

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
Державна служба України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Великий Назарій Романович

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ПІДШАРОВОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ ДЛЯ СТАЛЕВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Н. Р. Великий

Науковий керівник Ковалишин В. В., доктор технічних наук, професор

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Великий Н. Р. Розроблення системи підшарового пожежогасіння компресійною піною для сталевих вертикальних резервуарів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2025 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу у галузі пожежної безпеки – розроблено систему підшарового пожежогасіння для сталевих вертикальних резервуарів із зберіганням нафтопродуктів (бензин, дизельне паливо) за допомогою компресійної піни.

Пожежі на об'єктах нафтової промисловості, зокрема в резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо), – є глобальна проблема через їх швидкий розвиток, значні матеріальні та екологічні збитки, а також загрозу для життя людей. У період з 2020 по 2025 роки в Україні сталося близько 40 значних пожеж на нафтових резервуарах, більшість із яких (90%) припадає на період війни. Точна кількість пожеж на нафтових резервуарах в Україні за 2020-2025 роки достовірно не відома через брак централізованої звітності в умовах війни. Проте на основі доступних статистичних даних маємо таке: у 2022 році відбулось щонайменше 10 задокументованих пожеж на нафтобазах, переважно через російські атаки. Найбільш резонансні – у Калинівці, Новомосковську та Кременчуку; у 2023 році відбулось близько 10 пожеж, з яких 2 були масштабними (Одеса, Рівне); 2024 рік – 8 випадків, включаючи пожежу в Київській області. Багато атак на нафтобази не розголошуються публічно, щоб не надавати ворогу інформації про результат ударів. Наприклад, пожежу в Київській області в 2024 році офіційно називали «пожежею на промисловому об'єкті». Традиційні способи гасіння пожеж у резервуарах із зберіганням нафтопродуктів (бензин, дизельне паливо) є вкрай небезпечними в умовах воєнного стану в Україні через ризик повторного обстрілу. Як правило, пожежно-рятувальні підрозділи виїжджають до місця події після сигналу «відбій

повітряної тривоги», коли немає загрози ракетних обстрілів. В таких випадках пожежа вже може набути значних масштабів і її гасіння ускладнюється. В умовах гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) основним вогнегасним засобом є повітряно-механічна піна, яка генерується з фторпротеїнових піноутворювачів. Але, незважаючи на її високу ефективність, екологічна небезпека, висока вартість та складність утилізації є суттєвими недоліками, які стимулюють до пошуку альтернативних засобів гасіння. У світі активно досліджуються інноваційні підходи до пожежогасіння, зокрема використання компресійної піни, яка демонструє високу ефективність при гасінні пожеж у Європі та США, але в Україні залишається без належної уваги. Окрім традиційного способу гасіння резервуарів, застосовують метод підшарового пожежогасіння у резервуарах, які обладнані системою підшарового пожежогасіння.

Аналіз досвіду застосування компресійної піни в США та Європі доводить, що піногенеруючі системи мають ряд переваг порівняно з традиційними технологіями пожежогасіння, а саме: ефективність (зменшення часу гасіння); менша витрата води (2-5 рази) і піноутворювача (6-10 разів); швидке зниження температури в зоні горіння; незначні пошкодження майна через вплив води; невеликий опір в трубопроводах; збільшення дальності подавання піни; висока стійкість та адгезія піни. Згідно з проведеним аналізом вдалось встановити, що закордонні виробники, зокрема компанія Rosenbauer, пропонують доволі широкий спектр систем для генерування компресійної піни. Також, як виявилось в Україні немає відповідного вітчизняного чи імпортного обладнання на оснащенні пожежно-рятувальних підрозділів. Компресійну піну використовують вже більше 30 років для гасіння пожеж різних класів. В США компресійну піну застосовують для гасіння пожеж в житлових будинках. Це допомагає заощадити вогнегасні речовини та завдяки низькому вмісту рідкої фази в компресійній піні зменшити матеріальні збитки від гасіння. Не дивлячись на це, в США та в країнах Європи не досліджували гасіння резервуарів з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) підшаровим способом за допомогою компресійної піни, відсутні відповідні нормативні документи.

Отже ми провели дослідження щоб вивчити фізичні процеси підняття пінних струменів компресійної піни крізь шар нафтопродукту (бензин, дизельне пальне), визначили оптимальні тиски при подаванні піни, встановили вогнегасні властивості компресійної піни в середовищі нафтопродукту (бензин, дизельне пальне). Також визначили оптимальну кратність піни, яка буде забезпечувати найкращу ефективність гасіння та встановили необхідну продуктивність подавання піни. Окрема увага приділялась поведінці компресійної піни в середовищі нафтопродукту (бензин, дизельне пальне), її стійкості до хімічних речовин, стисненню та відновленню форми, термостійкості.

Ми проаналізували відомі способи гасіння пожеж нафтопродуктів в резервуарах. Визначили ряд переваг підшарового способу гасіння над іншими відомими. Розробили експериментальну установку для генерування та подавання компресійної піни на основі аналізу існуючих систем для генерування компресійної піни. Основні властивості установки це те, що вона дозволяє одночасне зберігання, генерування та подавання компресійної піни, а також можливість регулювати тиск подавання залежно від потреб. За допомогою розробленої установки проведено експериментальні дослідження. Дослідження підшарового гасіння бензину в макетному резервуарі засвідчило високу ефективність компресійної піни з низькою кратністю. Результати підтверджують, що підшарове гасіння компресійною піною є перспективною альтернативою традиційним способам. Його основні переваги – економічність, стабільність ізоляційного шару піни та зниження ризиків для пожежних підрозділів, що роблять його особливо актуальним для умов воєнного часу, коли швидкість та ефективність гасіння визначають масштаби катастроф. Середній час гасіння становив 55 с при витраті 3 л розчину піноутворювача, що робить підшаровий спосіб економічно вигідним порівняно з традиційними способами гасіння. Компресійна піна створює щільний і стійкий шар, який ефективно ізолює дзеркало горіння, обмежує доступ горючих парів в зону горіння і запобігає повторному займанню. Отримані результати підтверджують, що підшарове гасіння компресійною піною є перспективним методом для ліквідації пожеж класу В у резервуарах із ЛЗР та ГР.

Результати досліджень можуть бути використані під час експлуатації стаціонарних систем підшарового пінного пожежогасіння у резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо).

Моделювання в SolidWorks Flow Simulations показало, що піна кратністю 10 забезпечує швидший вихід на поверхню горіння (310-410 с) порівняно з піною кратністю 5 (482-598 с), скорочуючи час гасіння до 5-7 хвилин при тиску 3-4 МПа.

Вперше обґрунтовано та експериментально підтверджено на макетних пожежах можливість використання компресійної піни для підшарового гасіння РВС з паливом з використанням піноутворювачів загального призначення.

Вперше обґрунтовано необхідний резервний об'єм резервуара не менше 13% внаслідок розширення пального при нагріванні під час пожежі.

Вперше визначена інтенсивність подавання компресійної піни підшаровим способом не менше $0,08-0,09 \text{ л/с} \times \text{м}^2$.

Удосконалено математичну модель, побудовану в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations, процесу подавання компресійної піни різної кратності шляхом визначення її поведінки: прогрівання стінок резервуару, зміни температури на поверхні горіння, прогрівання бензину на висоті резервуара, інтенсивність подавання піни.

Подальшого розвитку набули теоретичні та практичні основи гасіння резервуарів підшаровим способом, а саме компресійною піною та встановлено залежність гасіння пожежі резервуара від кратності піни та тиску подавання.

Подальшого розвитку набула випробувальна установка імітації горіння резервуара для дослідження гасіння підшаровим способом для різних вогнегасних речовин.

Надано рекомендації підрозділам ДСНС України щодо застосування системи підшарового пожежогасіння резервуарів з ЛЗР. Подано заявку на державну реєстрацію винаходу «Спосіб підшарового гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами компресійною піною».

Таким чином, була вирішена актуальна науково-технічна задача – розроблення системи підшарового пожежогасіння у сталевих вертикальних резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне).

Ключові слова: компресійна піна, підшарове гасіння, пожежі в резервуарах, бензин, дизельне пальне, кратність піни, резервуари з нафтопродуктами.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Sorochych, M. (2021). ЗАСОБИ ОТРИМАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 39, 94-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.11>;

2. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КРАТНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>;

3. Kovalyshyn, V. V., Velykyi, N. R., Kovalyshyn, V. V., Lyn, A. S., Pastukhov, P. V., & Velykyi, A. Y. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ПОДАВАННІ «ПІДШАРОВИМ» СПОСОБОМ. *Пожежна безпека*, 45, 10-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.02>;

4. Ковалишин, В. В., & Великий, Н. Р. (2025). ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШАРОВОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ В РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ. *Комунальне господарство міст*, 1(189), 390–397. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-390-397>;

Статті у наукових журналах, що входить до бази даних Scopus:

5. Ковалишин, В. В., Великий, Н. Р., Ковалишин, В. В., Войтович, Т. М., Бунь, Р. А., Новіцький, Я. М., & Фірман, В. М. (2024). Розроблення технології гасіння компресійною піною підшаровим способом резервуарів з нафтопродуктами. *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, 3(10 (129), 6–20.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>;

Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Ковалишин В.В., Лозинський Р.Я., Войтович Т.М., Ковалишин Вол.В., Великий Н.Р. Розширення галузі застосування компресійної піни. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 372-374;

7. Великий Н.Р., Ковалишин Вол.В., Войтович Т.М., Ковалишин В.В. Розроблення безпечних методів гасіння резервуарів з використанням компресійної піни. *Охорона праці : освіта і практика. Проблеми та перспективи розвитку охорони праці* : зб. наук. праць III Всеукраїнської науково-практичної конференції викладачів та фахівців-практиків та XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. С. 159-161;

8. Великий Н.Р., Лозинський Р.Я., Ковалишин В.В. Дослідження витрат розчину піноутворювача при подаванні компресійної піни «підшаровим» способом. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 158-160;

9. Великий Н.Р., Ковалишин В.В., Лозинський Р.Я., Ковалишин Вол.В. Вплив насадки «заспокоювача» на подачу компресійної піни. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 13 грудня 2024 р. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 161-163;

10. Великий Н.Р., Ковалишин В.В., Лин А.С., Пастухов П.В. Моделювання процесу подавання пінних струменів «підшаровим» способом в середовище прогрітого бензину. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 13 грудня 2024 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 17-19;

11. Великий Н.Р., Лозинський Р.Я., Лин А.С., Ковалишин В.В. Дослідження ефективності підшарового гасіння резервуарів із нафтопродуктами за допомогою компресійної піни в лабораторних умовах. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 209-212;

12. Войтович Т.М., Великий Н.Р., Ковалишин В.В. Дослідження впливу інтенсивності та кратності компресійної піни на ефективність гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 257-259.

ABSTRACT

Velykyi N.R. Development of a Sub-Surface Fire Suppression System Using Compressed Air Foam for Steel Vertical Storage Tanks. – PhD dissertation manuscript.

Dissertation for obtaining a Doctor of Philosophy, majoring in 261 – Fire Safety. Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2025.

The dissertation addresses a pressing scientific and practical issue in the field of fire safety by developing a sub-layer fire suppression system for vertical steel tanks used for storing petroleum products (gasoline, diesel fuel) using compressed air foam (CAF).

Fires at oil industry facilities, particularly in tanks storing petroleum products (gasoline, diesel fuel), represent a global challenge due to their rapid spread, significant material and environmental damage, and threats to human life. Between 2020 and 2025, approximately 40 significant fires occurred in oil storage tanks in Ukraine, with 90% of these incidents taking place during the war. The exact number of such fires during this period is not reliably known due to the lack of centralized reporting amid wartime conditions. However, based on available statistical data, at least 10 documented fires occurred at oil

depots in 2022, primarily due to Russian attacks, with the most notable incidents in Kalynivka, Novomoskovsk, and Kremenчук. In 2023, about 10 fires were recorded, two of which were large-scale (Odesa, Rivne). In 2024, eight cases were reported, including a fire in the Kyiv region. Many attacks on oil depots are not publicly disclosed to avoid providing the enemy with information about the impact of strikes. For instance, the 2024 fire in the Kyiv region was officially described as a «fire at an industrial facility».

Traditional methods of extinguishing fires in tanks storing petroleum products (gasoline, diesel fuel) are extremely hazardous in Ukraine's wartime conditions due to the risk of repeated shelling. Typically, firefighting units are dispatched to the scene only after the «all-clear» signal, when there is no longer a threat of missile attacks. By this time, the fire may have already reached significant proportions, complicating suppression efforts. In such cases, the primary firefighting agent is air-mechanical foam generated from fluoroprotein foam concentrates. Despite its high effectiveness, its environmental hazards, high cost, and disposal challenges are significant drawbacks, prompting the search for alternative firefighting methods. Globally, innovative firefighting approaches are being actively explored, particularly the use of compressed air foam, which has demonstrated high efficiency in fire suppression in Europe and the USA but remains underutilized in Ukraine. In addition to traditional tank fire suppression methods, sub-layer fire suppression is used in tanks equipped with such systems.

Analysis of the use of compressed air foam in the USA and Europe shows that foam-generating systems offer several advantages over traditional firefighting technologies, including: higher efficiency (reduced extinguishing time), lower water consumption (2–5 times less), lower foam concentrate consumption (6–10 times less), rapid temperature reduction in the fire zone, minimal property damage from water, low resistance in pipelines, increased foam delivery range, and high foam stability and adhesion. According to the analysis, foreign manufacturers, such as Rosenbauer, offer a wide range of compressed air foam systems. However, Ukraine lacks both domestic and imported equipment for such systems in firefighting units. Compressed air foam has been used for over 30 years to extinguish various classes of fires. In the USA, it is employed for residential fire suppression, reducing the use of firefighting agents and minimizing property damage due to

the low liquid content in CAF. However, neither the USA nor Europe has explored sub-layer fire suppression of petroleum product tanks (gasoline, diesel fuel) using CAF, and relevant regulatory standards are absent.

This study investigated the physical processes of CAF foam jets rising through a layer of petroleum products (gasoline, diesel fuel), determined optimal foam delivery pressures, and established the fire-extinguishing properties of CAF in a petroleum product environment. The optimal foam expansion ratio for maximum suppression efficiency and the required foam delivery rate were also identified. Particular attention was paid to the behavior of CAF in a petroleum product environment, including its resistance to chemicals, compression and shape recovery, and thermal stability.

Known methods of extinguishing petroleum product tank fires were analyzed, identifying several advantages of sub-layer suppression over other methods. An experimental setup for generating and delivering CAF was developed based on an analysis of existing foam-generating systems. Key features of the setup include simultaneous storage, generation, and delivery of CAF, as well as the ability to adjust delivery pressure as needed. Experimental studies using this setup demonstrated the high efficiency of low-expansion CAF in sub-layer suppression of gasoline fires in a model tank. The results confirm that sub-layer CAF suppression is a promising alternative to traditional methods, offering advantages such as cost-effectiveness, stable foam insulation, and reduced risks for firefighting units, making it particularly relevant in wartime conditions where rapid and effective suppression determines the scale of disasters. The average extinguishing time was 55 seconds with a foam concentrate consumption of 3 liters, making sub-layer suppression economically advantageous compared to traditional methods. CAF forms a dense, stable layer that effectively isolates the fire surface, restricts flammable vapor access to the combustion zone, and prevents re-ignition. These findings confirm that sub-layer CAF suppression is a promising method for extinguishing Class B fires in tanks containing flammable or combustible liquids.

The research results can be applied to the operation of stationary sub-layer foam fire suppression systems in petroleum product tanks (gasoline, diesel fuel). Modeling in SolidWorks Flow Simulations showed that foam with an expansion ratio of 10 achieves

faster surface coverage (310–410 seconds) compared to foam with an expansion ratio of 5 (482–598 seconds), reducing extinguishing time to 5–7 minutes at a pressure of 3–4 MPa.

For the first time, the feasibility of using CAF for sub-layer suppression in vertical steel tanks with fuel, using general-purpose foam concentrates, was substantiated and experimentally validated in model fire scenarios. The necessity of a minimum 13% reserve tank volume due to fuel expansion during heating in a fire was also established for the first time. The minimum CAF delivery rate for sub-layer suppression was determined to be 0.08–0.09 L/s·m². A mathematical model built in SolidWorks Flow Simulations was refined to describe the behavior of CAF with varying expansion ratios, including tank wall heating, changes in fire surface temperature, fuel heating throughout the tank height, and foam delivery intensity.

Theoretical and practical foundations of sub-layer tank fire suppression using CAF were further developed, establishing the relationship between fire suppression effectiveness, foam expansion ratio, and delivery pressure. The test setup for simulating tank fires and studying sub-layer suppression with various firefighting agents was also improved. Recommendations were provided to State Emergency Service of Ukraine units regarding the application of sub-layer tank fire suppression systems for flammable liquids. A patent application was submitted for the invention «Method of Sub-Layer Fire Suppression in Petroleum Product Tanks Using Compressed Air Foam.»

Thus, a significant scientific and technical challenge was addressed by developing a sub-layer fire suppression system for vertical steel tanks containing petroleum products (gasoline, diesel fuel).

Keywords: compressed air foam, sub-layer suppression, tank fires, gasoline, diesel fuel, foam expansion ratio, petroleum product tanks.

List of publications of the applicant

Articles in Ukrainian scientific journals included in international scientometric databases:

1. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Sorochych, M. (2021). MEANS OF OBTAINING AND PROSPECTS OF USING COMPRESSION FOAM. *Fire Safety*, 39, 94-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.11>;

2. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). RESEARCH OF STABILITY AND EXPANSION OF COMPRESSION FOAM. *Fire Safety*, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>;

3. Kovalyshyn, V. V., Velykyi, N. R., Kovalyshyn, V. V., Lyn, A. S., Pastukhov, P. V., & Velykyi, A. Y. (2024). RESEARCH OF THE INTENSITY AND MULTIPLICITY OF COMPRESSION FOAM WHEN SUPPLIED IN A «SUB-LAYER» WAY. *Fire Safety*, 45, 10-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.02>;

4. Kovalyshyn, V., & Velykyi, N. (2025). RESEARCH ON SUBSURFACE FIRE SUPPRESSION USING COMPRESSION FOAM IN TANKS WITH PETROLEUM PRODUCTS. *Municipal Economy of Cities*, 1(189), 390–397. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-390-397>.

Articles in a scientific journal included in the Scopus database:

5. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., Bun, R., Novitskyi, Y., & Firman, V. (2024). Devising technology for extinguishing oil tanks using compressed foam by sub-layer technique. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (129), 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684>.

Abstracts of conference presentations confirming the validation of the dissertation materials:

6. Kovalyshyn V., Lozynskyi R., Voitovych T., Kovalyshyn Vol., Velykyi N. Expanding the Scope of Application of Compressed Air Foam. *Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention in Today's Conditions* : Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation. Lviv : LSULS, 2022. pp. 372-374.

7. Velykyi N., Kovalyshyn Vol., Voitovych T., Kovalyshyn V. Development of Safe Methods for Extinguishing Tank Fires Using Compressed Air Foam. *Occupational Safety: Education and Practice. Problems and Prospects of Occupational Safety Development* : Proceedings of the III All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Educators and Practitioners and the XIII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Cadets, Students, Postgraduates, and Adjuncts. Lviv : LSULS, 2023. pp. 159-161.

8. Velykyi N., Lozynskyi R., Kovalyshyn V. Study of Foam Concentrate Consumption in Sub-Surface Delivery of Compressed Air Foam. *Problems and Prospects of Life Safety System Development* : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students. Lviv : LSULS, 2024. pp. 158-160.

