3. DOI: 10.1590/0104-6632.20150323s00003510.
111. Yan Y., Du Z., Han Z. A novel hot aerosol extinguishing agent with high efficiency for class B fires. *Fire and Materials*. 2019. Vol. 43. P. 84–91. DOI: 10.1002/fam.2671.
112. Balanyuk V., Myroshkin V., Harasimiuk O., Kopystinsky Y. Screening ability of environmentally friendly aerosols for thermal radiation. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 195–200. DOI: 10.4028/p-PQs6tx.

113. Balanyuk V., Hirskeyi O., Garasymyuk O., Myroshkin V., Pykus V. Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні. *Вісник ЛДУ БЖД*. 2022. № 26. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.26.2022.08>.
114. Balanyuk V. M., Myroshkin V. S., Huzar N. I., Pykus V. S., Girskiy O. I. Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. *Пожежна безпека*. 2024. № 45. С. 5–9. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.01>.
115. Мирошкін В., Пелешко М., Ковалишин В., Грідасов І. Нормативно-правове забезпечення безпеки під час використання похилих підйомників для евакуювання людей в разі пожежі. *Пожежна безпека*. 2025. № 46. С. 89–96. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.09>.
116. Balanyuk V., Myroshkin V., Kopystynsky Y., Garasymyuk O., Girskiy O., Gusar N. Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces. *Key Engineering Materials*. 2025. Vol. 1020. P. 141–151. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>.
117. Palchykov R., Nizhnyk V., Mykhailov V., Linchevskiy Y., Loik V., Lozynskiy R., Sukach R., Voytovych D., Peleshko M., Myroshkin V. Application of time/temperature fire curves for the estimation of fire resistance of transformer within protective structures. *Metallurgical and Materials Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.63278/1393>.

ДОДАТКИ

Додаток А. Протоколи випробувань науково-дослідної лабораторії



**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ДСНС УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ**

Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 11/40/Акс /2024

Визначення екрануючої здатності теплового випромінювання
екологічно прийнятних аерозолів

Львів – 2024

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ
ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ
№ 11/40/Акс від 20 08 2024 р.
Всього 4 арк.
Підпис

ПРОТОКОЛ № 11/40/П/2024

Визначення екрануючої здатності теплового випромінювання екологічно прийнятних аерозолів

Дата проведення

випробувань: «20» 08 2024 р.

Умови проведення випробувань:

- температура 18 °С
 - атмосферний тиск 97,4 кПа
 - відносна вологість 68 %

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія пожежної безпеки ЛДУ БЖД. Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Вогнегасний аерозоль, який складається з дисперсної фази (частинки неорганічних солей калію, такі як K_2CO_3 , KOH , KCl , $KHCO_3$ з розмірами від 0,01 мкм до 0,1 мкм) та газової суміші (повітря, CO_2 , N_2).

ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Випробуванням на вогнегасну здатність піддавалися зразки аерозолі дисперсністю частинок від 0,01 мкм до 0,1 мкм, концентраціями: 5, 10, 15, 25, 30, 35 та 60 г/м³.

ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

- Випробувальна камера розмірами 1,5 м × 0,5 м × 0,5 м.;
- Джерело інфрачервоного випромінювання;
- Датчик вимірювання теплового потоку;
- Засіб генерації аерозолію.

Таблиця 1.

Засоби вимірювальної техніки

№ п/п	Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка засобів вимірювальної техніки
1.	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	2 кл
2.	Ваги ВТУ 210/ СЗ	1826	Від 0 до 210 г	Кл. точн. 3
3.	Лінійка вимірювальна ЛВ 1 м	11180024	0 -1000 мм	2 кл
4.	Вимірювач теплового потоку ВТП-01	09.001	0 -50,0 кВт/м ²	2 кл

МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:

Суть методу полягає у визначенні ефективності екранування теплового випромінювання вогнегасним аерозолем при зміні його концентрації та відстані до джерела випромінювання.