9. Velykyi N., Kovalyshyn V., Lozynskyi R., Kovalyshyn Vol. Influence of a «Calming» Nozzle on the Delivery of Compressed Air Foam. *Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention in Today's Conditions* : Abstracts of the International Scientific and Practical Conference. December 13, 2024. Lviv : LSULS, 2024. pp. 161-163.

10. Velykyi N., Kovalyshyn V., Lyn A., Pastukhov P.V. Modeling the Process of Sub-Surface Delivery of Foam Jets in a Heated Gasoline Environment. *Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention in Today's Conditions* : Abstracts of the International Scientific and Practical Conference. December 13, 2024. Lviv : LSULS, 2024. pp. 17-19.

11. Velykyi N., Lozynskyi R., Lyn A., Kovalyshyn V. Study of the Efficiency of Sub-Surface Fire Suppression in Petroleum Storage Tanks Using Compressed Air Foam in Laboratory Conditions. *Problems and Prospects of Life Safety System Development* : Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students. Lviv : LSULS, 2025. pp. 209-212.

12. Voitovych T., Velykyi N., Kovalyshyn V. Study of the Influence of Compressed Air Foam Intensity and Expansion Ratio on the Efficiency of Fire Suppression in Petroleum Storage Tanks. *Problems and Prospects of Life Safety System Development* : Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Cadets, and Students. Lviv : LSULS, 2025. pp. 257-259.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДШАРОВОГО ГАСІННЯ.....	26
1.1. Властивості та особливості застосування компресійної піни.....	26
1.2. Особливості підшарового способу подавання піни при гасінні пожеж у резервуарах з нафтою та нафтопродуктами.....	33
1.3. Вибір піноутворювача для підшарового гасіння.....	36
1.4. Піноутворювачі для гасіння пожеж.....	40
1.5. Аналіз проблем, що стосуються гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами.....	42
1.5.1. Статистика пожеж в резервуарах із зберіганням нафти та нафтопродуктів.....	42
1.5.2. Нафтопереробна галузь. Конструкція резервуарів та їх призначення.....	43
1.5.3. Розвиток пожеж в резервуарах та причини їх виникнення.....	48
1.6. Аналіз наукових досліджень, пов'язаних з компресійною піною.....	55
1.7. Висновки до розділу.....	58
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАСІННЯ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ.....	59
2.1. Опис основних теоретичних положень САПР SolidWorks Flow Simulations.....	59
2.2. Побудова математичної моделі в середовищі SolidWorks Flow Simulations.....	63
2.2.1. Моделювання прогріву палива та резервуара протягом 30 хв.....	63
2.2.2. Визначення об'єму для компенсації розширення бензину.....	71
2.2.3. Моделювання процесу подавання піни.....	72
2.2.4. Визначення впливу температури на процес виходу піни на поверхню горіння.....	76

2.2.5. Подавання піни різної кратності протягом 1500 с.....	78
2.2.6. Визначення кількості піни на дзеркалі горіння.....	84
2.2.7. Подавання піни різної інтенсивності і кратності.....	86
2.2.8. Визначення об'єму додаткового витіснення бензину.....	92
2.3. Висновки до розділу.....	95
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПОДАВАННЯМ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ.....	96
3.1. Визначення параметрів (кратності, стійкості) компресійної піни та її поведінки при взаємодії з ЛЗР.....	96
3.1.1. Визначення стійкості та кратності компресійної піни.....	96
3.1.2. Визначення впливу рідини (дизельне пальне та бензин) на руйнування піни при підшаровому подаванні та при подаванні на поверхню.....	100
3.2.1. Розроблення установки для генерування компресійної піни та проведення дослідження з підшарового гасіння пожеж в макетному резервуарі.....	101
3.2.2. Перевірка адекватності математичної моделі при застосуванні компресійної піни підшаровим способом на прикладі резервуара 0,25 м ³	107
3.3. Горіння макетного резервуара та визначення швидкості прогріву і охолодження пального.....	111
3.4. Висновки до розділу.....	114
РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ І СПОСОБИ ЇЇ ПОДАВАННЯ.....	116
4.1. Схема подавання компресійної піни.....	116
4.2. Особливості застосування компресійної піни.....	118
4.3. Рекомендації щодо коригування деяких нормативних документів та довідників.....	121
4.4. Економічний ефект від впровадження гасіння компресійною піною.....	123
4.5. Висновки до розділу.....	129
ВИСНОВКИ.....	130

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	132
ДОДАТКИ.....	141
ДОДАТОК А – Фізико-механічні параметри компонентів текучого середовища моделі SolidWorks Flow Simulations.....	142
ДОДАТОК Б – Теоретичні дослідження процесу подачі пінних струменів в середовище прогрітого бензину.....	145
ДОДАТОК В – Акт впровадження результатів дисертаційної роботи від 3 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Львівській області.....	154
ДОДАТОК Г – Акт впровадження результатів дисертаційної роботи від Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.....	155
ДОДАТОК Ґ – Лист директору нафтобазового господарство АТ «Концерн Галнафтогаз» про сприяння впровадженню системи підшарового гасіння в резервуарному парку АТ «Концерн Галнафтогаз».....	156
ДОДАТОК Д – Заявка на державну реєстрацію винаходу «Спосіб підшарового гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами компресійною піною».....	158
ДОДАТОК Е – Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ

ГР	горюча рідина
ЛЗР	легкозаймиста речовина
ДП	дизельне паливо
ПАР	поверхнево активні речовини
ПУ	піноутворювач
РВС	резервуар вертикальний сталевий
РР	робочий розчин
КП	компресійна піна
К5	кратність 5
К10	кратність 10
CAF	compressed air foam (компресійна піна)
CAF	compressed air foam system (система отримання компресійної піни)
ГПС	генератор піни середньої кратності

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Гасіння резервуарів з нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо) – складний процес, що потребує великих зусиль та залучення значної кількості ресурсів. Пожежі, що виникають на об'єктах нафтової промисловості, часто розвиваються швидко та можуть тривати довгий час, це створює серйозні загрози для безпеки працівників та рятувальників, які займаються їх ліквідацією.

Це видно із прикладів великих катастроф, які сталися в нафтопереробній галузі. Один із таких випадків стався у Венесуелі на одному з найбільших нафтопереробних заводів «Атусау» 25 серпня 2012 року. Вибух призвів до смерті 48 осіб, а ще 151 людина отримала поранення. Пожежу, яка охопила три великі нафтові резервуари, ліквідовували три дні [1].

Інший жахливий інцидент трапився на одному з підприємств мексиканської нафтової компанії «Ретех» 19 вересня 2012 року. Вогонь швидко поширився, забравши із собою життя 66 людей та залишивши 76 осіб травмованими [2].

Також слід відзначити пожежу на нафтохімічному заводі DeerPark в Техасі, США, що сталася 17 березня 2019 року і тривала 4 дні. У результаті цієї події було знищено десять нафтових резервуарів. Збитки від цієї катастрофи оцінили на майже 1 млрд доларів США, засвідчуючи серйозний вплив подібних інцидентів на економіку та середовище [3].

В час війни в Україні постає питання про захист об'єктів нафтової промисловості. По нафтових резервуарах бувають влучання ракет, внаслідок чого відбувається руйнування резервуарів, вилив нафтопродуктів у великій кількості та небезпека виникнення масштабних пожеж. Пожежі рідин у резервуарах з нафтою і нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо) є одними з найскладніших для гасіння, вони характеризуються величезними матеріальними і екологічними збитками, небезпекою для життя та здоров'я людей [4].

Наслідки однієї з таких ситуацій ми спостерігали 26 березня 2022 року на нафтобазі у Львові по вулиці Пластовій. В цей день по зазначеній нафтобазі, на якій

розташовано 30 резервуарів різних розмірів та об'ємів, завдано ракетного удару зі сторони країни-агресорки. Внаслідок обстрілу сталася пожежа паливно-мастильних матеріалів в межах обвалування через витік палива з пошкоджених 5-ти резервуарів. Загальна площа пожежі становила трохи більше 3000 м². Пожежу загасили тільки через 14 годин. Із засобів пожежогасіння було використано повітряно-механічну піну та воду у великих кількостях. До гасіння пожежі було залучено 45 одиниць техніки, з яких 4 пожежних поїзди та 163 чол. особового складу.

Цей випадок показав, що потрібно впроваджувати нові засоби пожежогасіння або придивитись до тих, які вже певний час активно використовуються закордонними пожежниками. Одним із таких засобів є системи для генерування та подавання компресійної піни, які вже здобули популярність в країнах Європи та США. В Україні такі системи підрозділами ДСНС України не використовуються. Тому розробка систем пожежогасіння компресійною піною та технології застосування відповідає інноваційним напрямкам розвитку ДСНС України [5]. Піногенеруюча система із стисненим повітрям (CAFS) – це система, яка використовується в пожежогасінні для подавання вогнетривкої піни для гасіння пожеж або захисту ділянок, що не горять [6].

Багато досліджень, які охоплюють як теоретичний, так і практичний аспекти, пов'язані з аналізом повітряно-механічних та компресійних пін, було проведено такими вченими, як Виноградов С. А., Федяєв В. Д., Кодрик А. І., Ковалишин В. В., Шахов С. М., Liebson J. L., Colleti D. J. Chen Y., Chen T., Fu X. C., Bao Z. M., Rie D.-H., Lee J.-W. Наукові праці цих авторів присвячені застосуванню вогнегасних пін для гасіння пожеж ЛЗР та ГР, але не достатньо вивченим є застосування саме компресійної піни для підшарового способу гасіння резервуарів з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне), вивчення її властивостей та поведінки в середовищі ЛЗР та ГР.

Отже, питання вивчення та використання компресійної піни для гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) підшаровим способом залишається недостатньо вивченим та потребує подальших досліджень, впровадження відповідних нормативних документів і є актуальною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи «Розроблення системи підшарового гасіння за допомогою компресійної піни» (державний реєстраційний номер №0124U004642) у якій автор брав участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає в покращенні ефективності гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах, призначених для зберігання нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне), шляхом подавання компресійної піни підшаровим способом.

Відповідно до сформульованої мети в дисертації поставлено до вирішення такі задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану пожежогасіння для сталевих вертикальних резервуарів та виявити шляхи його вдосконалення;
2. Теоретично дослідити процес подавання компресійної піни підшаровим способом в резервуар;
3. Визначити вогнегасні параметри компресійної піни для підшарового гасіння;
4. Провести експериментальні дослідження системи гасіння компресійною піною підшаровим способом;
5. Розробити схеми подавання компресійної піни в РВС;
6. Надати рекомендації до нормативних документів з питань подавання компресійної піни.

Об'єкт дослідження – процеси припинення горіння під час гасіння пожеж у сталевих вертикальних резервуарах для зберігання нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) із застосуванням піноутворювачів загального призначення, що забезпечують генерування компресійної піни підшаровим способом.

Предмет дослідження – чинники, які впливають на процес гасіння пожеж в сталевих вертикальних резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) підшаровим способом за допомогою компресійної піни.

Методи досліджень. В роботі використано комплексний метод дослідження, який включає: аналіз новітніх розробок у сфері вдосконалення методів та обладнання для гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне); метод

обробки статистичних даних; метод вогневих полігонних та лабораторних випробувань; методи планування експерименту; методи математичного моделювання для теоретичного визначення параметрів подавання затоплених струменів піни низької кратності в резервуарі із прогрітим паливом, які будуть оптимальними для транспортування піни через товщу пального на його поверхню, з метою гасіння пожежі на поверхні дзеркала горіння.

Експерименти виконувалися із застосуванням метрологічно сертифікованого обладнання та перевірених засобів вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розкритті особливостей гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо) шляхом використання компресійної піни підшаровим способом.

Вперше:

- обґрунтовано та експериментально підтверджено на макетних пожежах можливість використання компресійної піни для підшарового гасіння РВС з паливом з використанням піноутворювачів загального призначення та визначена інтенсивність подавання компресійної піни підшаровим способом не менше $0,08-0,09 \text{ л/с} \times \text{м}^2$;

- обґрунтовано необхідний резервний об'єм резервуара не менше 13% внаслідок розширення пального при нагріванні під час пожежі;

Удосконалено:

- математичну модель, побудовану в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations, процесу подавання компресійної піни різної кратності шляхом визначення її поведінки: прогрівання стінок резервуара, зміни температури на поверхні горіння, прогрівання бензину на висоті резервуара, інтенсивність подавання піни.

Набули подальшого розвитку:

- теоретичні та практичні основи гасіння резервуарів підшаровим способом, а саме компресійною піною, та встановлено залежність гасіння пожежі резервуара від кратності піни та тиску подавання.

- випробувальна установка імітації горіння резервуара для дослідження гасіння підшаровим способом для різних вогнегасних речовин.

Практичне значення і реалізація одержаних результатів. Удосконалена математична модель, методи випробувань та експериментальна установка дали змогу підвищити ефективність підшарового способу гасіння резервуарів з ЛЗР за допомогою використання компресійної піни, яка згенерована з робочого розчину піноутворювача «Барс S-2». Результати досліджень слугують основою для подальшого вдосконалення нормативної бази щодо підшарового гасіння пожеж в резервуарах.

Запропоновані параметри системи підшарового гасіння за допомогою компресійної піни є основою для впровадження у практику пожежогасіння ЛЗР підрозділами ДСНС України. Результати роботи впроваджено через застосування підшарового методу подавання компресійної піни в полігонних умовах на макетному резервуарі з використанням запропонованих нормативних інтенсивностей як спосіб підвищення ефективності гасіння резервуарів із нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне).

Результати дисертаційної роботи було впроваджено у навчальний процес Львівського державного університету безпеки життєдіяльності у викладанні дисциплін «Особливості організації гасіння пожеж на об'єктах критичної інфраструктури», «Розбір пожеж» та «Сучасні методи та підходи організації гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій» зі слухачами інституту післядипломної освіти, які проходять курси підвищення кваліфікації за освітніми програмами «Основи організації ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій», «Управління силами і засобами під час реагування на надзвичайні ситуації» та «Організація взаємодії підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та інформаційне забезпечення»

У лекційних курсах навчальних дисциплін застосовані теоретичні основи та методичні підходи дисертаційного дослідження, присвяченого гасінню пожеж у резервуарах із легкозаймистими рідинами за допомогою компресійної піни, поданої підшаровим способом, зокрема з використанням установки для створення та подавання компресійної піни під шар нафтопродукту (бензин, дизельне пальне).

Особистий внесок автора полягає у постановці мети та завдань дослідження, аналізі вітчизняної та зарубіжної літератури, формуванні науково-прикладної проблеми у галузі пожежної безпеки, визначенні об'єкта і предмета дослідження, а також у плануванні, проведенні лабораторних і полігонних експериментів та узагальненні отриманих результатів. Особистий внесок у наукових працях, опублікованих за співавторством, відображено в дисертації, зокрема: у роботі [1] досліджено особливості застосування компресійної піни в системах CAFS для гасіння пожеж нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) підшаровим способом та її ефективність порівняно з традиційними методами. Проведено аналіз світового досвіду, експериментальні випробування та порівняння витрат часу і вогнегасних речовин, що підтверджують переваги компресійної піни; у роботі [2] досліджено стійкість і кратність компресійної піни, згенерованої на основі піноутворювача «Барс S-2», при взаємодії з дизельним паливом і бензином за умов поверхневого та підшарового подавання; у роботі [3] досліджено вплив інтенсивності подавання та кратності компресійної піни на ефективність підшарового гасіння пожеж нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) у резервуарах об'ємом 5000 м³ за допомогою програмного продукту SolidWorks Flow Simulations. Проведено порівняльний аналіз витрат піноутворювача, часу гасіння, а також визначено необхідний резервний об'єм резервуара; у роботі [4] досліджено ефективність підшарового гасіння пожежі бензину компресійною піною в макетному резервуарі об'ємом 250 л за допомогою розробленої експериментальної установки для генерування та подавання компресійної піни; у роботі [5] досліджено процес підшарового гасіння пожеж нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) у резервуарах за допомогою піни низької кратності. Удосконалено математичну модель руху затоплених пінних струменів у середовищі прогрітого бензину використовуючи програмне забезпечення SolidWorks Flow Simulations. Проведено теоретичне моделювання для аналізу поведінки піни, зокрема її підйому через шар пального, ізоляційних та охолоджувальних властивостей, а також впливу кратності піни на ефективність гасіння; у роботі [6] досліджено застосування компресійної піни для гасіння пожеж класів А і D, її переваги порівняно з повітряно-механічною піною; у

роботі [7] досліджено ефективність підшарового гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою компресійної піни. Проведено експеримент на малогабаритній установці, який підтвердив, що компресійна піна швидко покриває поверхню, перешкоджає горінню та залишається стійкою; у роботі [8] досліджено витрати розчину піноутворювача при підшаровому гасінні компресійною піною в лабораторних умовах за різних тисків та встановлено, що компресійна піна має добру кратність і розтікання по поверхні бензину, але при тиску понад 5 МПа відбувається збурювання та виливання бензину; у роботі [9] досліджено вплив «насадки-заспокоювача» на подавання компресійної піни для гасіння пожеж. Встановлено, що насадка, яка виготовлена з нержавіючої сталі, забезпечує генерування густої піни низької кратності з високою стійкістю та адгезією; у роботі [10] досліджено процес подавання пінних струменів підшаровим способом у середовище прогрітого бензину шляхом моделювання в SolidWorks Flow Simulations та встановлено, що ефективність підшарового гасіння пожежі у резервуарі залежить від температури прогрітого бензину, чим швидше розпочнеться процес гасіння пожежі, тим вищою буде ефективність; у роботі [11] досліджено ефективність підшарового гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензином) за допомогою компресійної піни в лабораторних умовах. Використовувався макетний резервуар об'ємом 0,25 м³ та експериментальна установка для генерування піни. Встановлено що підшарове гасіння компресійною піною є ефективним та економічним способом для гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне); у роботі [12] досліджено вплив інтенсивності подавання та кратності компресійної піни (K5 і K10) на ефективність підшарового гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензином) об'ємом 5000 м³. За допомогою моделювання в SolidWorks Flow Simulations встановлено, що піна K10 забезпечує швидше гасіння та менші витрати піноутворювача ніж піна K5. Також встановлено, що подавання піни K10 потребує резервного об'єму резервуара ~13%.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на науково-технічних радах та наукових семінарах Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, а також на науково-практичних

конференціях: Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (2022); III Всеукраїнська науково-практична конференція викладачів та фахівців-практиків «Охорона праці: освіта і практика» та XIII Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів «Проблеми та перспективи розвитку охорони праці»; Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення»; XIX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»; XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності»

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано у 12 наукових працях, з них 4 статті – у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у науковому журналі, який входить до бази даних Scopus та 7 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (82 найменувань) та 7 додатків. Загальний об'єм дисертації становить 165 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ПІДШАРОВОГО ГАСІННЯ

1.1. Властивості та особливості застосування компресійної піни

Компресійна піна – це однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, отримана шляхом змішування піноутворювача, води та стиснутого повітря або азоту [7].

Технологія використання компресійної піни в пожежогасінні почала застосовуватися понад три десятиліття тому. Компресійна піна ефективно ліквідує пожежі класів А і В та є універсальною у використанні. Основна відмінність систем CAFS (compressed air foam system) від повітряно-механічних полягає в тому, що компресійна піна створюється в спеціальних пінозмішувачах. Цей процес дозволяє подавати готову піну на значні відстані за допомогою тиску повітря від компресора або балона. Така властивість особливо цінна під час гасіння пожеж у висотних будівлях або спорудах із підвищеною поверховістю. При використанні цієї піни, завдяки низькому вмісту рідинної фази, зменшуються побічні матеріальні збитки від гасіння пожеж житлових будинків. Компресійна піна має більший відсоток дрібних бульбашок у порівнянні із звичайною повітряно-механічною піною в однаковому об'ємі піни. Також існує певна гіпотеза, що цей вид піни може використовуватись для подавання на поверхню горючої рідини, а також використовуватись для підшарового гасіння резервуарів нафти та нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне). Використання компресійної піни підшаровим способом, як і подаванням на поверхню, не вивчене в Україні та за її межами, відсутні відповідні нормативні документи [8].