Етапи проведення дослідження:

Підготовка:

1. Встановити джерело інфрачервоного випромінювання на одному кінці випробувальної камери.
2. Розмістити датчик вимірювання інтенсивності теплового випромінювання на визначеній відстані від джерела.

Процес вимірювання впливу концентрацій на екранування теплового випромінювання:

1. Увімкнути джерело теплової енергії.
2. Спалити наважку АУС для створення концентрацій аерозолу 5, 10, 15, 25, 30, 35 та 60 г/м³.
3. Провести заміри інтенсивності теплового потоку на відстані 0,5 м від джерела при кожному значенні концентрації.

Процес вимірювання впливу відстані на екранування теплового випромінювання:

1. Зафіксувати сталу концентрацію аерозолу (наприклад, 5 г/м³).
2. Провести заміри інтенсивності теплового потоку на різних відстанях від джерела: 10 см, 20 см та 30 см.

З метою підвищення достовірності та відтворюваності результатів дослідження слід проводити 3 рази.

Опрацювання результатів:

- Порівняти отримані показники інтенсивності теплового потоку з початковими (без аерозолу) для оцінки відсоткового зниження інтенсивності.
- Побудувати графіки залежності ефективності екранування від концентрації аерозолу та від відстані до джерела випромінювання.
- Результати випробувань занести в таблиці.

Таблиця 2.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:

з визначення впливу концентрації вогнегасного аерозолу на ефективність екранування теплового випромінювання.

Концентрація (С, г/м ³)	Дослідження 1 (Q1, кВт)	Дослідження 2 (Q2, кВт)	Дослідження 3 (Q3, кВт)	Середнє значення (Qсер, кВт)
0	3,3	3,2	3,4	3,30
15	3,1	3,2	3,3	3,20
20	2,4	2,5	2,6	2,50
30	2,0	2,1	2,2	2,10
40	1,7	1,8	1,9	1,80
50	1,45	1,55	1,65	1,55
60	1,4	1,5	1,6	1,50

Наведені значення демонструють характерну закономірність зниження інтенсивності теплового потоку при зростанні концентрації аерозолу.



Таблиця 3.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:

з визначення залежності інтенсивності теплового випромінювання Вт/м² від відстані між джерелом випромінювання та поверхнею що нагрівається на відстанях 10, 20, 30 см від джерела випромінювання при концентрації 5 г/м³ (середні значення).

Час (с)	10 см, Вт/м ²	20 см, Вт/м ²	30 см, Вт/м ²	Час (с)	10 см, Вт/м ²	20 см, Вт/м ²	30 см, Вт/м ²
1	4,5	3,4	3	21	3,1	3,6	2,1
2	7,8	3,8	3,5	22	3,3	3,3	2,3
3	8,8	5	6	23	3,3	3,3	2,3
4	9,1	6,2	6,3	24	3,2	3,1	2,2
5	7,5	7	7,4	25	3,1	3,1	2,5
6	6,8	5,8	7,1	26	3,1	3,1	2,5
7	5,2	5,5	6,2	27	3,1	3,1	2,5
8	4,1	5,1	3,8	28	3	3	2,2
9	4,1	5,1	3,8	29	3	3	2,2
10	4	4,8	3,4	30	3	3,1	2,1
11	3,9	4	2,6	31	2,8	2,8	1,8
12	3,9	4	2,6	32	2,9	2,8	1,8
13	4	5,1	2,7	33	2,7	2,5	1,9
14	4,6	4,3	2,4	34	2,5	3,1	—
15	4,7	4,3	2,4	35	2,5	3,1	—
16	4,6	4,3	2,3	36	2,5	3,1	—
17	4,4	3,9	2,2	37	2,4	2,8	—
18	4,4	3,9	2,3	38	2,2	2,4	—
19	3,8	4,2	2,4	39	2,2	2,4	—
20	3,5	4,1	3,3	40	2	2	—

Примітки:

1. Протокол №11/40/Ач/2024 стосується тільки результатів в рамках проведення дисертаційних досліджень.
2. Протокол є цілісним документом і може бути передрукований тільки в повному обсязі на підставі згоди НДЛ ПБ ЛДУБЖД.
3. Всього листів 4.

Ад'юнкт денної форми навчання
докторантури, ад'юнктури ЛДУБЖД

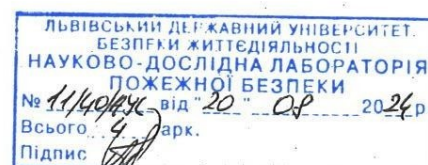
Володимир МИРОШКІН

Науковий співробітник
науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки, к.т.н.

Павло ПАСТУХОВ

Начальник
науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки, доктор філософії

Іван АДОЛЬФ





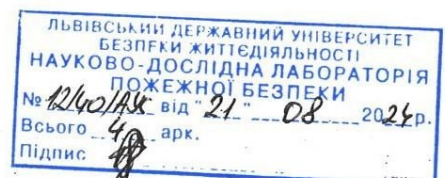
**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ДСНС УКРАЇНИ
НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЛАБОРАТОРІЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ**

Свідоцтво про атестацію № РЛ 031/21 чинне до 27 травня 2025 р.
Ліцензія ДДПБ МНС України серія АГ № 506341 від 11.02.2011 р.

ПРОТОКОЛ № 121 40/АУС/2024

визначенні вогнегасної здатності аерозольотворювальної сполуки (суміші)
АУСЗ згідно ТУ У 24.66 - 3221619042:001:2024 у вигляді кусків
або порошку за наданою методикою.

Львів - 2024



ПРОТОКОЛ № 12/40/АЧС/2024

визначенні вогнегасної здатності аерозольотворювальної сполуки (суміші) АУСЗ згідно ТУ У 24.66 - 3221619042:001:2024 у вигляді кусків або порошку за наданою методикою.

Дата проведення

випробувань: «21» 08 2024р.

Умови проведення випробувань:

- температура 18 оС
- атмосферний тиск 97,4 кПа
- відносна вологість 68 %

МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ: Науково-дослідна лабораторія лабораторія пожежної безпеки ЛДУ БЖД. Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ: Зразки матеріалу аерозольотворюючої суміші марки АУСЗ (ТУ У 24.66 - 3221619042:001:2024) у вигляді кусків або порошку АУСЗ масою 2800 – 2880 г.

Відсотковий склад аерозольотворюючої суміші марки АУСЗ

Вміст компонентів %					
Паливо Дисахариди	Окисни к Калієва селітра	Неорганіч ні інгібітори	Цільо ві добав ки	Додаткові каталізато ри	Характеристика
28-42	50-72	1-12	0-16	1-5	Наявність середнього форсу полум'я при горінні Підвищена механічна міцність заряду

Зразок наданий 01.08.2024 р.

ЗРАЗКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ: Випробуванням на вогнегасну здатність піддавалися зразки матеріалу аерозольотворюючої суміші марки АУС 3 у вигляді кусків або порошку масою 2800 – 2880 г при гасінні н- Гептану

ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Для моделювання умов гасіння на відкритому просторі використовувалася установка, що складається з таких елементів:

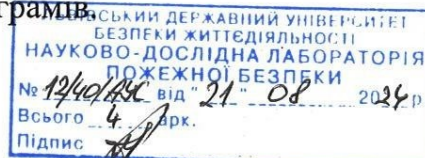
Металева конструкція: включає основу та вертикальні стійки з направляючими роликами.

Механізм позиціонування: ручна лебідка з металевим тросом та ковзаючою платформою, що дозволяла регулювати висоту розташування генератора.

Виносна стріла: спеціальний тримач, на якому закріплювався генератор вогнегасного аерозолі (ГВА) безпосередньо над центром вогнища.

Моделльне вогнище: металева ємність круглої форми з висотою борта 25 см та радіусом 1,5 м (у тексті вказано "см", але контекст 55 л пального та вогнища 55В вказує на метри), заповнена 55 літрами горючої рідини.

Джерело аерозолі: генератори вогнегасного аерозолі з масою заряду аерозольотворювальної суміші (АУС) від 2800 до 2880 грамів.