Ряд авторів відзначає, що порівняно з традиційними засобами пожежогасіння КП має такі переваги [8-13]:

- формування компресійної піни відбувається безпосередньо біля насосної установки, що знижує енергетичні витрати на її транспортування до місця пожежі;

- компресійну піну можна подавати на значні відстані, включно з вертикальними (до 400 м);

- компресійна піна має високу структурну щільність, компактність і складається з численних однорідних пухирців. Співвідношення маси до поверхні сприяє ефективній теплопередачі, забезпечуючи значний охолоджувальний ефект для нагрітих поверхонь;

- завдяки формуванню піни за допомогою стисненого повітря, вона отримує додаткову енергію для доставки в осередок пожежі. На відміну від води, дрібні краплі піни не випаровуються під час транспортування, що значно підвищує ефективність використання вогнегасної речовини;

- для подавання компресійної піни не потрібні спеціальні пристрої — можна використовувати стандартні насоси, рукави та пожежні стволи. Пожежні рукави, заповнені компресійною піною, значно легші, що підвищує маневреність вогнеборця;

- компресійна піна може мати як підвищений вміст рідкої фази для посилення охолоджувального ефекту, так і знижений вміст рідкої фази, що покращує адгезію, дозволяючи використовувати її для вогнезахисту вертикальних поверхонь і гасіння електрообладнання під напругою;

- знижений вміст рідкої фази зменшує прямі збитки під час гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях і на горищах, запобігаючи затопленню нижніх поверхів.

Додатково, до недоліків такого типу піни можна віднести факт, що в практичній діяльності було зафіксовано кілька випадків руйнування рукавів, наповнених компресійною піною, у високотемпературних умовах пожежі. Це сталося через нагрівання та розширення повітря у піні [14].

Технологія генерування компресійної піни вперше була використана в Данії у 1932 році для гасіння пожеж на кораблях. Її ефективність отримала високу оцінку, що призвело до її застосування у Військово-морських силах США з 1944 року. Сьогодні компресійну піну застосовують для гасіння пожеж класів А, а також на об'єктах, де затоплення водою є небажаним, а потрібна піна з високою адгезією. Основним недоліком цієї технології є висока вартість систем для створення компресійної піни,

яка може сягати десятків тисяч доларів США, що обмежує її широке застосування. Схема генерування компресійної піни представлена на рисунку 1.1 [15].

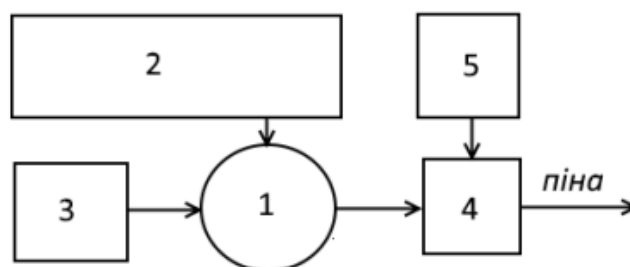


Рис. 1.1. Схема отримання компресійної піни: 1 – насос; 2 – цистерна для води; 3 – ємність з піноутворювачем; 4 – пінозмішувач; 5 – компресор (балони зі стисненим повітрям)

Компресійна піна характеризується високою структурованістю, компактністю і складається з численних однорідних пухирців (рис. 1.2). Співвідношення маси до поверхні сприяє ефективній теплопередачі, забезпечуючи значний охолоджувальний ефект. Крім того, компресійна піна значно легша, що підвищує маневреність пожежного та дозволяє швидше змінювати позицію. Завдяки низькому вмісту рідкої фази використання цієї піни зменшує супутні матеріальні збитки під час гасіння пожеж у житлових будинках [16].

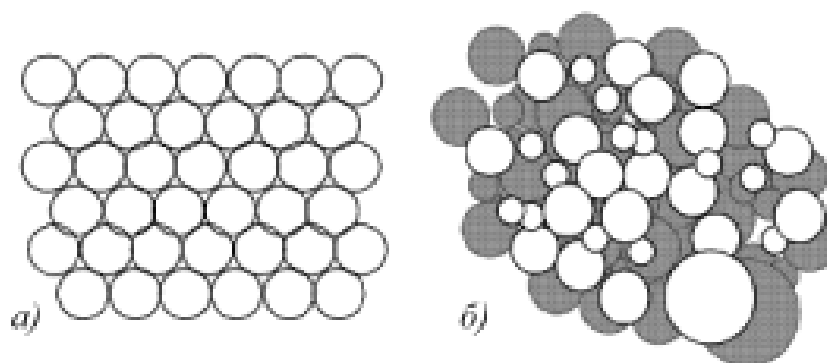


Рис. 1.2. Структура компресійної піни (а) та повітряно-механічної піни (б)

Станом на сьогодні багато провідних європейських країн та США мають спеціальні пожежні автомобілі, які обладнані системою генерування та подачі компресійної піни. У США навіть діє закон, згідно з яким, зменшуються страхові внески мешканців штату, якщо пожежні підрозділи використовують для гасіння пожежні автомобілі з CAFS [12].

За своїми фізичними параметрами (кратністю) компресійна піна поділяється на 3 види [17]:

- «мокра». Найчастіше застосовується для гасіння пожеж назовні приміщень;
- «рідка». Найчастіше застосовується для гасіння пожеж в приміщеннях;
- «суха». Застосовується для вогнезахисту поверхонь (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Види компресійної піни

Компресійна піна має вигляд легкої однорідної коміркової маси білого кольору. Завдяки адгезійним властивостям цей вид піни досить стійко тримається практично на будь-яких поверхнях, в тому числі і на вертикальних.

Одним з найбільших світових виробників систем для генерування та подачі компресійної піни є австрійська фірма Rosenbauer, яка в своїй виробничій лінійці представляє досить широкий асортимент зазначених систем [18].

- CAFSMOBILE – мобільна, переносна установка, яка може використовуватись на будь-якій пожежній автоцистерні. Ця система є доволі компактною та не займає багато місця в автомобілі. Підходить для гасіння пожеж класу А, В та для

превентивного захисту об'єктів, схильних до ризику займання, шляхом нанесення компресійної піни (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Система CAFS MOBILE

- FLASH CAFS 30-400 – стаціонарна установка генерування та подачі компресійної піни, яка здебільшого використовується на аеродромних автомобілях. Ця система розроблена спеціально для різних типів лафетних стволів та за короткий час може подати велику кількість піни (залежно від розходу ствола) на далеку відстань (до 400 м) (рис. 1.5).

Система FLASH CAFS 30-400 має ряд певних особливостей:

- використання будь-якого вбудованого насоса, а також систем попереднього змішування піни або дозування піни під тиском;
- зручне керування через систему логічного контролю (LCS), що забезпечує швидкий і простий запуск роботи CAFS;
- придатність для прямого гасіння пожеж твердих і рідких матеріалів, а також для профілактичного захисту об'єктів, схильних до займання, за допомогою піни CAF;
- економний і простий процес гасіння завдяки піні CAF, яка прилипає до осередку вогню та випаровується з гарячих поверхонь;

- приблизно на 20% більша дальність і висота подавання порівняно з повітряно-механічною піною;
- вища точність і краща видимість у порівнянні з повітряно-механічною піною.



Рис. 1.5. Система FLASH CAFS 30-400

SKYCAFS – система для генерування та подавання компресійної піни для гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях. Може подавати піну на кілька сотень метрів вгору. Ця система може забезпечити ефективне гасіння пожежі для більш як 90% висотних будівель у світі. Також систему SKYCAFS можна використати для гасіння резервуарів при подачі піни на поверхню (рис. 1.6).

Система SKYCAFS має такі особливості:

- використання будь-якого вбудованого насоса, а також потужної системи дозування піни DIGIMATIC;
- зручне управління за допомогою LCS (Logic Control System), а також легкий і швидкий запуск роботи CAFS шляхом активації трьох кнопок;
- підходить для прямого гасіння твердих і рідких пожеж, а також для профілактичного захисту об'єктів, які піддаються ризику загоряння шляхом застосування піни CAF;
- виняткова довжина та висота транспортування (до 400 метрів) завдяки рукавам, заповненим піною CAF;

- велика безпечна відстань між пожежником і вогневим об'єктом, а також гасіння пожежі у важкодоступних місцях завдяки високій дальності кидка та висоті викиду піни CAF;

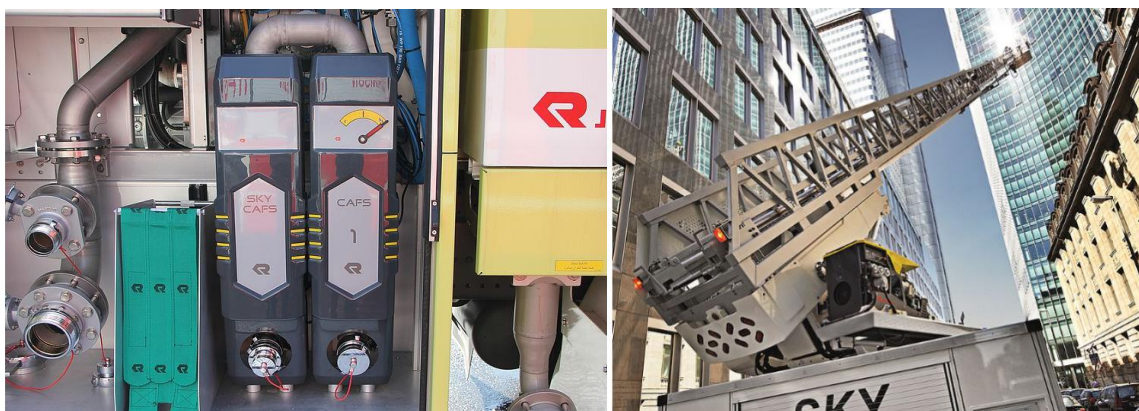


Рис. 1.6. Система SKYCAFS

В патенті США № US 6357532 B1 і US 6276459 B1 [19, 20] розробник пропонує Т-подібну камеру змішування (рис. 1.7), яка є дуже простою та легкою в обслуговуванні.

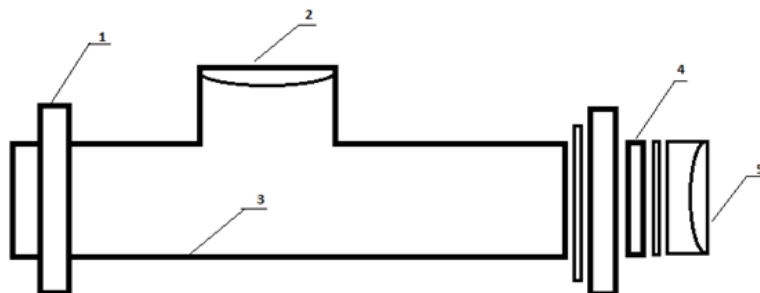


Рис. 1.7. Т-подібна камера змішування: 1 – з'єднувальний пристрій з ємністю для води та ПУ; 2 – отвір для подачі повітря; 3 – змішувальний трубопровід; 4 – сітчастий екран; 5 – з'єднувальний пристрій з рукавом

Процес змішування розчину піноутворювача, повітря і виходу готової КП зображено на рис. 1.8.

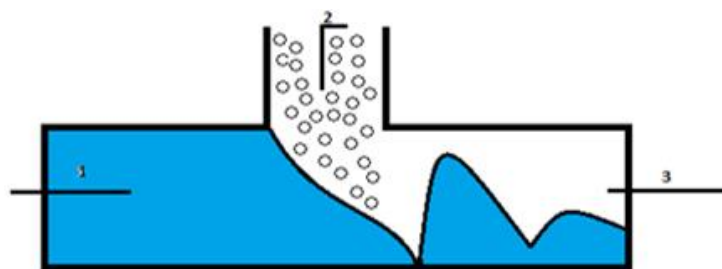


Рис. 1.8. Процес змішування розчину ПУ (1), повітря (2) і виходу готової піни (3) в Т-подібній камері змішування

1.2. Особливості підшарового способу подавання піни при гасінні пожеж у резервуарах з нафтою та нафтопродуктами

Крім традиційного способу гасіння резервуарів, використовується також метод підшарового пожежогасіння, який можливий лише за наявності відповідної системи підшарового гасіння в резервуарах.

Цей метод має перевагу над традиційним, оскільки піна подається знизу, що захищає піногенератори та пінопроводи від впливу вибухів пароповітряних сумішей. При застосуванні підшарового способу піна низької кратності вводиться під шар нафтопродукту через пінопровід, розташований у нижній частині резервуара, за допомогою мобільної пожежної техніки. Для цього методу необхідні спеціальні піноутворювачі, стійкі до нафтопродуктів, які здатні формувати захисну плівку на поверхні горючої рідини.

З початком виробництва плівкоутворювальних ПУ з'явилися перспектива в освоєнні підшарового способу гасіння пожеж в резервуарах із подаванням піни безпосередньо в шар пального. Дослідження такого способу гасіння розпочалися у США у 1972 році, пізніше до досліджень у цій галузі приєдналися Велика Британія та багато інших країн, в тому числі і Україна [21].

Впровадження способу подавання піни під шар нафтопродукту в розвинених країнах Європи та США почалось ще в 70-х роках XX століття [22-24].

Також, необхідно зазначити, що підшаровий спосіб подавання піни на основі ПУ загального призначення було розроблено ще в 60-х роках XX століття в СРСР [21].

В Україні перша система підшарового пожежогасіння була введена на нафтоперекачувальній станції (НПС) «Кременчук» ДАТ «Придніпровські магістральні нафтопроводи» для захисту резервуарів з нафтою об'ємом 10 000 м³. Розробку системи провели фахівці ВАТ «Інститут транспорту нафти». У цій системі використана передова на той час автоматизована система дозування ПУ, з використанням резервуарів з еластичним балоном та дозаторів широкого діапазону виробництва компанії «SvenskaSkum» [4].

Введена на об'єкті система автоматизації передбачала [4]:

- централізований контроль та управління процесом пінного пожежогасіння з диспетчерського пункту на об'єкті;
- підвищення ефективності роботи системи та зменшення матеріальних втрат під час пожежі завдяки швидкому наданню інформації та автоматизації процесу гасіння;
- подовження періодичності технічного обслуговування та скорочення часу на ремонт технічних засобів автоматичної системи пожежогасіння.

Автоматизована система забезпечувала повну автоматизацію збору даних, а також виконання завдань контролю й управління процесом пінного гасіння на об'єктах НПС «Кременчук». Система пройшла успішні випробування та була введена в експлуатацію.

Спосіб підшарового гасіння пожеж у резервуарах має такі переваги [4]:

- система підшарового гасіння дозволяє усунути горіння в резервуарі незалежно від руйнування верхнього поясу чи наявності закритих ділянок зверху;
- ефективність цієї системи мало залежить від тривалості розвитку пожежі та температури нагрівання нафти чи нафтопродуктів під час горіння;
- при підшаровому гасінні вся піна спрямовується всередину резервуара, що зменшує витрату піноутворювача (ПУ);
- система підшарового гасіння добре поєднується з технологією газового пожежогасіння;
- використання цієї системи дозволяє збільшити корисний об'єм резервуара;

- під час пожежі обладнання системи підшарового гасіння практично не зазнає пошкоджень від вибухів чи теплових потоків;

- ефективність підшарового методу майже не залежить від погодних умов (вітру, опадів).

Метод підшарового гасіння не слід використовувати для гасіння [4]:

- водорозчинних рідин, таких як спирти, складні ефіри, кетони, альдегіди та інші рідини, для яких потрібні спеціальні піноутворювачі (ПУ типу «AR»), придатні для їх гасіння;

- горючих рідин (ГР), що зберігаються за температур вище 80°C та/або з кінематичною в'язкістю $100 \text{ мм}^2/\text{с}$ і більше [25].

Також метод підшарового гасіння не застосовується для протипожежного захисту:

- резервуарів із нафтою та нафтопродуктами, динамічна в'язкість яких за найнижчої температури зберігання перевищує $0,4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (наприклад, деякі марки мазуту, мастила, горючі бітуми);

- технологічних установок, де зберігаються рідини, нагріті до температури вище 90°C .

У будівельних нормах [26] розглядаються вимоги, пов'язані з забезпеченням пожежної безпеки на складах, де здійснюється зберігання нафти та нафтопродуктів. На таких об'єктах рекомендується встановлювати автоматичні стаціонарні системи пожежогасіння, зазвичай для гасіння пожежі в наземних резервуарах з номінальним об'ємом 5000 м^3 і більше. Крім того, в резервуарних парках слід забезпечити системи пожежогасіння повітряно-механічною піною середньої кратності. Використання пожежогасіння піною з низькою кратністю допускається для резервуарів під час її подавання на шар нафти або нафтопродукту.

У системі підшарового гасіння резервуара рекомендується враховувати наявність трубопроводів для подачі РР з плівкоутворювального ПУ до високонапірних піногенераторів. Цей розчин подається через пінопроводи з низькократною плівкоутворювальною піною за допомогою зворотного клапана на запобіжну розривну мембрану. Після цього, через засувку біля стінки резервуара,

розчин надходить всередину, безпосередньо в нафту або нафтопродукт, використовуючи пінну насадку, яка зменшує швидкість потоку емульсованої піни через нафту і нафтопродукти.

Принципова схема генерування і подавання піни представлена на рисунку 1.9 [27].

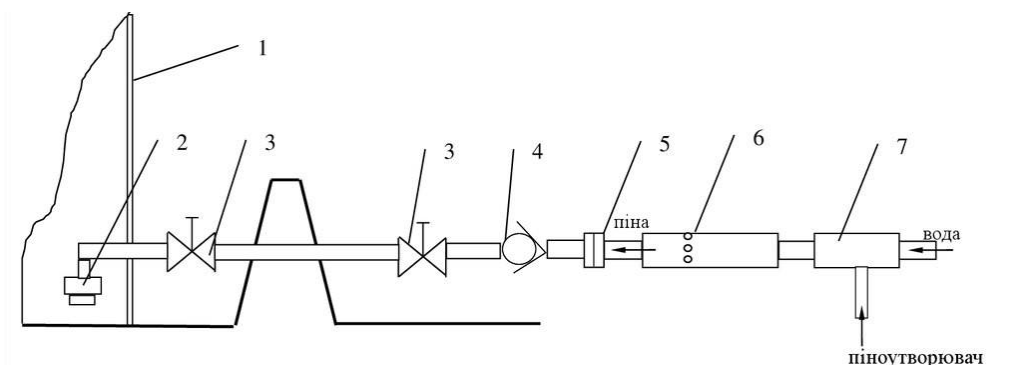


Рис. 1.9. Схема системи підшарового пожежогасіння з використанням незалежного пінопроводу для подавання піни під шар продукту: 1 – резервуар; 2 – дифузор; 3 – засувки; 4 – зворотній клапан; 5 – мембрана; 6 – піногенератор; 7 – пінозмішувач

1.3. Вибір піноутворювача для підшарового гасіння

Щороку в Україні зростає важливість вирішення проблеми ліквідації пожеж, зокрема, необхідність забезпечити належну пожежну безпеку в нафтопереробній промисловості. Резервуарні парки слугують ключовими об'єктами для зберігання нафтопродуктів та сирової нафти на перевалочних і розподільних нафтобазах, нафтопереробних підприємствах та на підприємствах залізничного, водного, автомобільного, повітряного транспорту. Збільшуються обсяги виробництва та використання нафти та нафтопродуктів. Концентрація ЛЗР та ГР на обмеженій площі резервуарного парку призводить до значного зростання пожежної небезпеки на таких об'єктах. Таким чином, необхідно забезпечити пожежну безпеку під час транспортування, зберігання та використання нафтопродуктів. Розлив та загорання нафтопродукту є однією з найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, які можуть

спричинити не лише значні матеріальні збитки, але й втрати людських життів. Ця проблема загострюється через економічні тенденції до переходу на резервуари більшого об'єму, що призводить до збільшення кількості горючих рідин, які зберігаються на одиницю площі. Це, в свою чергу, збільшує ризик розповсюдження пожежі на сусідні резервуари у випадку відсутності вчасної локалізації та припинення поширення площі горіння. Необхідність зниження збитків від пожеж в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів призвела до вивчення більш ефективних засобів гасіння в нафтопереробній сфері, а саме – вогнегасною піною. Залежно від об'єкта зберігання нафтопродуктів використовуються різні види піноутворювача та піни різної кратності.

Піноутворювач (ПУ) – це речовина, яка при змішуванні з водою у певних пропорціях формує робочий розчин, здатний генерувати піну за допомогою спеціального обладнання, а також змочувальний розчин.

Піна – це просторова плівково-чарункова структура системи типу газ-рідина, що характеризується стійкістю і кратністю.

Кратність піни – це співвідношення об'єму отриманої піни до об'єму робочого розчину піноутворювача, з якого вона була сформована.

Піна низької кратності – піна у якої кратність не перевищує 20.

Піна середньої кратності – піна у якої кратність становить від 21 до 200.

Піна високої кратності – піна у якої кратність перевищує 200.

Стійкість піни – це здатність піни до збереження своєї структури протягом певного часу.

Робочий розчин піноутворювач (РР ПУ) – це розчин піноутворювача заданої концентрації у воді, який забезпечує формування піни з необхідною кратністю та вогнегасними властивостями при використанні спеціального обладнання під час випробувань.

Змочувальний розчин піноутворювача (ЗР ПУ) – розчин піноутворювача певної концентрації у воді, що має відповідний показник змочувальної здатності [28, 29].

Піноутворювачі для гасіння пожеж поділяються на дві класифікаційні групи залежно від їхніх властивостей, а також об'єктів і умов застосування: піноутворювачі

загального призначення та піноутворювачі спеціального призначення. Перелік показників якості піноутворювачів, технічні вимоги та методи їх випробувань визначено стандартами [28, 29].

За здатністю до біологічного розкладання під впливом мікрофлори водойм і ґрунтів піноутворювачі поділяються на біологічно «м'які» (з рівнем біорозкладання 80% і вище) та біологічно «жорсткі» (з рівнем біорозкладання нижче 80%) [30, 31].

Основу піноутворювачів (ПУ) становлять поверхнево-активні речовини (ПАР), які забезпечують здатність до утворення піни, зниження поверхневого натягу водних розчинів, а також можуть сприяти формуванню плівки на поверхні горючих рідин, що зменшує випаровування горючих парів. У рецептури ПУ зазвичай додають компоненти, які забезпечують відповідність показників якості нормативним вимогам або надають спеціальних властивостей, наприклад, підвищену стійкість до низьких температур. Як розчинник у ПУ використовується вода, а в окремих випадках для покращення розчинності компонентів і забезпечення однорідності складу при низьких температурах додають неорганічні або органічні речовини. За хімічним складом ПУ поділяються на ті, що виготовлені з синтетичної сировини, та ті, що вироблені переважно з природної сировини (з додаванням синтетичних ПАР чи інших хімічних речовин або без них) [21].

Умовні позначення основних типів піноутворювачів (ПУ) для гасіння пожеж:

- «Р» (protein) – білкові (протеїнові) ПУ, виготовлені на основі гідролізованих білків (протеїнів);
- «FP» (fluoroprotein) – фторбілкові (фторпротеїнові) ПУ, що базуються на гідролізованих білках із додаванням синтетичних фторвмісних поверхнево-активних речовин (ПАР);
- «FFFP» (filmforming fluoroprotein) – плівкоутворювальні фторбілкові ПУ, тобто ПУ на основі гідролізованих білків із синтетичними фторвмісними ПАР, які забезпечують утворення плівки на поверхні водних розчинів ПУ;
- «S» (synthetic) – синтетичні ПУ, створені на основі вуглеводневих ПАР;

- «AFFF» або «A3F» (aqueous film forming foam) – плівкоутворювальні фторсинтетичні ПУ, виготовлені на основі синтетичних фторвмісних ПАР (можуть включати також вуглеводневі ПАР).

Позначення «AR» (alcohol resistant) або «ATC» (alcohol type concentrate), додане до будь-якого типу ПУ (наприклад, «FFFP AR», «S AR», «AFFF/ATC»), вказує на придатність ПУ для гасіння як водонерозчинних, так і водорозчинних горючих рідин (ГР). До водонерозчинних ГР належать нафта, бензин, гас, мазут, мастила, бензол, циклогексан тощо, а до водорозчинних – спирти, органічні кислоти, альдегіди, кетони, розчинники для лакофарбової промисловості [21].

Піноутворювачі загального призначення виробляються на основі синтетичних вуглеводневих поверхнево–активних речовин (ПАР) і добавок, зазвичай без вмісту фторвмісних компонентів. Вони придатні для створення піни низької, середньої та високої кратності, а також змочувальних розчинів. Такі ПУ використовуються для гасіння пожеж класів А і В відповідно до [28], тобто твердих горючих матеріалів (окрім тих, що вступають у хімічну реакцію з водою) та водорозчинних горючих рідин [21].

Склад ПУ спеціального призначення розробляється таким чином, щоб забезпечити їм специфічні властивості, відсутні у ПУ загального призначення, зокрема підвищену стійкість піни до зневоднення, знижену швидкість руйнування піни під впливом водонерозчинних чи водорозчинних горючих речовин або теплового випромінювання полум'я, покращену морозостійкість, сумісність із морською водою, здатність до утворення плівки [21].

Зазвичай піноутворювачі (ПУ) спеціального призначення коштують дорожче, ніж ПУ загального призначення. Їх економічно виправдано використовувати на об'єктах із підвищеним рівнем небезпеки. Застосування ПУ спеціального призначення, які відповідають стандарту [29], для гасіння пожеж на промислових підприємствах, де не використовуються значні обсяги нафти, нафтопродуктів, органічних розчинників чи водорозчинних горючих рідин, доцільне лише за відсутності ПУ загального призначення. Це стосується як гасіння піною, так і використання змочувальних розчинів.

1.4. Піноутворювачі для гасіння пожеж

За різними відомостями, перші спроби використання піни для гасіння пожеж датуються кінцем XIX - початком XX століття. Особливо, в першу чергу, піну почали використовувати для гасіння пожеж, пов'язаних з нафтою і нафтопродуктами. У той час використовували два методи генерування піни: «хімічний» і «механічний». Для отримання хімічної піни водний розчин соди, який містив невелику кількість добавки для спінювання, змішували з підкисленою водою. Це змішування водних розчинів призводило до утворення піни, яка використовувалася для гасіння вогню. Для отримання механічної піни, водний розчин неорганічної солі, яка мала здатність до спінювання, насичували газом (який не підтримував горіння), та під тиском нагнітали в герметичну посудину. Під час випускання рідини з посудини утворювалася піна, яку можна було використовувати для покриття палаючої поверхні та її охолодження. У перші роки спеціальні заряди, які були придатними для генерування піни, використовувалися для заряджання вогнегасників. Пізніше були винайдені так звані піногенераторні порошки, які дозволили генерувати та подавати піну для гасіння з пересувної протипожежної техніки. Проте через ряд недоліків піногенераторні порошки були заміщені піноутворювачами – рідкими речовинами, використання яких дозволило підвищити розширити тактичні можливості протипожежної техніки та ефективність пожежогасіння. Спочатку піноутворювачі виробляли з природної сировини, зокрема з відходів переробки тваринної продукції. Пізніше для цієї мети стали використовувати синтетичну сировину. В даний час піноутворювачі виготовляються як з природної, так і з синтетичних речовин. Піноутворювач складається з ПАР певної хімічної природи, які забезпечують утворення піни, а також з добавок, спрямованих на надання необхідних властивостей (таких як знижена корозійна активність, однорідність, здатність до гасіння полярних горючих рідин, морозостійкість) та води або комбінування води з певним органічним розчинником [32-34].

Перелік показників якості піноутворювачів, їхні технічні вимоги та методи випробувань визначаються міжнародними, регіональними і національними

стандартами, а також нормативними документами, що стосуються конкретного піноутворювача.

Повітряно-механічну піну, яка використовується для гасіння, генерують за допомогою стволів-генераторів піни, відомих як піногенератори. У стаціонарних системах пожежогасіння цю піну створюють, подаючи робочі розчини піноутворювачів через насадки спеціальних конструкцій, які називають пінні зрошувачі. Залежно від особливостей об'єкта захисту або пожежі, типу піноутворювача та наявних можливостей, можуть використовуватись генератори піни низької, середньої або високої кратності. При використанні пінних зрошувачів може утворюватись лише піна низької кратності, яка досягається шляхом змішування робочого розчину піноутворювача з повітрям всередині або поза межами насадки [35].

Існують два метода подавання піни на гасіння: «м'який» та «жорсткий». «Жорсткий» метод передбачає потрапляння піни на поверхню, що горить, і є найбільш поширеним. «М'який» метод передбачає плавне спливання піни на поверхню, що горить, з іншої поверхні. Прикладом подавання піни «м'яким» методом є її скерування на стінку резервуара, де зберігається водорозчинна горюча рідина. При плавному піднятті піни вздовж стінки резервуара на поверхню полярної горючої рідини її руйнування сповільнюється, що підвищує ефективність гасіння пожежі [35].

Не допускається застосування піни, яка згенерована із змочувальних розчинів, а також робочих розчинів піноутворювачів, для:

- гасіння хімічних речовин, які виділяють значну кількість кисню або інших окисників, здатних підтримувати горіння, оскільки піна в подібних випадках неефективна;
- гасіння незахищеного електрообладнання, яке перебуває під напругою, через можливість ураження електричним струмом;
- гасіння металів, у тому числі горючих, а також сплавів металів або інших речовин, які вступають у хімічну взаємодію з водою.

Вибір піноутворювача необхідно проводити, враховуючи його характеристики, які забезпечують сумісність із обладнанням систем пінного або водяного

пожежогасіння (зокрема, стволи-генератори піни, пінні зрошувачі, пінозмішувачі, дозувальні пристрої тощо). Важливо також звертати увагу на якість води, яка буде використовуватися для приготування робочого розчину піноутворювача. Висока твердість води або високий вміст мінеральних солей можуть негативно вплинути на піноутворювальні властивості розчинів та вогнегасну ефективність піни, яка буде згенерована. Тому важливо підбирати піноутворювачі з урахуванням властивостей води, що буде використовуватися, щоб забезпечити оптимальну ефективність системи пожежогасіння.

1.5. Аналіз проблем, що стосуються гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами

1.5.1 Статистика пожеж в резервуарах із зберіганням нафти та нафтопродуктів

Пожежі, що виникають у резервуарах з нафтою та нафтопродуктами, зазвичай є складними та масштабними і вимагають значних зусиль для їх ліквідації. Ці пожежі завдають великої шкоди та часто призводять до людських жертв. Згідно із статистичними даними, у США в резервуарних парках щорічно виникає 20 пожеж, у Японії щорічно виникає 1 пожежа. [36-38].

Аналіз статистичних інформаційних даних, що стосуються випадків виникнення пожеж у резервуарах на території колишнього Радянського Союзу, включаючи період останніх 15–20 років, представлений у роботах [39-41].

На підставі цього аналізу зроблено висновок, що більше 90% всіх випадків пожеж припадає на сталеві вертикальні резервуари. Приблизно половина цих пожеж стосується резервуарів, у яких зберігається бензин. Від третини до чверті пожеж зафіксовано в резервуарах із нафтою. Частина пожеж з іншими горючими рідинами та більш важкими нафтопродуктами (гас, мазут) в різних джерелах змінюється в межах від 14% до 24%. Важливо зауважити, що у понад 60% випадків пожеж

супроводжується утворенням «кишень». Крім того, в 60% випадків на ранніх етапах пожежі в резервуарах відбувається відмова систем автоматичного пожежогасіння.

Аналіз статистики вказує на значну залежність частоти виникнення пожеж від сезону. У літній період спостерігається вища кількість пожеж порівняно з зимовим, і пік пожеж відзначається у липні. Водночас можна відзначити, що тривалість гасіння пожеж у літній період є меншою (5,5 годин), ніж взимку (8,5 годин).

Попри вдосконалення заходів пожежної безпеки, кількість пожеж у резервуарах за останні роки залишається майже сталою [42].

У середньому, в резервуарних парках країн колишнього Радянського Союзу реєструється 12 великих пожеж щорічно. З цієї кількості, в Україні спостерігається 2 пожежі протягом кожних 3 років. Важливо відзначити, що в 25% випадків виникає необхідність у тривалому процесі гасіння цих пожеж.

В іноземних літературних джерелах доступні лише фрагментарні статистичні дані щодо пожеж у резервуарах, які мали місце у різних країнах. У закордонних джерелах зафіксована тенденція до зростання пожежної небезпеки цих об'єктів у зв'язку з ростом їхньої ємності. Половина всіх пожежних випадків у США відбулася у резервуарах із плаваючим дахом та понтоном, що пояснюється більшою поширеністю їх використання в цій країні. Ці конструкції резервуарів характеризуються високим рівнем пожежної небезпеки, хоча вони є найбільш економічними та призводять до найменших втрат продуктів. Деякі відомості про пожежі в резервуарах у розвинених країнах наведено в дослідженнях [43-51].

Згідно з проведеним аналізом, можна дійти висновку, що незважаючи на те, чи маємо справу з пострадянським простором чи іншими більш економічно розвиненими країнами, сучасні технології гасіння пожеж у резервуарах з горючими рідинами (ГР) та легкозаймистими рідинами (ЛЗР) виявляються малоефективними.

1.5.2. Нафтопереробна галузь. Конструкція резервуарів та їх призначення

Нафтопереробна промисловість України є важливою складовою важкої промисловості, де з сирої нафти виготовляють різноманітні нафтопродукти. Основна продукція включає паливо для карбюраторних (авіаційні та автомобільні бензини),

реактивних (авіаційний гас) і дизельних (дизельне паливо) двигунів, котельне паливо (мазути), моторні оливи, бітуми різного призначення, парафіни, кокс для електродної промисловості, мастила – загалом понад 300 найменувань. В Україні виділяють три нафтогазоносні регіони: Східний, Західний і Південний [52].

Східний нафтогазоносний регіон. Східний регіон охоплює Дніпровсько-Донецьку нафтогазоносну область і є найпродуктивнішим в Україні за обсягами видобутку вуглеводнів. На нього припадає близько 85% запасів природного газу та 61% видобувних запасів нафти країни. Географічно він розташований у Чернігівській, Сумській, Полтавській, Дніпропетровській, Харківській, Луганській і частково Донецькій областях.

Західний нафтогазоносний регіон. Західний регіон включає Передкарпатську, Карпатську, Волно-Подільську нафтогазоносні та Закарпатську газоносну області. Він охоплює Волинську, Львівську, Івано-Франківську, Чернівецьку та Закарпатську області.

Південний нафтогазоносний регіон. Південний регіон складається з Переддобрудзької, Причорноморсько-Кримської, Індоло-Кубанської та Азовсько-Березанської нафтогазоносних областей. Розташований в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій, частково Донецькій областях та в Криму.

Сучасна нафтопереробна промисловість України представлена шістьма нафтопереробними заводами із загальною потужністю первинної переробки 51–54 млн тонн нафти на рік, що перевищує сумарні потужності аналогічних заводів Польщі, Угорщини, Чехії та Словаччини. Найбільші підприємства розташовані в Кременчуку, Лисичанську та Херсоні. Вони виробляють 50 видів нафтопродуктів (загалом відомо понад 300 найменувань). В умовах економічної кризи кінця XX століття, що вплинула на постсоціалістичні країни, завантаженість українських нафтопереробних заводів становить приблизно 25% [52].

Застарілі технології та обладнання призводять до низької глибини переробки нафти – приблизно 55–65%, тоді як у розвинених країнах цей показник становить 80–90%. Загальна номінальна потужність установок для поглибленої переробки нафти (каталітичний крекінг, коксування, термічний крекінг, виробництво масел і бітумів)

на всіх нафтопереробних заводах України у 1999 році становила 6,92 млн тонн на рік, з яких 3,68 млн тонн припадало на каталітичний крекінг, що становить відповідно 13,5% та 7,2% від загальних потужностей переробки сирової нафти. Основні джерела постачання нафти – Росія, Казахстан та вітчизняні родовища. Загальна протяжність магістральних нафтопроводів в Україні сягає 4 тис. км [52].

Склади нафти та нафтопродуктів – це комплекс технологічних будівель, споруд та установок, які призначені для приймання, зберігання і видачі нафти та нафтопродуктів, а також комплекс будівель, який забезпечує роботу складів. Склади нафти та нафтопродуктів поділяються на дві групи. До першої групи входять автономніклади нафти та нафтопродуктів, резервуарні парки, наливні станції магістральних нафто- та нафтопродуктопроводів, товарно-сировинні парки нафтопереробних заводів і сировинні парки нафтохімічних підприємств. До другої групи належать видатковіклади нафтопродуктів, що є частиною підприємств (сільськогосподарських, енергетичних, промислових, транспортних) [21].

Найбільш розповсюдженими є вертикальні циліндричні сталеві резервуари для зберігання нафти і нафтопродуктів.

Таблиця 1.1

Категорії та підкатегорії складів залежно від загальної місткості резервуарів і тари для зберігання нафти і нафтопродуктів.

Категорія складу	Підкатегорія складу	Загальна місткість за категоріями, тис м ³
I	I-а	понад 300
	I-б	понад 100 до 300 включно
II	II-а	понад 50 до 100 включно
	II-б	понад 20 до 50 включно
III	III-а	понад 10 до 20 включно
	III-б	понад 2 до 10 включно
	III-в	до 2 включно

Резервуар – це наземна споруда у вигляді вертикального циліндра, призначена для прийому та зберігання нафти або нафтопродуктів, із визначеними градуйованими параметрами. За конструкцією резервуари бувають зі стаціонарною покрівлею (з понтоном або без нього) та з плаваючою покрівлею. Понтон або плаваюча покрівля – це рухоме покриття, розташоване всередині резервуара на поверхні рідини, яке зменшує втрати нафти чи нафтопродуктів під час зберігання [21].