Таблиця 1.

Засоби виміральної техніки

№ п/п	Найменування приладу чи обладнання	Заводський номер	Границя вимірювання	Клас точності або похибка засобів виміральної техніки
1.	Секундомір СОП	8625	Від 0 до 3600 с	2 кл
2.	Ваги ВТУ 210/ СЗ	1826	Від 0 до 210 г	Кл. точн. 3
3.	Лінійка вимірвальна ЛВ 1 м	11180024	0 -1000 мм	2 кл

МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:

Даний метод призначений для визначення основних чинників та параметрів ефективності гасіння розливів горючих рідин (на прикладі модельного вогнища 55В) в умовах відкритого простору.

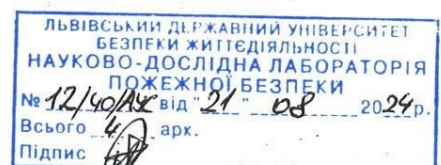
Порядок дій при проведенні випробування:

- Монтаж ГВА: Закріпити генератор на платформі та за допомогою лебідки підняти його на висоту 4,5 метра над центром майбутнього вогнища.
- Підготовка пального: Залити 55 л горючої рідини в металеву ємність.
- Ініціація горіння: Запалити пальне та витримати час вільного горіння тривалістю 2 хвилини для досягнення стабільної фази пожежі.
- Активація системи: Дистанційно активувати ГВА для подачі вогнегасного аерозолю під прямим кутом до дзеркала рідини.
- Відеофіксація: Проводити безперервну зйомку процесу для подальшої розкадровки та аналізу динаміки хмари.

Під час та після випробування фіксуються наступні показники:

- Ефективність гасіння: Результат (гасіння або негасіння вогнища).
- Часові характеристики: Час роботи ГВА (с), час безпосереднього гасіння полум'я (с) та час стійкості аерозольної хмари після закінчення роботи генератора (с).
- Геометрія потоку: Ширина конусу аерозолю та площа покриття в різних зонах (від зрізу ГВА до поверхні рідини).
- Масові показники: Маса аерозольотворювальної суміші (г) та інтенсивність її подавання (г/с).
- Очікуваний результат: Гасіння за 6–8 секунд при збереженні концентрації в хмарі на рівні 97 г/м³ протягом 50–60 секунд.

Результати випробувань занести в таблиці.



РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Таблиця 2

Інтенсивність подавання аерозолю з генераторів вогнегасного аерозолю аерозольної хмари

№	Час роботи ГВА, с	Вага АУС, г	Інтенсивність подавання, г/м ³
1	21	2880	140,0
2	18	2800	160,0
3	16	2850	178,5

Таблиця 3

Стійкість аерозольної хмари

№	Температура аерозолю °С	Час гасіння с.	Стійкість хмари аерозолю с.
1	2880	6 (гасіння)	62
2	2800	8 (гасіння)	55
3	2850	8 (гасіння)	54

Таблиця 4

Параметри площі зони покриття вогнегасним аерозолем

№	Зона покриття (м ²)	Час роботи ГВА с.			
		3	8	12	16
1	a	0,36	0,38	0,41	0,4
2	b	0,52	0,54	0,56	0,52
3	c	0,89	0,92	1,1	1,25
4	d	1,12	2,25	3,4	4,6

Примітки:

1. Протокол № 12 /40/АУС/2024 стосується тільки результатів в рамках проведення дисертаційних досліджень.
2. Протокол є цілісним документом і може бути передрукований тільки в повному обсязі на підставі згоди НДЛ ПБ ЛДУБЖД.
3. Всього листів 4.

Ад'юнкт денної форми навчання
докторантури, ад'юнктури ЛДУБЖД

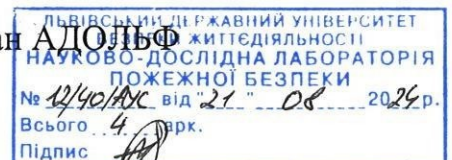
Володимир МИРОШКІН

Науковий співробітник
науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки, к.т.н.