Резервуари циліндричні для зберігання нафтопродуктів виготовляють зі сталевих листів товщиною до 4 мм розмірами 1000 мм x 2000 мм, 1250 мм x 2500 мм, а також зі сталевих листів товщиною більше 4 мм з розмірами 1500 мм x 6000 мм. Резервуари класифікуються за об'ємом, за конструктивними особливостями, за видом нафтопродукту, який в них зберігається, а також за методами зменшення втрат нафтопродуктів. Номінальну місткість та оптимальні розміри наведено у (табл. 1.2) [21]. 21

Таблиця 1.2

Номінальна місткість та оптимальні розміри циліндричних резервуарів

Номінальна місткість резервуара, м ³	Оптимальні розміри, м			
	зі стаціонарною покрівлею (з понтоном або без понтона)		з плаваючою покрівлею	
	діаметр	висота	діаметр	висота
100	4,7	6	-	-
200	6,6	6	-	-
300	7,6	7,5	-	-
400	8,5	7,5	-	-
700	10,4	9	-	-
1000	10,4	12	12,3	9
2000	15,2	12	15,2	12
3000	19	12	19	12
5000	21	15	22,8	12
10000	28,5	18	28,5	18
20000	40	18	40	18
30000	45,6	18	45,6	18
40000	56,9	18	56,9	18
50000	60,7	18	60,7	18

Пожежна безпека резервуарів залежить від їх конструктивних особливостей та розмірів. Основні чинники, що впливають на пожежну безпеку, включають:

- конструкцію резервуара: дизайн та конструкція резервуара грають ключову роль у пожежній безпеці. Матеріали, які використовуються для будівництва резервуара, і його структурні особливості повинні відповідати стандартам безпеки та враховувати можливі ризики пожежі;

- системи гасіння пожежі: резервуари повинні бути обладнані ефективними системами гасіння пожежі, такими як системи автоматичного пожежогасіння, пожежні гідранти, системи розпилення води та інші;

- електрообладнання: безпечна експлуатація резервуарів вимагає належного управління електрообладнанням. Електричні системи повинні відповідати стандартам безпеки, а також бути захищеними від короткого замикання та перенапруги;

- системи контролю та автоматизації: використання сучасних систем контролю та автоматизації дозволяє вчасно виявляти можливі небезпеки та реагувати на них, зменшуючи ризик виникнення пожежі;

- організаційні заходи: важливо мати належні процедури та навчати персонал взаємодії з системами безпеки, а також навчок пожежогасіння та евакуації;

- відповідність законодавству та стандартам: резервуари повинні відповідати всім відповідним законам і стандартам безпеки, які регулюють зберігання та обробку нафтопродуктів;

- регулярну інспекцію та обслуговування: системи безпеки повинні періодично перевірятися та обслуговуватися для забезпечення їх ефективності;

- розташування резервуара: місце розташування резервуара також може впливати на його пожежну безпеку. Важливо враховувати можливі ризики від інших об'єктів та екологічних аспектів;

Загальна безпека зберігання нафтопродуктів вимагає комплексного підходу, що об'єднує процедурні, організаційні та технічні заходи для запобігання виникненню пожеж та ефективного управління ними у разі потреби.

Існує кілька різновидів резервуарів для зберігання нафтопродуктів. Вони можуть відрізнятися за конструкцією, матеріалом, призначенням та областю застосування. Основні різновиди:

- горизонтальні резервуари: мають горизонтальну форму та можуть бути розташовані на поверхні землі або підземно. Зазвичай використовуються для зберігання бензину, дизельного пального та інших нафтопродуктів;
- вертикальні резервуари: мають вертикальну форму і можуть бути наземними або підземними. Застосовуються для різних типів нафтопродуктів, таких як сира нафта, мазут чи хімічні речовини;
- циліндричні резервуари: мають циліндричну форму і використовуються для зберігання великих обсягів нафтопродуктів. Ці резервуари можуть бути розташовані як на поверхні, так і під землею;
- сферичні резервуари: мають форму сфери і використовуються для зберігання газів, нафти та інших рідких чи газоподібних речовин. Вони мають певні переваги в області безпеки та зберігання під високим тиском;
- плавучі резервуари: зазвичай використовуються для тимчасового зберігання нафтопродуктів у великих обсягах. Їх можна використовувати в місцях, де необхідно швидко встановити інфраструктуру для транспортування чи зберігання нафти;
- баки для автозаправних станцій: малий різновид резервуарів, які використовуються для зберігання і постачання пального на автозаправних станціях;
- підземні резервуари: розташовані під землею для естетичного та безпечного зберігання нафтопродуктів, зокрема у великих кількостях.

Кожен тип резервуарів має свої сильні та слабкі сторони, а вибір певного типу визначається потребами конкретного застосування, обсягами зберігання, екологічними умовами та вимогами безпеки.

1.5.3. Розвиток пожеж в резервуарах та причини їх виникнення

Зазвичай пожежа в резервуарах починається з вибуху парів горючої рідини під покрівлею, що спричиняє деформацію резервуара та займання рідини всередині.

Полум'я може сягати висоти, яка майже вдвічі перевищує діаметр резервуара, а його температура, залежно від типу горючої рідини, коливається в межах 1000–1300 °C [53].

Виникнення пожежі в резервуарі залежить від таких чинників [54]:

- наявності джерела запалювання;
- властивостей ГР;
- конструктивних особливостей резервуара;
- наявність вибухонебезпечних концентрацій всередині і зовні резервуара.

У більшості випадків пожежі в резервуарах виникають через вибух парово-повітряної суміші. На формування вибухонебезпечних концентрацій усередині резервуарів значно впливають фізико-хімічні характеристики нафти та нафтопродуктів, конструктивні особливості резервуарів, режими їхньої експлуатації, а також кліматичні й метеорологічні умови. Вибух у резервуарі спричиняє руйнування покрівлі з подальшим загорянням усієї поверхні нафтопродукту. Навіть на початковій стадії горіння нафти та нафтопродуктів супроводжується інтенсивним тепловим випромінюванням у навколишнє середовище, а висота полум'я може досягати 1–2 діаметрів палаючого резервуара [54].

Умови, які можуть виникнути під час пожеж у резервуарних парках для зберігання легкозаймистих (ЛЗР) або горючих рідин (ГР) [55]:

- руйнування резервуарів, закипання та викид ЛЗР (ГР);
- формування зон, що ускладнюють подачу вогнегасних засобів через обвалення покрівель резервуарів;
- інтенсивне теплове випромінювання від палаючого резервуара, потужні конвективні потоки продуктів горіння, що змінюють напрям залежно від метеорологічних умов;
- швидке поширення пожежі через технологічні лотки, розлиті ЛЗР (ГР), каналізаційні та інші системи;
- відсутність у деяких випадках обвалування резервуарних парків.

Явища, що супроводжують пожежі в резервуарах [55]:

- початок пожежі з вибухом, який призводить до повного або часткового руйнування покрівлі резервуара;
- висота полум'яного факела сягає двох діаметрів резервуара, температура досягає 1300°C, супроводжується інтенсивним тепловим випромінюванням;
- можливі розриви резервуарів, закипання та викид нафтопродуктів;
- утворення зон усередині резервуара, де ускладнена подача вогнегасних засобів;
- поширення вогню через технологічні лотки, каналізаційні та інші системи;
- зміна напрямків потоків продуктів горіння та теплового впливу залежно від метеорологічних умов.

Таблиця 1.3

Лінійна швидкість вигорання та прогрівання деяких вуглеводневих рідин

Найменування горючої рідини	$V_{\text{лін.}}$ вигорання, м/год.	$V_{\text{лін.}}$ прогріву, м/год.
Бензин	до 0,3	до 0,1
Гас	до 0,25	до 0,1
Газовий конденсат	до 0,3	до 0,3
Дизельне пальне із газового конденсату	до 0,25	до 0,15
Суміш нафти і газового конденсату	до 0,2	до 0,4
Дизельне пальне	до 0,2	до 0,08
Нафта	до 0,15	до 0,4
Мазут	до 0,1	до 0,3

Орієнтовний час викиду можна визначити із співвідношення:

$$\tau = 100 \frac{H-h}{V_{\text{прог.}} - v_1}, \quad (1)$$

де: H – рівень рідини резервуарі, м;

h – товщина шару водяної подушки;

v_1 – лінійна швидкість вигорання см/хв;

$V_{\text{прог.}}$ – лінійна швидкість прогріву рідини, см/хв.

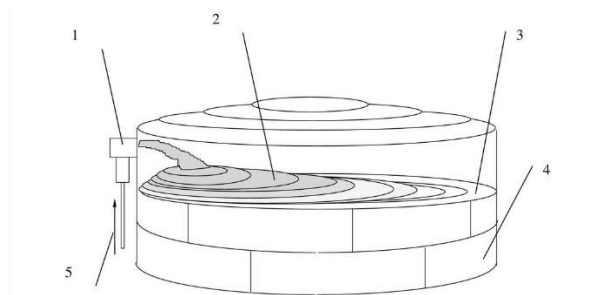


Рис. 1.10. Схема стаціонарної установки пожежогасіння з верхнім способом подавання піни: 1 – пінокамера; 2 – піна; 3 – нафтопродукт; 4 – резервуар; 5 – РР піноутворювача

Для гасіння легкозаймистих (ЛЗР) та горючих рідин (ГР) у резервуарах застосовують такі методи [55]:

- подавання піни середньої або низької кратності зверху через генератори піни середньої кратності (ГПС), повітряно-пінні стволи, встановлені на пожежних автопідйомниках, спеціально пристосованій техніці або через стаціонарні пінні камери, якщо вони функціонують;
- нанесення піни низької кратності на поверхню горючої рідини за допомогою пінних лафетних стволів;
- введення піни низької кратності під шар горючої рідини (за наявності системи підшарового гасіння).

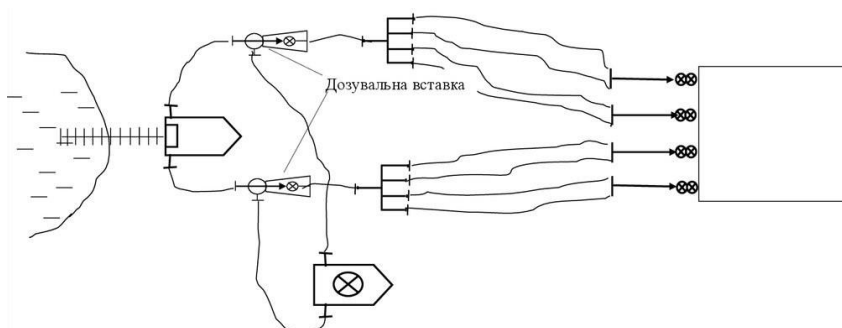


Рис. 1.11. Схема подавання повітряно-механічної піни для гасіння пожежі в залізобетонному резервуарі піною середньої кратності з використанням пожежної насосної станції та пожежного автомобіля пінного гасіння

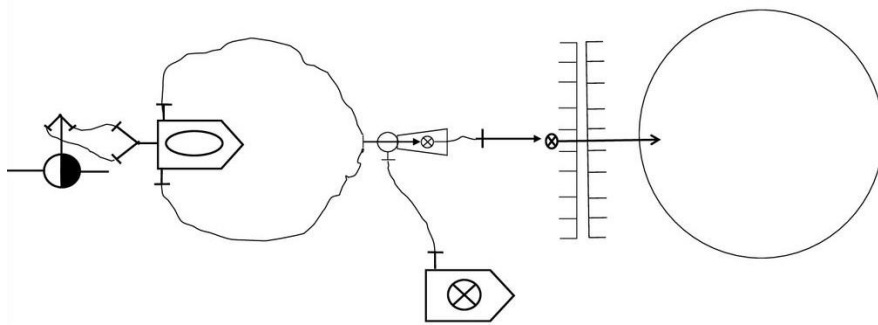


Рис. 1.12. Схема подавання піни низької кратності для гасіння пожеж в резервуарах підшаровим способом

Піноутворювачі, які використовуються для гасіння пожеж у резервуарах, повинні відповідати вимогам [56] та [57].

Таблиця 1.4

Інтенсивність подавання вогнегасних речовин

Найменування нафтопродукту	Подавання піногенераторами на поверхню $\text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2$		Лафетними стволами
	ПУ спеціального призначення	ПУ загального призначення	ПУ спеціального призначення
	Низька кратність	Середня кратність	Низька кратність
ЛЗР; $t < 28^\circ\text{C}$	0,08	0,08	0,11
ЛЗР, ГР; $t > 28^\circ\text{C}$	0,05	0,05	0,08
ЛЗР і спирт; $t < 28^\circ\text{C}$	0,11	0,11	-
Газовий конденсат	0,11	-	-

Для гасіння пожеж у резервуарах об'ємом від 5000 м^3 до 20000 м^3 рекомендується підвищити інтенсивність подавання розчину піноутворювача (РР

ПУ) на 20–25%. У резервуарах об'ємом понад 20000 м³ інтенсивність подавання РР ПУ слід збільшити на 40–50% від установлених значень. При використанні піни середньої кратності, сформованої з РР ПУ загального призначення, для подавання зверху на поверхню пального, інтенсивність подавання РР ПУ рекомендується збільшити в 1,5 раза, якщо пожежа вільно розвивалася понад 3 години [21, 58, 59].

Розрахунковий час подавання піни рекомендується приймати не менше [21, 59]:

- 50 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою спалахування 28°C і нижче та рідин, які нагріті до температури вищої за температуру займання;
- 30 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою спалахування від 28°C до 95°C;
- 25 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою спалахування вище 95°C.

Якщо гасіння здійснюється пінними лафетними стволами, тоді розрахунковий час подавання піни рекомендовано приймати не менше [21, 58, 59]:

- 60 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою спалаху 280°C і нижче та рідин, які нагріті до температури, вищої за температуру спалахування;
- 50 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою займання від 28°C до 950°C;
- 35 хв – при гасінні нафти та нафтопродуктів з температурою займання вище 95°C.

Під час гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах (РВС) пожежні підрозділи насамперед мають забезпечувати охолодження палаючого резервуара та сусідніх резервуарів за допомогою водяних стволів або стаціонарних систем охолодження. Охолодження палаючого резервуара слід проводити по всьому колу його стінки, а сусідніх резервуарів – по половині периметра стінки, що звернена до палаючого резервуара. Інтенсивність подавання води для охолодження резервуарів повинна бути не нижчою за встановлені норми [26]. Значення мінімальної інтенсивності подавання води для охолодження вертикальних сталевих резервуарів наведено в табл. 5 [21, 59].

Таблиця 1.5

Нормативна інтенсивність подавання води на охолодження вертикальних сталевих резервуарів

Установки охолодження резервуарів	Інтенсивність подавання води на охолодження, л/с, на метр довжини	
	Периметра резервуара, який горить	Половини периметра сусіднього резервуара
Стаціонарна установка для резервуарів зі стінками висотою більше 12 м (крім резервуарів з плаваючою покрівлею)	0,75	$\frac{0,3}{0,4}$
Для резервуарів зі стінками висотою 12 м і менше і резервуарів з плаваючою покрівлею	0,5	0,2
Пересувна	0,8	$\frac{0,3}{0,4}$

Під час пінної атаки, необхідно здійснювати активне охолодження всієї поверхні резервуара, особливо акцентуючи увагу на областях, де встановлені піногенератори. Після зменшення інтенсивності горіння в резервуарі, водяні струмені повинні бути спрямовані на стінки резервуара на рівні рідини, що горить, і трошки нижче для охолодження верхніх шарів пального. Після успішної ліквідації пожежі важливо продовжувати постійне охолодження конструкцій резервуара до температури, що виключає можливість повторного виникнення загоряння пального.

Необхідно ефективно зосереджувати потрібні сили і засоби та готуватися до здійснення пінної атаки протягом найкоротшого часового інтервалу. Збір і розгортання необхідних ресурсів повинно відбуватися незалежно від прийняття рішення щодо використання стаціонарної установки для гасіння пожежі пінним засобом. Обсяг піноутворювача слід визначити таким чином, щоб він утримувався у потрібній кількості, необхідній для подачі піни протягом розрахункового часу подачі.

Необхідно розташовувати техніку для надання піни в резервуар з навітряної сторони. Важливо детально перевірити встановлену схему подавання піни,

перевірити функціонування обладнання і візуально оцінити якість сформованої піни. Оцінка якості піни проводиться, коли гребінець з піногенераторами відведено від резервуара, який горить. У випадку неможливості отримати якісну піну протягом 2-3 хвилин, слід ретельно визначити причини цього і виправити їх. Підйом стріли піногенераторів до борта резервуара та подавання піни в резервуар повинні відбуватися лише після отримання якісної піни.

З урахуванням обмеженої дальності розтікання піни середньої кратності на поверхні горючої рідини, для підвищення дальності розтікання піни по поверхні нафти або нафтопродукту в резервуарах об'ємом 10000 м³ та більше, піногенератори слід постачати за допомогою пожежних колінчастих автопідйомників, типу "КАП" або аналогічної техніки. Під час подавання піни рекомендується забезпечити переміщення піногенераторів в напрямку центру резервуара, слідом за піною, яка розтікається за допомогою розсувних колін пожежного автопідйомника.

Гасіння пожежі нафти або нафтопродукту в резервуарах з плаваючою покрівлею повинно починатися негайно у проміжку між стінкою резервуара та краєм плаваючої покрівлі, незалежно від доступних сил і засобів. Під час цього процесу піну слід розподіляти в кільцевий простір рівномірно між стінкою резервуара та бар'єром плаваючої покрівлі. Для цього можна використовувати як переносні пінні стволи, так і стаціонарно встановлені піногенератори. Використання пінних стволів рекомендується лише у виняткових випадках (якщо стаціонарні установки відсутні або несправні), після консультацій з адміністрацією об'єкту та подавання з площадок стаціонарних сходів і обхідних площадок, які обладнані рятувальними мотузками, з навітряного боку резервуара [21, 58, 59, 60].

1.6. Аналіз наукових досліджень, пов'язаних з компресійною піною

Наука не стоїть на місці і щороку науковці створюють нові засоби для гасіння пожеж різних класів. Зокрема у роботі [61], де автори пропонують використовувати гранульоване піноскло, спучений перліт або вермикуліт і розпилену воду для гасіння пожеж ЛЗР та ГР в резервуарах. Аналіз статті показав, що автори проводили

дослідження тільки на модельних вогнищах пожежі малих розмірів («2В»), що в свою чергу може бути достатньо тільки для певних проміжних висновків, але не для підтвердження надійності методу в цілому. Ці методи наразі перебувають на стадії наукових розробок, тому інформація про їх практичне використання у літературі майже відсутня. В своїй роботі автори критикують традиційний спосіб гасіння ЛЗР та ГР вогнегасними пінами. Зокрема вони вважають, що піни мають занадто низьку стійкість, є екологічно небезпечними та доволі вартісним засобом. Але в цій роботі не було враховано існування компресійної піни з її властивостями та характеристиками. У роботі [62] проведено дослідження стійкості компресійної піни, згенерованої з ПУ підвищеної стійкості «Барс S-2», які показали, що компресійна піна має значно вищу стійкість відносно повітряно-механічної піни та тривалий час тримається на поверхні дизельного пального та бензину не руйнуючись. Щодо екологічного аспекту – зазначений ПУ протестовано щодо токсикологічних властивостей і забруднювального впливу на навколишнє середовище. Встановлено, що за здатністю до розкладання під впливом мікрофлори ґрунту та водою, піноутворювач є м'яким, тобто рівень його розкладання понад 80%, що в свою чергу мінімізує шкоду від поверхнево-активних речовин і домішок на екологію. У своїх роботах [63, 64] автори пропонують вдосконалення технології підшарового пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами за допомогою повітряно-механічної піни низької кратності. Також пропонується оновлення нормативних документів щодо нормативної інтенсивності подавання робочих розчинів піноутворювача під час підшарового гасіння та багато іншого. У роботі [65] автори описують методи протипожежного захисту резервуарів, включаючи систему підшарового пожежогасіння нафтопродуктів в резервуарах з підвищеною місткістю. Спосіб визначення вогнегасної ефективності гасіння нафтопродуктів комбінованим способом на основі подавання твердих гранул діоксиду вуглецю та піноутворювача для зменшення часу гасіння та кількості вогнегасних речовин вивчалось у роботі [66], але не було встановлено оптимального співвідношення вогнегасних речовин для різної кількості нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне). В роботі [5] досліджували властивості компресійної піни та технологічні параметри її генерування, але не було

досліджено поведінку піни в середовищі нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне). Компресійна піна має переваги у структурі, рівномірному розмірі та високій стабільності піни порівняно з традиційною вогнегасною піною, адже може залишатися і накопичуватися на поверхні що, очевидно, підвищує ефективність пожежогасіння [67]. У системах пожежогасіння компресійною піною (CAFS) концентрат піни змішується з водою у певній пропорції для утворення пінного розчину, який змішується з газом з фіксованим тиском. У дослідженні [67] вивчався вплив швидкості потоку піни у трубопроводах трубах і вигинах, адже вона відрізняється від моделі води, адже піна є газорідним двофазним потоком з неньютонівськими властивостями рідини і стисливістю. Дослідження були зосереджені лише на двох типах піни (1 % клас А та 3 % AFFF), що в свою чергу обмежує узагальнення результатів та застосування їх до різних типів піни. Компресійну піну також досліджували у роботі [68], а саме вивчали її стисливість. Дане дослідження потребує додаткового підтвердження та розширення, так як недостатньо інформації про порівняння з іншими типами піни та різними умовами стиску. Також виникає питання щодо калібрування та надійності обладнання, яке було розроблене спеціально для цього дослідження та його порівняння з уже існуючими приладами та методами. Вогнегасний ефект компресійної піни вивчали автори у роботах [69, 70, 6]. Модель пожежогасіння нафтопродуктів плівкоутворювальною компресійною піною (AFFF), яка може бути застосована для гасіння пожеж, досліджувалась у роботі [69], але залишилися невирішеними питання, пов'язані з подачею компресійної піни під шар нафтопродукту (бензин, дизельне пальне), що горить. У дослідженні [70] є оцінка вогнегасної ефективності систем пожежогасіння компресійною піною (CAF) при різних співвідношеннях: 5–12 частин повітря до 1 частини розчину піноутворювача. Автори праці [6] провели маломасштабні випробування моделі для вивчення вогнегасної дії CAF на пожежу в нафтовому резервуарі на поверхню. Система CAFS подає компресійну піну, як правило, кратністю 7. Піна має хороші адгезійні властивості, високу стійкість, більше 20 хв на поверхні дзеркала горіння.