Павло ПАСТУХОВ

Начальник
науково-дослідної лабораторії
пожежної безпеки, доктор філософії

Іван АДОЛЬФ



Додаток Б. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.



Затверджую
Начальник Головного управління ДСНС
України у Львівській області
полковник служби цивільного захисту

Любомир ПАСІЧНИК

13 » травня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі» ад'юнкта денної форми навчання докторантури – ад'юнктури ЛДУ БЖД підполковника служби цивільного захисту Володимира МИРОШКІНА.

Комісія у складі: заступника начальника управління - начальника відділу превентивної діяльності УЦЗ та ПД ГУ ДСНС України у Львівській області підполковника служби цивільного захисту Павла ЧЕРНЕЦЬКОГО, заступника начальника управління - начальника відділу організації реагування та готовності сил УРНС ГУ ДСНС України у Львівській області полковника служби цивільного захисту Ігоря ПРОКОПИКА, начальника сектору організації заходів безпеки критичної інфраструктури УЦЗ та ПД ГУ ДСНС України у Львівській області підполковника служби цивільного захисту Юрія ЮРЕНЦА, складала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи ад'юнкта денної форми навчання докторантури – ад'юнктури ЛДУ БЖД підполковника служби цивільного захисту Володимира МИРОШКІНА «Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі» впроваджено у вигляді способу аерозольного пожежогасіння горючих рідин.

У ході розгляду та апробації встановлено, що запропонований спосіб забезпечує ефективне припинення процесу горіння шляхом створення вогнегасного аерозольного середовища з високою концентрацією дисперсних твердих частинок, які інгібують ланцюгові реакції полум'я та забезпечують інтенсивне поглинання теплового випромінювання.

Результати впровадження підтвердили можливість застосування зазначеного способу:

- у системах протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури;
- для локалізації та ліквідації пожеж горючих рідин під час гасіння пожеж пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України;
- на об'єктах із наявністю трансформаторного та іншого оливонаповненого обладнання;

Встановлено, що застосування способу дозволяє:

- підвищити ефективність гасіння пожеж горючих рідин;
- скоротити час ліквідації горіння;
- знизити температурний вплив у зоні пожежі;
- підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів критичної інфраструктури.

Запропонований спосіб може бути рекомендований для практичного застосування у сфері пожежної безпеки, зокрема при розробленні та вдосконаленні систем протипожежного захисту, а також під час виконання оперативних дій пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України.

Голова комісії:

Заступник начальника управління-
начальник відділу превентивної діяльності
УЦЗ та ПД ГУ ДСНС України у Львівській області
підполковник служби цивільного захисту

Павло ЧЕРНЕЦЬКИЙ

Члени комісії:

Заступник начальника управління-
начальник відділу організації реагування
та готовності сил УРНС ГУ ДСНС України
у Львівській області
полковник служби цивільного захисту

Ігор ПРОКОПИК

Начальник сектору організації заходів безпеки
критичної інфраструктури УЦЗ та ПД
ГУ ДСНС України у Львівській області
підполковник служби цивільного захисту

Юрій ЮРЕНЦ

Затверджую

Директор ТЗОВ «Лео Лайтмен Україна»

Стег ДУХНЯК

« 12

2026 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Мирошкіна Володимира Сергійовича

Комісія у складі: голови комісії – заступника директора ТОВ «Лео Лайтмен Україна» Наумко Д. М., та членів комісії – начальника виробничого відділу ТОВ «Лео Лайтмен Україна» Кучерепа О. С., інженера-проектувальника ТОВ «Лео Лайтмен Україна» Мельничука Т. Я. склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Мирошкіна Володимира Сергійовича впроваджено у вигляді способу аерозольного пожежогасіння горючих рідин.

Зазначений спосіб впроваджено та апробовано у виробничому процесі ТЗОВ «ЛЕО Лайтмен Україна» за адресою: Львівська область, Львівський район, с. Зимна Вода, вул. Львівська, 3.

Суть способу полягає у створенні в зоні горіння вогнегасного аерозольного середовища з високою концентрацією дисперсних твердих частинок, що забезпечують інгібування ланцюгових реакцій полум'я та інтенсивне поглинання теплового випромінювання.

Встановлено, що застосування даного способу є ефективним для гасіння пожеж горючих рідин, у тому числі тих, що виникають внаслідок дії атмосферної електрики (ударів блискавки), зокрема у зонах розташування трансформаторного та іншого маслонаповненого обладнання.

Застосування способу доцільне як елемент комплексного захисту об'єктів, що підлягають системам блискавкозахисту, оскільки дозволяє мінімізувати наслідки займання, спричиненого термічним та іскровим впливом розряду блискавки.

Реалізація способу характеризується:

- високою ефективністю ліквідації горіння за рахунок інгібування хімічних реакцій;
- утриманням вогнегасного аерозолю в зоні горіння;
- зниженням температури в осередку пожежі;
- малою інерційністю дії.

Запропонований спосіб не потребує використання складного технологічного обладнання (насосів, трубопроводів, систем подачі піни або газу під тиском), що спрощує його впровадження та експлуатацію.

За результатами впровадження встановлено, що застосування розробленого способу підвищує рівень пожежної безпеки об'єктів, що містять горючі рідини, у тому числі об'єктів, обладнаних системами блискавкозахисту, та може бути рекомендоване для практичного використання.

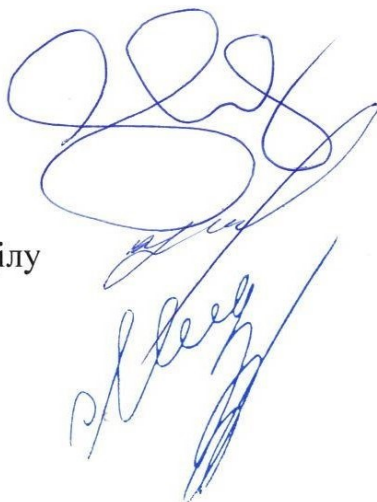
Голова комісії:

Заступник директора

Члени комісії:

начальника виробничого відділу

інженер-проектувальник



Наумко Д. М.

Кучерепа О. С.

Мельничук Т. Я.



Підтверджую

Директор ТОВ «Бастіон»

Наталя БУЛАТОВА

2021 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Мирошкіна Володимира Сергійовича

Комісія в складі: голови комісії – начальника виробничого відділу ТОВ «Бастіон» п. Ростислава БОРОВЦЯ, та членів комісії – інженера проектувальника ТОВ «Бастіон» Ростислава ШАНДРИ, інженера з обслуговування електромереж Івана РОМАНЮКА склали акт про те, що виготовлена за результатами дисертаційної роботи Володимира МИРОШКІНА., система аерозольного пожежогасіння, в якості експериментального зразка, встановлена в трансформаторній підстанції ТзОВ «Бастіон» за адресою: м. Львів вул. Городоцька, 207.

Експериментальний зразок системи аерозольного пожежогасіння горючих рідин забезпечує ефективне гасіння у зоні горіння, зокрема в приповерхневих ділянках трансформатора, де формується так зване кільце запалювання.

Дисперсні тверді частинки аерозолі перебувають у контакті із зоною хімічних реакцій горіння, що забезпечує реалізацію їх вогнегасних властивостей. Зокрема, відбувається ефективне інгібування ланцюгових реакцій полум'я, поглинання теплової енергії із зони горіння під час нагрівання, плавлення, випаровування та розкладу частинок. Це в кінцевому результаті визначає високу ефективність ліквідації горіння.

Система характеризується низькою інерційністю спрацювання, що є важливою умовою для ефективного гасіння пожеж у трансформаторах.

Аерозольна система пожежогасіння на основі аерозолеутворювальної суміші відзначається високою надійністю, ефективністю пожежогасіння та

тривалим терміном зберігання у черговому режимі. При цьому вона не потребує використання спеціальних ємностей для піноутворювачів, агрегатів для подачі газів під надлишковим тиском, насосного обладнання, запірної арматури, генераторів піни, розпилювачів, трубопроводів, складних електронних систем керування тощо.