1.7. Висновки до розділу

На основі аналізу сучасного стану проблематики підшарового гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах з ЛЗР та ГР необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан пожежогасіння вертикальних сталевих резервуарів та визначити можливості його вдосконалення.
- провести теоретичні дослідження процесу подавання компресійної піни підшаровим способом у резервуар.
- встановити вогнегасні характеристики компресійної піни для підшарового гасіння.
- провести експериментальні дослідження системи гасіння з використанням компресійної піни підшаровим способом.
- розробити схеми подавання компресійної піни в РВС.
- сформулювати рекомендації для нормативних документів щодо подавання компресійної піни.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАСІННЯ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ

2.1. Опис основних теоретичних положень САПР SolidWorks Flow Simulations

Для теоретичних досліджень параметрів руху затоплених пінних струменів використовувався програмний продукт SolidWorks Flow Simulations [71, 72, 73], який призначений для розв'язування прикладних задач в області термогідродинаміки шляхом моделювання відповідних фізичних процесів. SolidWorks Flow Simulations є повністю інтегрованим додатком CAD-системи SolidWorks і може ефективно використовуватись для розрахунків силової (стаціонарної та нестаціонарної) взаємодії між твердими тілами та потоком рідини (газу) у випадку їх взаємного руху; впливу різних фізичних факторів на рух текучого середовища; вирішення проблем теплообміну; розрахунку руху твердих і/або рідких частинок в потоці газу або рідини.

Теоретичні дослідження здійснюються з використанням даних дослідників [21, 34, 27, 12, 63-65, 67-70] та даних отриманих внаслідок власних досліджень, які описані в розділі 3.

Математична модель будується шляхом геометричного проектування реального об'єкта в середовищі SolidWorks [72] з подальшим автоматичним обміном необхідною інформацією між SolidWorks Flow Simulations та SolidWorks. Рух текучого середовища і теплообмін між тілами моделюється з допомогою рівнянь Нав'є–Стокса, які в нестаціонарній формі описують закони збереження маси, імпульсу та енергії.

Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії нестаціонарного просторового потоку в Декартові системі координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$ набуває виду:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) &= 0, \\
\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\
\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) &= S_k u_k + Q_H,
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

де t – час;

u – швидкість текучого середовища;

ρ – густина текучого середовища;

S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища;

E – повна енергія одиничної маси текучого середовища;

Q_H – тепло, що виділяється джерелом тепла в одиничному об'ємі текучого середовища;

τ_{ik} – тензор в'язких напружень зсуву;

q_i – дифузійний тепловий потік, нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками.

Для ньютонівських рідин тензор напружень від дії сил в'язкості визначають таким чином:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},
\tag{2.2}$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

δ – дельта-функція Кронекера;

k – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Дифузійний тепловий потік моделюється з допомогою рівняння:

$$q_i = - \left(\frac{\mu_i}{Pr} + \frac{\mu_i}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, k=1,2,3, \quad (2.3)$$

Для стискуваних середовищ (газів) використовується рівняння стану такого виду:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (2.4)$$

де $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – вектор концентрацій компонентів текучого середовища. Для газів використовується рівняння стану ідеального газу

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (2.5)$$

де R – газова стала модельованого газу, яка для суміші газів визначається як

$$R = R_{унів.} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{M_i}, \quad (2.6)$$

де M_i – молекулярна маса i -го компонента газу. Для врахування залежності від температури використовується рівняння:

$$\rho = \left[\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\rho_{0i}} (1 + \beta_{Ti} (T - T_0)) \right]^{-1}, \quad (2.7)$$

де β_{Ti} – коефіцієнт об'ємного теплового розширення i -го компонента;

ρ_{0i} – густина i -го компонента при деякій температурі T_0 .

Вплив гравітації моделюється з допомогою члена S_i , що входить в (2.1) як зовнішня масова сила:

$$S_i = -\rho g_i, \quad (2.8)$$

де g_i – i -та складова (вздовж i -тої осі системи координат) вектора гравітаційного прискорення.

Значний інтерес для нашого випадку становлять багатокомпонентні течії. Зміна концентрації компонентів суміші в просторі внаслідок дифузії моделюється таким рівнянням:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left((D_{ij} + D'_{ij}) \frac{\partial y_j}{\partial x_k} \right), i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.9)$$

де y_i – концентрація i -го компонента суміші;

N – число компонентів;

D – коефіцієнт дифузії.

Крім цього, використовуються рівняння стану текучого середовища, а залежність теплопровідності компонентів середовища від температури описується відомими емпіричними формулами.

Для розв'язку задачі нестационарна безперервна математична модель дискретизується як за часом, так і за простором. Для цього вся розрахункова область покривається сіткою, грані чарунок якої паралельні до координатних площин Декартової системи координат. Сітка генерується автоматично з можливістю впливу на розміри чарунок для покращення точності розрахунку. Параметри руху пінних струменів в середовищі бензину визначались за допомогою методу скінченних об'ємів, який реалізовано в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations [73]. Бензин розглядався як рідина, а піна як газ із фізико-механічними властивостями піни. Обидва середовища нерозчинні одне в одному. Насправді повітряно-механічна піна є двофазним середовищем, в процесі руху якої можливі зміни фаз, наприклад руйнування піни, не розглядалися. При переході від однієї піни до іншої враховувалися їхні узагальнені фізико-механічні характеристики.

Враховувався вплив гравітації та стискання піни під дією тиску бензину, а також вплив температури на фізико-механічні властивості обох середовищ.

Рух пінних струменів розглядався тільки всередині бензину, вихід піни на поверхню горіння констатувався як факт і поведінка піни на поверхні не моделювалася через обмеження моделі.

Зміна фаз піни, а саме її кипіння внаслідок дії на неї температури і тиску лише констатувалося як факт, а зміна фізико-механічних характеристик піни внаслідок її кипіння не враховувалася через обмеження моделі.

2.2. Побудова математичної моделі в середовищі SolidWorks Flow Simulations

2.2.1. Моделювання прогріву палива та резервуара протягом 30 хв

В SolidWorks Simulations спроектована модель резервуара об'ємом 5000 м^3 із такими внутрішніми розмірами: $\varnothing 21 \text{ м}$, а висота 16 м з сталевими стінками товщиною 10 мм (рис. 2.1). Внизу резервуара (концентрично) розмістимо джерело пінного струменя – торець пінопроводу певного діаметра, що спрямований вертикально вгору. Зроблено припущення, що в результаті вибуху зірвало дах, тому резервуар зверху відкритий. В подальшому моделювання проводились в резервуарі з відкритим дахом.

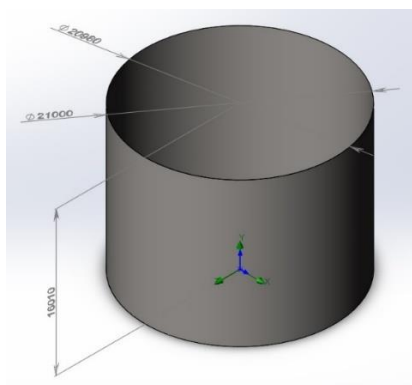


Рис. 2.1. Модель резервуара 5000 м^3 в середовищі SolidWorks Flow Simulations

Конструктивні параметри моделі:

- зовнішній діаметр 21000 мм;
- товщина стінки 10 мм;
- висота (зовнішня) 1610 мм;
- товщина днища 10 мм;
- матеріал резервуара: сталь;
- об'єм резервуара 5531 м³;
- площа поверхні дзеркала резервуара 346 м².

Початкові та граничні умови. Прийmemo температуру дзеркала горіння 433° К (160° С) що є максимально можливим значенням. Температура бортів (стінки) на рівні дзеркала горіння 650° К (377° С) встановлено експериментально [59, 74].

Температура навколишнього середовища 293° К (20° С).

Охолодження стінок резервуара – рівномірна конвекція, коефіцієнт тепловіддачі 20Вт/м²/К.

Температура над дзеркалом горіння дорівнює температурі дзеркала.

Текуче середовище – рідина (Бензин авіаційний Б70). Фізико-механічні параметри бензину, що вводились як розрахункові параметри середовища моделі, розміщені в додатку А.

Початкову температуру стін та середовища прийmemo рівною 293,2 К (за замовчуванням). Атмосферний тиск становить 101325 Па (за замовчуванням).

В загальних налаштуваннях відмітимо Нестационарність процесу, «ввімкнемо» пункти Гравітація та Теплообмін.

Параметри сітки скінченних об'ємів показано на рис. 2.2.

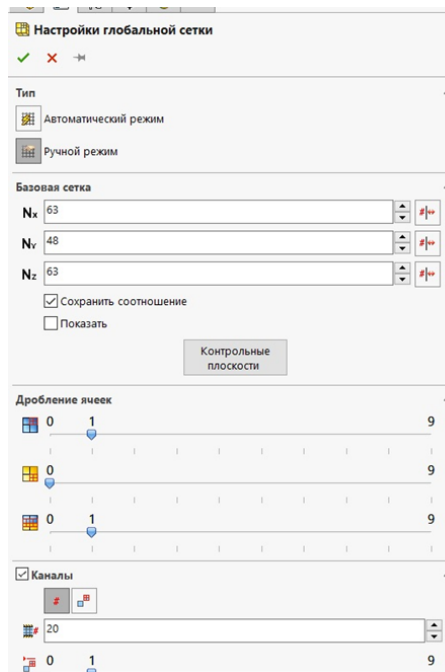


Рис. 2.2. Настроювання параметрів глобальної сітки скінченних об'ємів

Мета розрахунку визначається цілями. Ціль – це фізичний параметр, який розраховується у всій області (глобальна ціль), на заданій поверхні (повернева ціль) чи у заданій точці (точкова ціль). Значення цілі задається конкретним параметром, або описується рівнянням [71, 72, 73]. Розрахунок ведеться до тих пір, доки цей параметр (або параметри) не будуть досягнуті. У випадку нестационарності процесу визначається ще й час, протягом якого була досягнута ціль (або цілі). У нашому випадку вказуємо лише час горіння. Тривалість прогріву вибираємо максимальну – 30 хв.

Файл Расчет Вид Добавить Окно Справка	
Параметр	Значение
Статус	Расчет
Все ячейки	1,414,352
Ячейки в текучей среде	1,213,824
Ячейки в твердом теле	200,528
Ячейки на границе раздела твердого тела с текучей ...	72,288

Рис. 2.3. Розрахункові параметри сітки скінченних об'ємів

В результаті настроювання ми отримали сітку скінченних об'ємів з параметрами, що наведені на рис. 2.3.

Весь об'єм резервуара становить 5531 м^3 . Його розбито на 1213824 елементів, що дає нам значення об'єму одного елемента – $0,004556 \text{ м}^3$ або 4,6 л, що має забезпечити хорошу точність розрахунків [72, 75].

Хромограма розподілу температури середовища на площині, що проходить через вертикальну вісь симетрії резервуара (надалі просто площина перерізу), представлена на рис. 2.4.

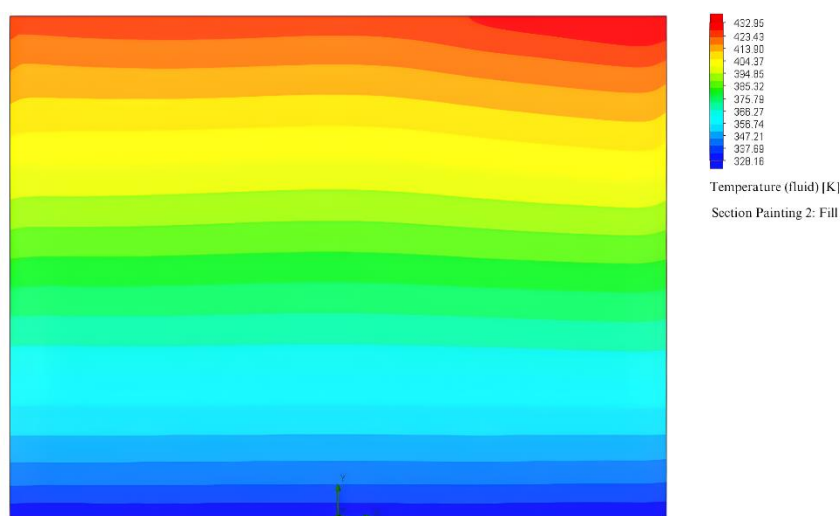


Рис. 2.4. Температура середовища на момент закінчення прогріву

Як видно із рисунка, резервуар прогрітий рівномірно, з деяким викривленням спектру біля поверхні горіння, що може бути викликане рухом середовища.

За цією хромограмою побудована графічна залежність розподілу температури середовища на момент закінчення прогріву за висотою резервуара, яку представлено на рис. 2.5.

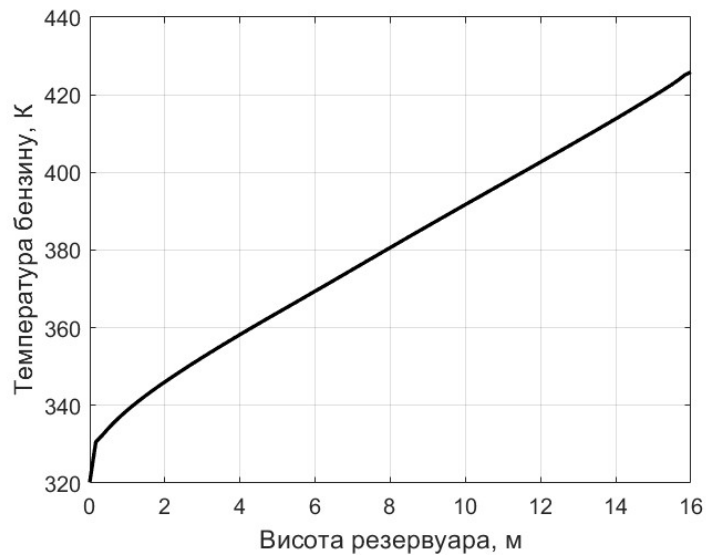


Рис. 2.5. Розподіл температури середовища на момент закінчення прогріву за висотою резервуара

Як бачимо із рисунка, резервуар погрівся повністю. Температура бензину на днищі піднялась на 27°K від початкової.

Результати окремого дослідження залежності температури середовища на днищі резервуара як функції від часу прогріву представлені на рис. 2.6.

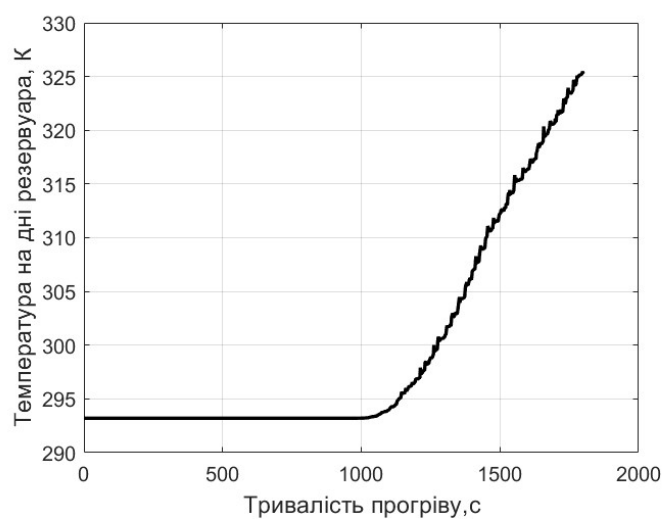


Рис. 2.6. Залежність температури на дні резервуара від часу прогріву

Як видно із рисунка, середовище на дні резервуара починає прогріватися через 17 хвилин, тому дуже важливим фактором є початок подачі піни. Чим швидше він розпочнеться, тим холодніший бензин підніметься разом з піною в зону горіння і тим ефективнішим буде процес гасіння.

На рис. 2.7 представлено хромограму вертикальної швидкості середовища на площині перерізу.

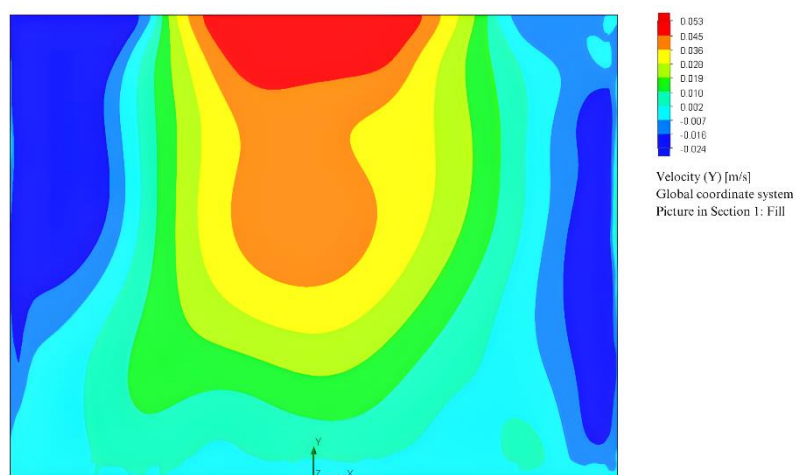


Рис. 2.7. Вертикальна швидкість прогрітого бензину

Як видно із рисунка, бензин піднімається в центрі вгору із максимальною швидкістю 5 см/с, та опускається вниз вздовж стінок резервуара із максимальною швидкістю 2,5 см/с. Тобто в процесі прогріву встановився ламінарний конвективний рух бензину, що додатково сприяє його прогріванню від пожежі та викривленню картини розподілу температури на рис. 2.4.

В процесі прогріву середовища резервуара внаслідок його горіння прогрівається і сам резервуар, тобто поверхня конструкції.

У нашій моделі задана температура торця стінки на рівні дзеркала горіння значенням 650 К, що відповідає експериментально встановленим даним.

Хромограма розподілу температури на бічних поверхнях стінок резервуара представлена на рис. 2.8.