Експлуатація та зберігання експериментальної системи аерозольного пожежогасіння є простими та не потребують значних витрат.

Голова комісії:

Начальник виробничого відділу



Ростислав БОРОВЕЦЬ

Члени комісії:

Інженер-проектувальник



Ростислав ШАНДРА

Інженер з обслуговування електромереж



Іван РОМАНЮК

Додаток В

Список публікацій здобувача за темою дисертації.

Статті у міжнародних наукових виданнях і тих, що входять до міжнародних наукометричних баз (МНБ):

1. Volodymyr Balanyuk*, **Volodymyr Myroshkin**, Oleksandr Harasimiuk, Yuriu Kopystinsky Стаття «Screening Ability of Environmentally Friendly Aerosols for Thermal Radiation» Scientific.Net. Publisher in Materials Science § Engineering Trans Tech Publications. Materials and Energy Engineering. Key Engineering Materials Vol. 954. Zurich, Switzerland Protection 08.2023. P. 195-200. <https://doi.org/10.4028/p-PQs6tx>;
2. BALANYUK Volodymyr 1,a*, **MYROSHKIN Volodymyr** 2,b,, KOPYSTINSKY Yuriu 4,d, GARASYMYUK Oleksandr, GIRSKUY Oleg, GUSAR Nazar Стаття «Study of Efficiency Parameters for Using Fire-Extinguishing Aerosols to Suppress Flammable Liquid Fires in Open Spaces» Key Engineering Materials (Volume 1020) Publisher in Materials Science § Engineering Trans Tech Publications Ltd (Zurich, Switzerland) August 2025 p. 141-151 <https://doi.org/10.4028/p-7xOPiH>;
3. Roman Palchykov, Vadym Nizhnyk, Viktor Mykhailov, Yevhen Linchevskyi, Vasyl Loik, Roman Lozynskyi, Roman Sukach, Dmytro Voytovych, Marta Peleshko, and **Volodymyr Myroshkin**. Стаття «Application of time/temperature fire curves for the estimation of fire resistance of transformer within protective structures» подано до Metallurgical & Materials engineering ISSN / eISSN: 2217-8961 / 2812-9105 <https://doi.org/10.63278/1393>.

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Balanyuk, V., **Myroshkin, V.**, Корыстінський, Ю., Нірський, О., & Герасимюк, О. «Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин» Збірник наукових праць «*Пожежна безпека*» 2022. №41. С. 12-19 <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.02>;
2. Balanyuk, V., Нірський, О., Герасимюк, О., **Myroshkin, V.**, & Рукс, В. «Проблеми нормативно-технічного забезпечення випробувань та якості продукції вогнегасних систем та засобів в Україні» *Вісник ЛДУ БЖД* 2022. №26. С. 67-72 <https://doi.org/10.32447/20784643.26.2022.08>;
3. Balanyuk, V., **Myroshkin, V.**, Huzar, N., Garasimiyuk, O., & Корыстінський, Ю. Стаття «Підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів» *Пожежна безпека*, 43,13 20 <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.02>;
4. Balanyuk, V. M., **Myroshkin, V. S.**, Huzar, N. I., Rukus, V. S., & Нірський, О. І. Стаття «Чинники впливу на швидкість горіння сполук, із яких утворюються вогнегасні аерозолі. *Пожежна безпека*, 45, 5-9.; <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.01>
5. Миршкін В. Пелешко М. Ковалишин В. Грідасов І. Стаття «Нормативно-правове забезпечення безпеки під час використання похилих підйомників для евакуювання людей в разі пожежі» *Пожежна безпека*, 46,89-96; <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.09>

Додаток Г.

Відомості про апробацію результатів дисертації.

1. В.М. Баланюк, О.І. Герасим'юк, Ю.О. Копистинський, П.В. Пастухов, **В.С. Мірошкін**, О.І. Гірський «Умови та перспективи застосування вогнегасного аерозолі для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки» Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської наук.-прак. конф. з міжн. участю м. Львів 12-13 жовтня 2022р. С. 291-295;
2. В. БАЛАНЮК, О. ГІРСЬКИЙ, **В. МИРОШКІН**, В. ПИКУС «Щодо питання визначення характеристик вогнегасних засобів в Україні» Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції м. Черкаси 27 квітня 2023р. С. 127-129;
3. Пастухов П.В. Баланюк В. М., **Мірошкін В.С.**, Герасим'юк О.І. «Особливості екранування теплового випромінювання вогнегасними аерозолями» Проблеми надзвичайних ситуацій: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків 19 травня 2023 року с. 214-216;
4. Олег ГІРСЬКИЙ Володимир БАЛАНЮК, **Володимир МИРОШКІН**, Назарій ГУЗАР, Олександр ГАРАСИМ'ЮК «Перспектива гасіння розливів горючих рідин об'ємними засобами пожежогасіння» XV Міжнародна науково-практична конференція Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій 2024/4/25 с. 7-8;
5. Володимир Баланюк, **Володимир Мірошкін**, Назар Гузар, Олег Гірський, Віктор Пикус «Визначення параметрів ефективності використання вогнегасного аерозолі на відкритому просторі» Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення 13 грудня 2024 року
6. Володимир Мірчович Баланюк, **Володимир Сергійович Мірошкін**, Назарій Ігорович Гузар, Олександр Іванович Герасим'юк, Олег Ігорович Гірський «Аналіз ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях» 2024/4/25 XV Міжнародна науково-практична

конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» с. 8-9;

7. Баланюк В., **Мирошкін В.** Банерна доповідь «Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі» 8-й міжнародний симпозіум молодих вчених «Smart Lion» «Війна в Україні. Види медичного втручання»;

8. **Мирошкін В.**, Баланюк В. Пазен О Тези «Проблематика забезпечення інклюзивності шляхів евакуації на діючих об'єктах в Україні» IV міжнародна науково-практична конференція з нагоди відзначення Дня прав людини. С. 302-306

<https://docs.google.com/document/d/1XxMmDhdtEL7BMvsfIbqjA7Lz8Yww7jum/edit?tab=t.0>

9. Баланюк В. М., Гузар Н. І., **Мирошкін В. С.**, Гірський О. І., Пикус С. Небезпечні чинники пожеж на трансформаторних підстанціях в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

10. Баланюк В. М., Гузар Н. І., **Мирошкін В. С.**, Пикус С., Гірський О. І. Небезпечні сценарії розвитку пожеж в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

11. Грідасов І., Пелешко І., Ковалишин М., **Мирошкін В. С.** Напрямки вдосконалення підготовки фахівців у сфері цивільного захисту в умовах війни. Цивільний захист в умовах війни: збірник тез доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 17–18 квітня 2025 р.

12. **Мирошкін В. С.** Злочинна недбалість у сфері пожежної безпеки критичної інфраструктури: проблеми кримінально-правової відповідальності. Актуальні питання забезпечення службово-бойової діяльності сил сектору безпеки і оборони: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції. 2025.
13. **Мирошкін В. С.** Пожежі на нафтобазах унаслідок обстрілів: екологічні ризики пінного гасіння горючих рідин. Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.
14. **Мирошкін В. С.** Адаптивні системи пожежогасіння для об'єктів критичної інфраструктури з урахуванням змінних загроз та умов експлуатації. Інновінг сучасних трендів в менеджменті безпеки: національна безпека та оборона: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 23 травня 2025 р.
15. Баланюк В. М., **Мирошкін В. С.** Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними аерозолями на відкритому просторі. Біологічні, хімічні та екологічні загрози в умовах війни: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.
16. Баланюк В. М., **Мирошкін В. С.**, Гузар Н. І. Щодо питання моделювання параметрів концентрації та геометрії аерозольної хмари під час гасіння горіння на відкритому просторі. Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій» Черкаси. 21 травня 2026 року с. 8.