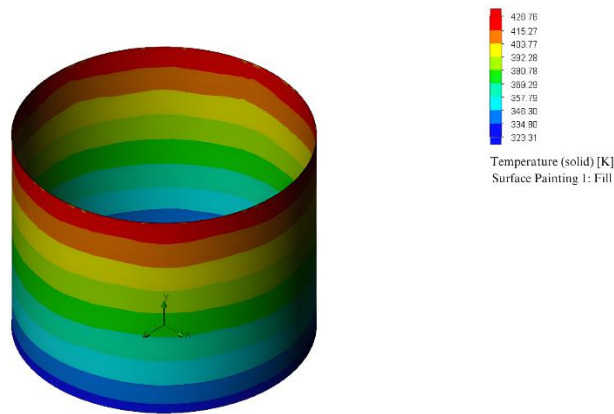


Рис 2.8. Температура стінки резервуара через 30 хв прогріву

Як видно із рисунка, стінки не прогриваються вище температури кипіння бензину, що вказує на добре охолодження стінок бензином, тобто бензин прогривається не тільки від дзеркала горіння, але і від стінок, які мають значно вищу температуру.

Як відомо, густина рідкого середовища (рідини) залежить від температури. На рис. 2.9 представлено хромограму залежності густини бензину від його температури, а на рис. 2.10 – графічну інтерпретацію цієї залежності вздовж вертикальної осі симетрії.

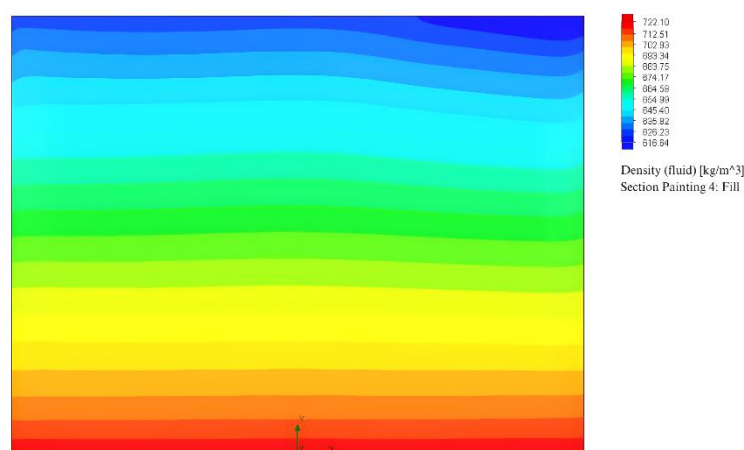


Рис. 2.9. Густина прогрітого бензину на момент закінчення прогріву.

Як видно із рисунка, густина бензину зменшується знизу в верх, тобто більш прогріті шари палива мають меншу густина і навпаки. Це добре корелюється із хромограмою температури середовища, яка представлена на рис. 2.4.

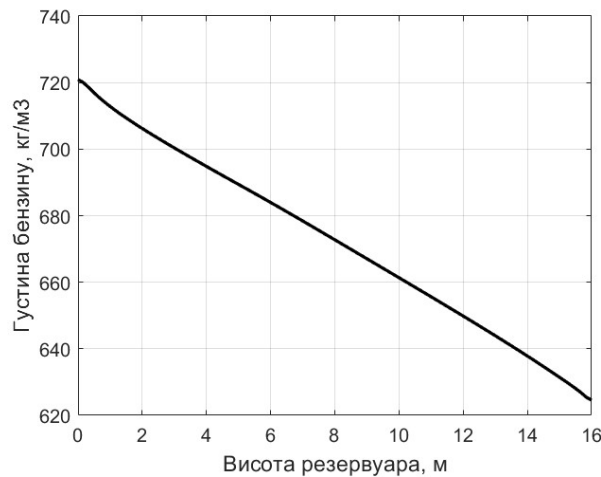


Рис. 2.10. Розподіл густини прогрітого бензину за висотою резервуара

Як видно із рисунка, початкова густина бензину (750 кг/м^3) після прогрівання змінилася від 722 внизу резервуара до 617 вгорі – в зоні горіння. Середнє значення густини бензину становить $668,5 \text{ кг/м}^3$, однак обчислення виконані за числовими результатами моделювання дають більш точне значення – $671,1 \text{ кг/м}^3$.

Як відомо, таке зменшення густини рідини призводить до збільшення її об'єму. В середовищі SolidWorks Flow Simulations [71, 72, 73] цей приріст об'єму можна визначити через масу бензину, яка витіснилася із розрахункового об'єму, тобто резервуара, оскільки об'єм резервуара у нашій моделі завжди залишається незмінним.

На рис. 2.11 представлено графічну залежність маси бензину в резервуарі від часу прогріву.

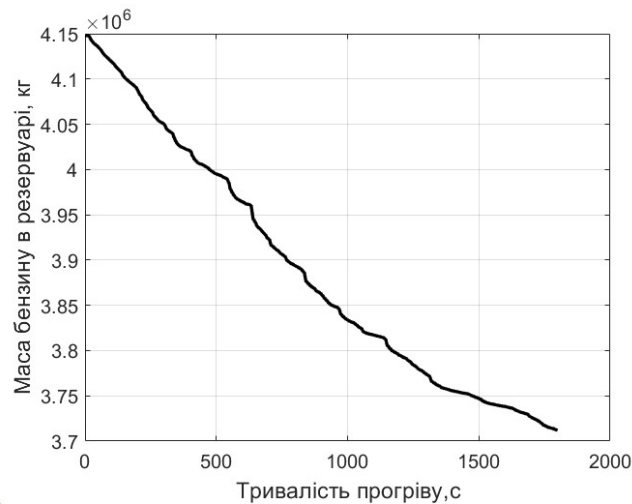


Рис. 2.11. Залежність маси бензину в резервуарі від часу прогріву

Як видно із рисунка, маса бензину в резервуарі зменшується пропорційно до його прогрівання, тобто бензин витісняється із вщент заповненого резервуара, що може привести до виникнення вкрай небезпечної аварійної ситуації. Для запобігання цьому явищу, в резервуарі необхідно мати певний резервний об'єм, який і заповниться розігрітим бензином.

2.2.2. Визначення об'єму для компенсації розширення бензину

Об'єм резервуара в моделі визначається як $V_p = \pi D^2 / 4H$ і становить 5531 м³.

Початкова маса бензину в цьому об'ємі:

$M_1 = 4147970$ кг при значенні $\rho_1 = 750$ кг/м³.

Кінцева маса бензину на момент закінчення прогріву:

$M_2 = 3711940$ при значенні $\rho_2 = 617$ кг/м³.

Маса витісненого бензину:

$M = M_1 - M_2 = 436030$ кг

Приріст об'єму при середній густині $\rho_{\text{серед}} = 671$ кг/м³ становить:

$V_{\text{дод}} = M / \rho_{\text{серед}} = 650$ м³ (12%)

Це той об'єм бензину, на який збільшується об'єм бензину в резервуарі в

результаті нагріву. Вигорання бензину становить 25 см/год [59], для нашого резервуара площею 346 м² це дорівнює 87 м³/год = або 44 м³ протягом 30 хв, тобто близько 1%, що не суттєво в порівнянні із розширенням. Тому для визначення необхідного об'єму для розміщення витісненого бензину вплив вигорання на цей об'єм враховувати не будемо.

2.2.3. Моделювання процесу подавання піни

Розглянемо рух пінних струменів в резервуарі із прогрітим бензином. Для цього в загальних налаштуваннях моделі до пунктів Гравітація, Теплопровідність та Нестационарність, що були відмічені на етапі прогріву, додаємо пункти Течія рідини/газу та Вільні поверхні. Останній пункт дозволяє нам розглядати сумісний рух середовищ, які не розчинні одне в іншому. Піну моделюємо як газ, що дозволяє враховувати стискання піни під дією тиску бензину. Моделювання повітряно-механічної піни як системи з бульбашок рідини і газу на сьогодні, на жаль, ще неможливе. Тому двофазну неоднорідну систему вода–повітря замінимо суцільним середовищем – газом із фізико-механічними параметрами піни. Фізико-механічні властивості піни, які використовуються в моделі, наведені в додатку А. Надалі, під текучим середовищем ми розумітимемо суміш піни та бензину.

Подавання піни будемо здійснювати із самого низу резервуара із 6 сопел (рис. 2.12), які розташовані рівномірно по кільцевому трубопроводу середнього радіуса діаметром 14 м. Насправді стволи треба відокремити від дна резервуара на певну висоту, яку ми зараз встановлювати не будемо, тому приймемо їх розміщення в самому низу конструкції.

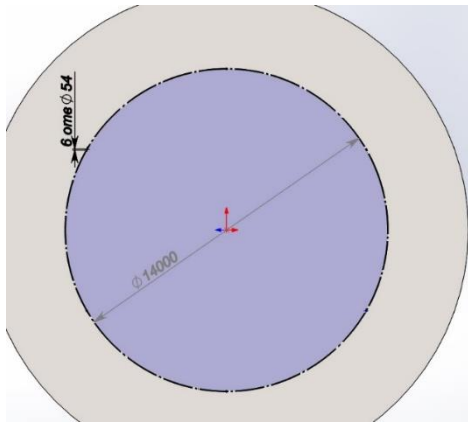


Рис. 2.12. Схема розташування пінних стволів

Для того, щоб струмені піднімалися вгору якомога швидше, рознесемо їх (6 шт.) на певну оптимальну [4] відстань.

Подачу піни кратністю 10 (K10) визначимо із необхідної інтенсивності $0,08 \text{ л/с} \times \text{м}^2$ [63], що в перерахунку на площу нашого резервуара встановлює значення масової подачі $Q_m = 28 \text{ кг/с}$, або $Q_v = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ в перерахунку на піну кратністю 5, оскільки піна кратність 10 стискатиметься вдвічі від дії на неї тиску на дні резервуару.

Для верифікації моделі розглянемо подачу піни протягом короткого проміжку часу (10 с, для уникнення змішування потоків та впливу цього процесу на аналіз стану середовища).

Хромограма швидкості пінних струменів на площині перерізу через 10 с подавання піни K10 об'ємною подачею $Q=0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ представлена на рис. 2.13.

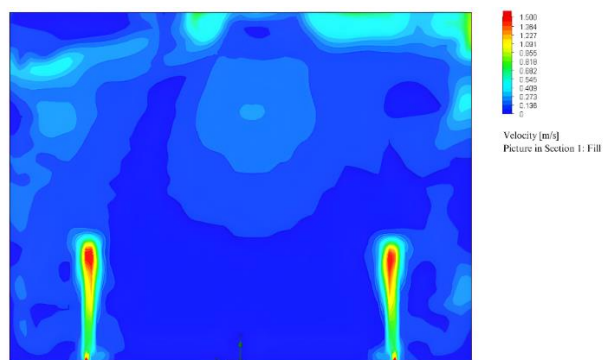


Рис. 2.13. Швидкість пінних струменів

Як бачимо, на площині перерізу, що проходить через осі двох струменів видно чітко сформовані струмені і, що важливо, кінетична енергія цих струменів передалася у верхні шари резервуара швидше від самих струменів, що характерно для пружного середовища і позитивно характеризує адекватність моделі на якісному рівні. З метою полегшення візуального аналізу хромограми, максимальні значення швидкості струменів відфільтровано до 1,5 м/с (це максимум в зоні голови струменя, а все що вище – зливається в червоному кольорі).

Насправді максимум знаходиться на виході струменів із сопла і становить 11,8 м/с. Фільтр всі вищі від 1,5 м/с значення швидкості замальовує червоним. Це дозволяє нам краще розгледіти (аналізувати) нижчі значення швидкостей.

Для визначення значення можливої похибки моделі побудуємо графічні залежності абсолютних значень швидкості на осі струменя. Епюра вертикальної швидкості струменя на виході з сопла впоперек до його осі представлена на рис. 2.14.

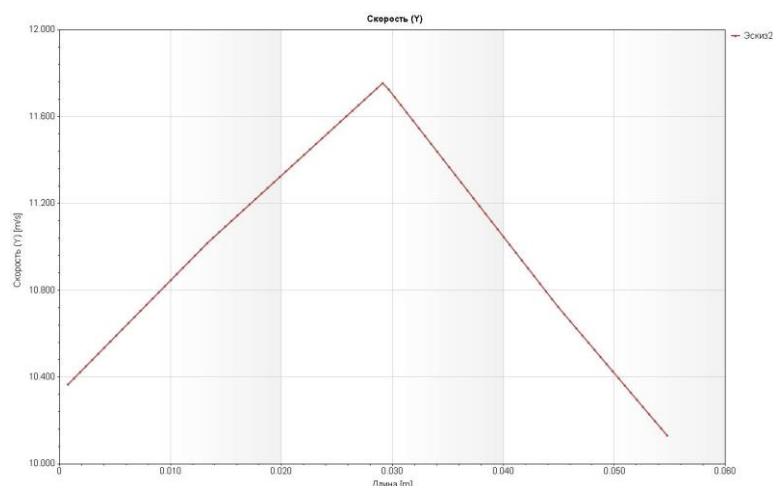


Рис. 2.14. Епюра вертикальної швидкості на виході з сопла (впоперек до осі)

Середнє значення швидкості для сопла діаметром 54 мм та об'ємними витратами рідини визначені за відомими із курсу гідравліки формулами [74] і повинні становити 10,2 м/с, а у нашому випадку це значення становить 11 м/с, тобто відносна похибка є рівною 8%. Отже, точність отриманих результатів є досить добра.

Епюру вертикальної швидкості струменя на виході з сопла вздовж його осі представлено на рис. 2.15.

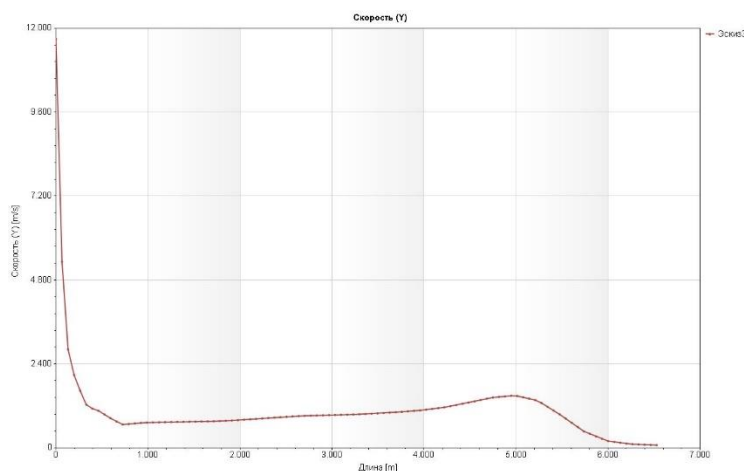


Рис. 2.15. Епюра вертикальної швидкості на виході з сопла (вздовж осі)

Як видно із рисунка, швидкість струменя від початкового значення 11,8 м/с різко зменшилася до 0,8 м/с і на довжині струменя 5 м зростає вдвічі (до 1,5 м/с), що на якісному рівні повністю підтверджується даними, наведеними в роботі [63].

Тут теж спостерігається дія сили тертя в'язкості та сили Архімеда, що теж підтверджує адекватність нашої моделі.

Хромограми на площині перерізу резервуара інших результатів моделювання, а саме: масової концентрації пінних струменів, густини та температури прогрітого текучого середовища, подані в додатку Б.

Враховуючи адекватність отриманих результатів моделювання досить короткочасного процесу, перейдемо до розгляду більш тривалого процесу подавання піни, а саме – 1 хв.

Результати моделювання процесу подавання піни протягом 60 секунд подано в додатку Б.

Як показали проведені теоретичні дослідження процесу подачі пінних струменів в середовище прогрітого бензину, ламінарний рух струменів в середовищі триває лише протягом незначного проміжку часу і переходить в турбулентний.

Піна акумулюється в середовищі бензину в середній частині резервуара і лише через певний проміжок часу (55 с) виходить на поверхню у вигляді окремих частин.

Піна перед виходом на поверхню перегрівається, руйнується (закипає) і виходить на поверхню горіння у вигляді водяної пари та повітря.

При цьому спостерігається локальне охолодження ділянок дзеркала горіння у зоні виходу пари.

2.2.4. Визначення впливу температури на процес виходу піни на поверхню горіння

Для визначення впливу зміни густини прогрітого текучого середовища на силу Архімеда, розглянемо рух пінних струменів в холодному і гарячому середовищі.

На рисунку 2.16 наведено графічну залежність масових витрат піни на виході із резервуара (на дзеркалі горіння) від тривалості її подавання та температури середовища.

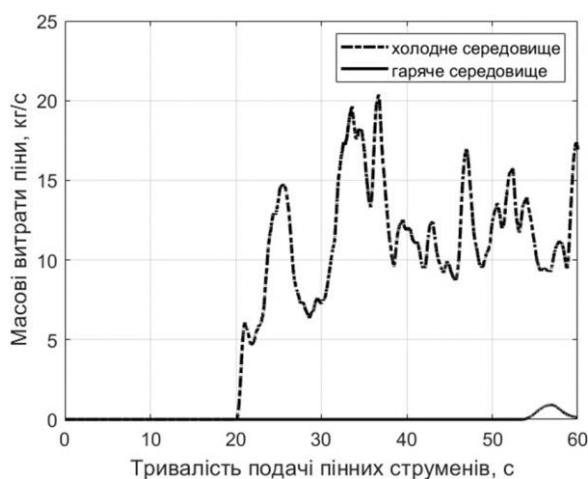


Рис. 2.16. Графічна залежність масових витрат піни на виході із резервуара від часу подавання та температури середовища

Як видно, у випадку холодного середовища піна виходить на поверхню горіння через 20 с подачі, і досягає максимального значення 20 кг/с через 35 с. Надалі масові

витрати зменшуються і їх середнє значення близьке до половини масових витрат піни на вході в резервуар, а саме – 14 кг/с. Тобто відбувається певне накопичення піни в резервуарі. У випадку гарячого середовища піна виходить на 57-ій секунді і її масові витрати становлять 0,9 кг/с, тобто вся піна, яка була подана протягом 1 хв, знаходиться в резервуарі.

На рис. 2.17 представлено проінтегровану залежність 2.16 – кількість піни яка вийшла на поверхню горіння за одиницю часу.

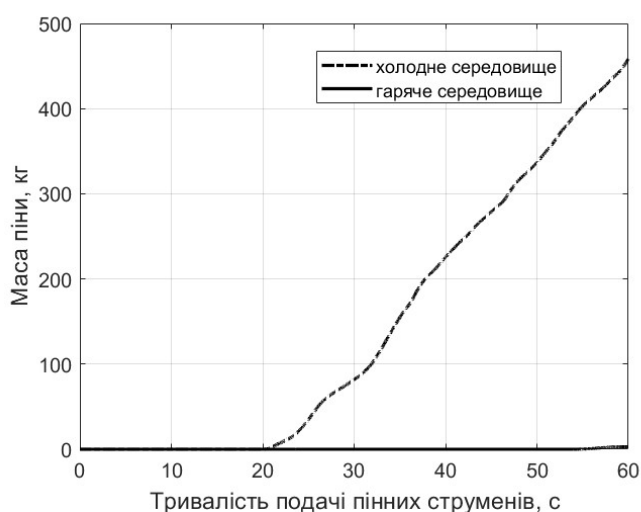


Рис. 2.17. Графічна залежність маси піни на виході із резервуара від часу подавання та температури

Як видно із рис. 2.17, у випадку холодного середовища протягом 60 с на поверхню піднялося 450 кг піни, а у випадку гарячого середовища – лише 3 кг, що в 150 раз менше. Слід відмітити, що подано було 1680 кг протягом 60 с.

Отже, температура текучого середовища не випускає піну на поверхню шляхом зменшення підйомної сили через падіння густини середовища.

2.2.5. Подавання піни різної кратності протягом 1500 с

Практичний досвід підшарового гасіння вказує на те, що тривалість подавання піни не перевищує 25 хв. Виходячи з цього, змодельємо процес подавання піни різної

кратності (K5 і K10) з мінімально необхідною інтенсивністю подавання. Піна K10 $Q = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ (28кг/с) та піна K5 $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ (28 кг/с). Результати моделювання процесу подачі піни представлено на рис. 2.18 – 2.24.

На рис. 2.18 представлено графічну залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання.

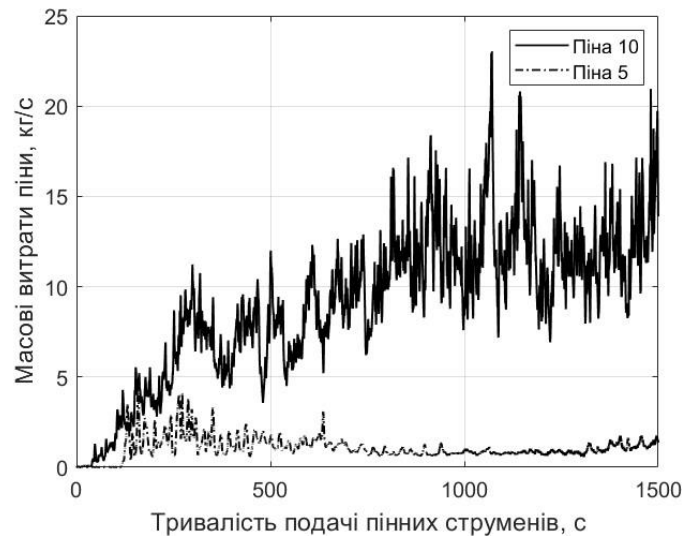


Рис. 2.18. Графічна залежність масових витрат піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із графіка, піна K10 як і піна K5 піднімаються на поверхню дзеркала горіння нерівномірно, із значними коливаннями продуктивності. Масові витрати піни K10 є значно вищими від витрат піни K5, що призводить до різної кількості поданої на дзеркало піни, (рис. 2.19).

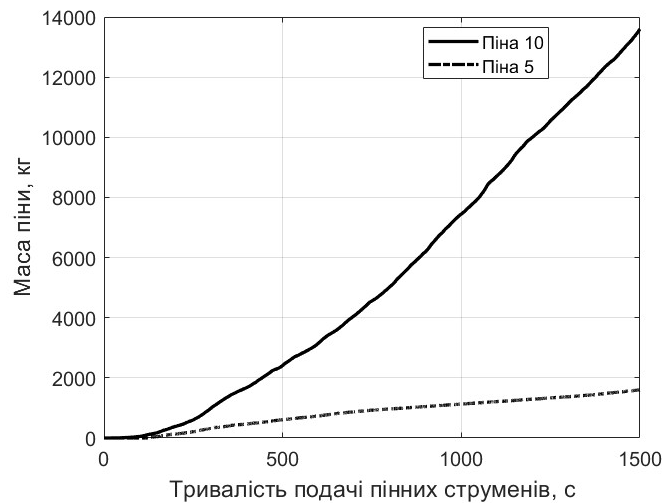


Рис. 2.19. Графічна залежність виходу маси піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із графіка, маса піни K10 на дзеркалі горіння є у 8 разів більшою від маси піни K5. Тобто піни K5 в резервуарі має бути значно більше.

На рис. 2.20. представлено графічну залежність об'єму піни K5 і K10 в резервуарі від часу її подавання.

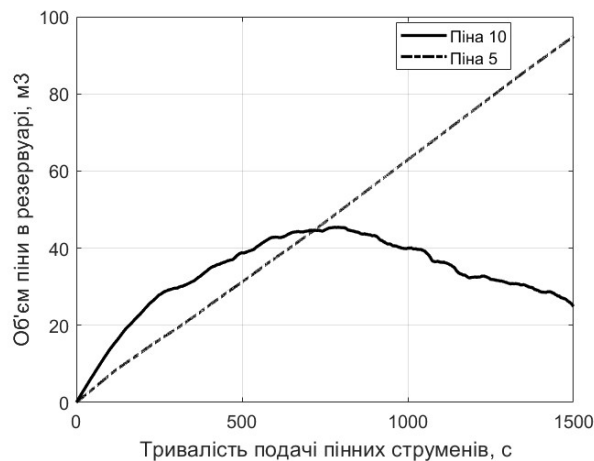


Рис. 2.20. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу її подавання

Як видно із графіка, об'єм піни 5 зростає пропорційно до часу подавання, в той же час об'єм піни 10 зростає непропорційно і через половину часу (750 с) починає зменшуватися, тобто піна K10 більш інтенсивно покидає резервуар і на момент

закінчення часу подавання піни K10 залишається приблизно 25 м^3 . Об'єм піни K5 в резервуарі становить 95 м^3 .

На рис. 2.21 – 2.22 представлено хромограми масової концентрації піни різної кратності (K10 і K5) на момент часу 600 с.

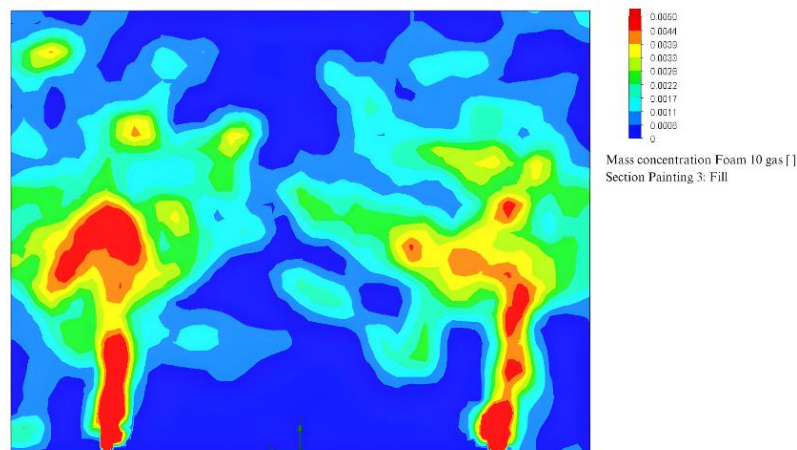


Рис. 2.21. Хромограма концентрації піни 10 на 600 с подавання

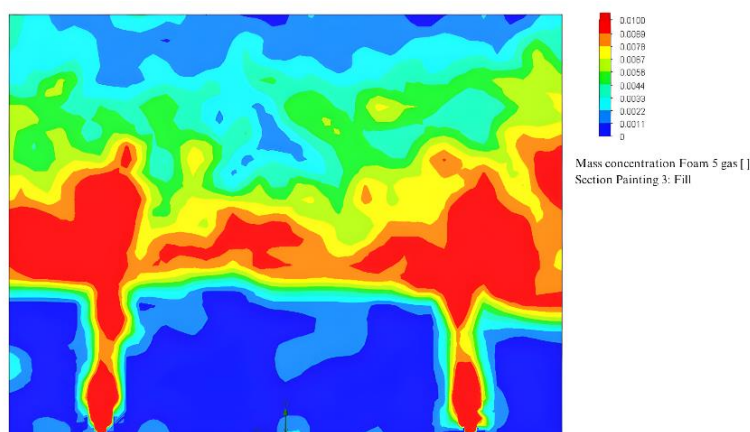


Рис. 2.22. Хромограма концентрації піни 5 на 600 с подавання

Як видно із рисунків, піна K10 збирається в меншу хмару і її струмені майже не зливаються. Піна K5 практично зливається в одну хмару.

Подальше зависання піни K5 зображено на рис. 2.23.

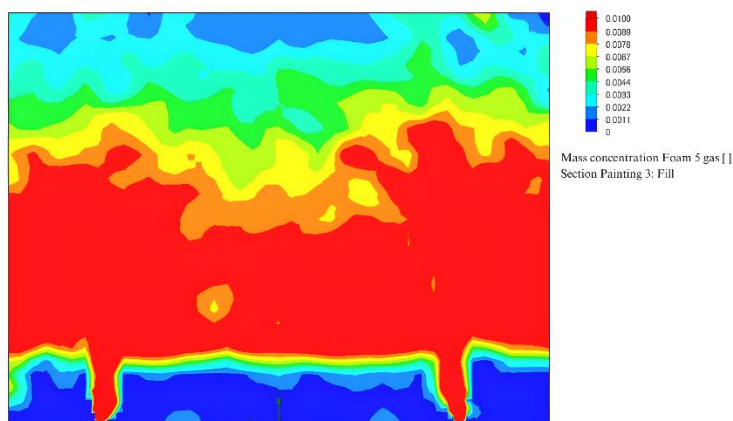


Рис. 2.23. Хромограма концентрації піни 5 на 900 с подавання

Як видно із хромограм піна у всіх випадках виходить на поверхню дзеркала горіння окремими фрагментами, причому фрагментарність виходу піни K10 є значно вищою, що також видно і на рис. 2.18.

На рис. 2.24 представлено графічну залежність температури на дзеркалі горіння від часу подачі пінних струменів (мінімальні значення).

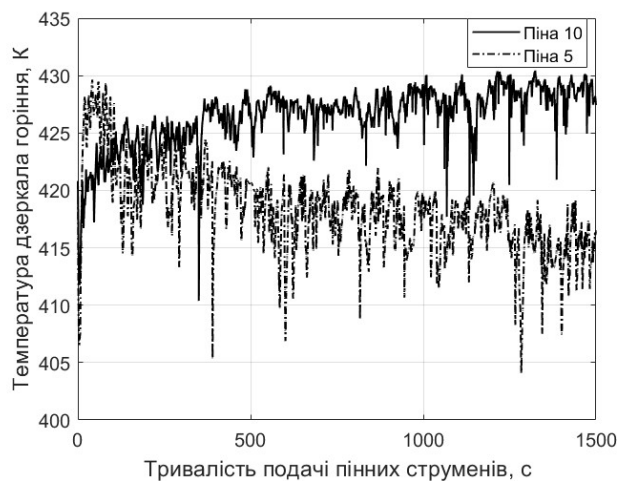


Рис. 2.24. Графічна залежність мінімальної температури на дзеркалі горіння від часу подавання піни

Як видно із графіка швидкий підйом піни K10 не охолоджує дзеркало горіння (температура росте), а зависання піни K5 призводить до доброго теплообміну з бензином і температура на дзеркалі горіння падає.

Однак, як показують отримані результати дослідження математичної моделі, виходу піни на поверхню протягом 25 хв не спостерігається. Лише пара. Однак практичний досвід вказує на те, що 25 хв подачі і не потрібно, адже пожежа гаситься швидше.

Висновок. Те що ми не враховуємо впливу водяної пари на полум'я призводить до неадекватної моделі, в якій піна не пробивається на поверхню дзеркала горіння протягом 25 хв.

Насправді, водяна пара, пробиваючись на поверхню горіння змішується із парою бензину, що погіршує його горіння. Також охолодження середовища на дзеркалі зменшує пароутворення бензину, що теж погіршує процес горіння.

Тобто, для успішного моделювання цілого процесу підшарового гасіння нам потрібна ще одна модель – газова за дзеркалом. Щоб компенсувати її відсутність і покращити адекватність наявної моделі, зробимо таке припущення: подавання 28 кг/с піни K10 протягом 5 хв приводить до зменшення температури на дзеркалі горіння зі 160° С до 100°С.

Результати моделювання процесу подавання пінних струменів піни K10 із примусовим охолодженням дзеркала горіння від температури 433 К до 373 К представлені на рис. 2.25 – 2.29.

На рис. 2.25 представлено графічну залежність масових витрат піни K10 на дзеркалі горіння від часу її подавання. Час подавання піни триває 420 с, тобто перші 5 хв температура опускається, а дві наступні хвилини, протягом яких температура не змінюється потрібні для спостереження за процесом виходу піни на поверхню дзеркала горіння.

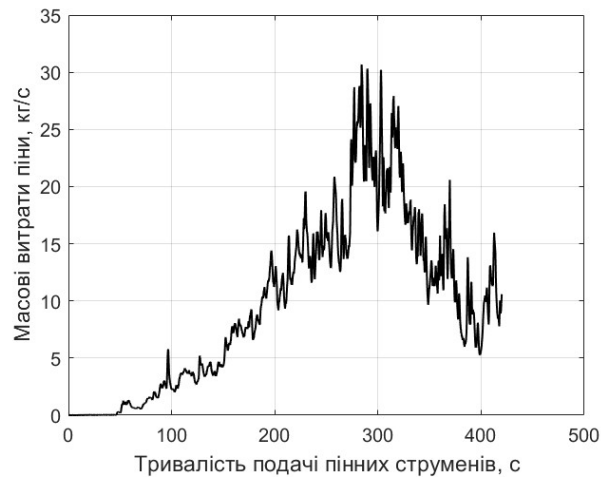


Рис.2.25. Графічна залежність масових витрат піни K10 на дзеркалі горіння від часу її подавання

Як видно із графіка, піна досить інтенсивно виходить на охолоджену поверхню. Пікові витрати становлять 30 кг/с при вхідному подаванні 28 кг/с. Відбувається своєрідний розряд акумулятора, після якого масові витрати піни зменшуються.

Графічну залежність маси піни, що вийшла на поверхню від часу подавання пінних струменів, представлено на рис. 2.26.

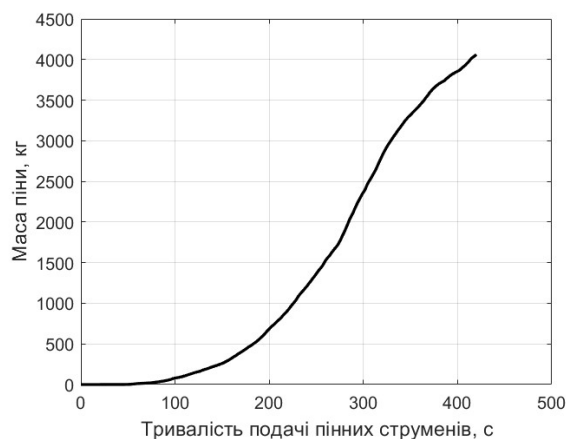


Рис.2.26. Графічна залежність виходу маси піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із рисунка, протягом перших п'яти хвилин виходить 2,5 тони піни, а протягом наступних 2 хвилин виходить 1,5 тони, що можна пояснити зменшенням температурного впливу на силу Архімеда.

На рис. 2.27 представлено графічну залежність температури середовища на дзеркалі горіння від часу подавання пінних струменів. На графіку представлено як мінімальне, так і середнє значення температури потоку.

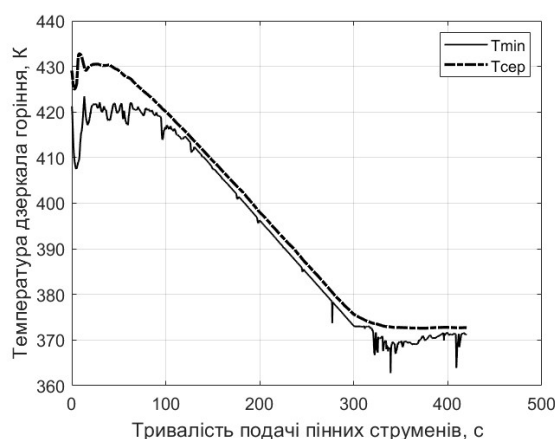


Рис.2.27. Графічна залежність температури на дзеркалі горіння від часу подачі піни

Як видно із графіка – зниження температури із 433 К до 373 К призводить до дещо інерційного зниження середньої температури середовища, тому на поверхню виринається пара, а не піна. Піна, як видно із графіка, починає виходити на 322 секунді ($T_{min} = 367K$), тобто із затримкою в 20 с.

2.2.6. Визначення кількості піни на дзеркалі горіння

Піна K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5). Початок з 322 с до 420 с. Вийшло (рис. 2.26) $M=4060-2900=1160$ кг (K12,5).

$$\text{Отже } Q_m = (1160 / (420 - 322)) = 11,8 \text{ кг/с};$$

$$Q_v = Q_m \times K = 11,8 \times 12,5 = 148 \text{ л/с}$$

Час умовного гасіння (досягнення товщини 100 мм на дзеркалі, $V=35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,148=237 \text{ с}$

Повний час гасіння $322+237=559 = 560 \text{ с}$

На рис. 2.28 представлено залежність конвективного теплового потоку від тривалості подавання піни в резервуар.

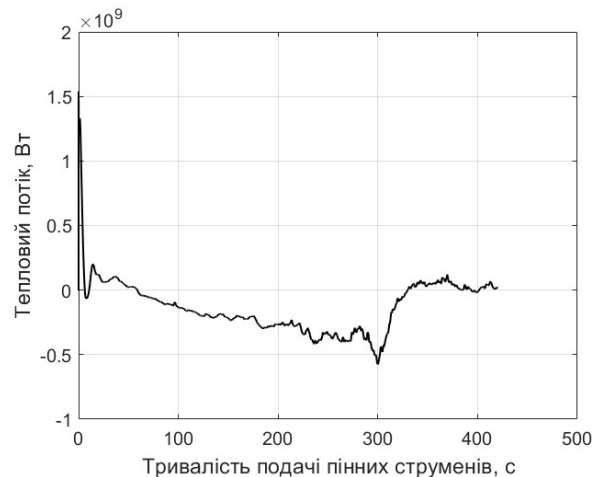


Рис.2.28. Графічна залежність конвективного теплового потоку від часу

Конвективний тепловий потік на кінцевому етапі прогріву становить 244 МВт. В процесі подавання піни відбувається певне збурення, після якого він спадає, коливаючись в міру охолодження дзеркала горіння в діапазоні від 0 до 500 МВт, тобто відбувається зменшення температури. Вихід пари призводить до різкого охолодження, піковою потужністю 0,1 ГВт. Подальше піднімання температури викликане штучним підтримуванням поверхні горіння на рівні 373 К (100 °С).

На рис. 2.29 зображено проінтегровану попередню залежність – енергію теплового потоку на дзеркалі горіння.

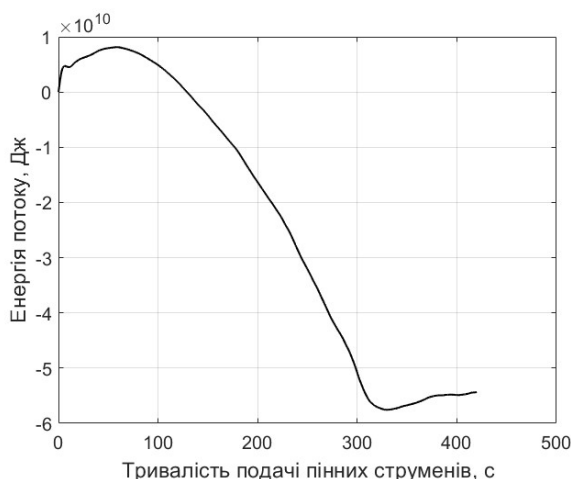


Рис. 2.29. Графічна залежність енергії потоку від часу

Як видно із графіка, в процесі подачі піни відбувається піднімання гарячих верхніх шарів бензину із подальшим нагрівом текучого середовища від його горіння, а енергія охолодження підводиться із запізненням на 130 с. Енергія охолодження становить близько 60 ГДж. Подальший підйом енергії в бік нагріву пов'язаний із недостатньою адекватністю моделі, тому що температура дзеркала залишається на рівні 100°C, що не відповідає дійсності.

2.2.7. Подавання піни різної інтенсивності і кратності

Необхідна мінімальна інтенсивність подавання піни в резервуар для підшарового гасіння становить 28 кг/с, резервуар діаметром 16 м. З урахуванням гідростатичного тиску ця піна подається під тиском 2 атм на виході із сопла. Збільшивши напір до зростання тиску в 3 атм, отримаємо 42 кг/с, відповідно, в 4 атм – 56 кг/с. Тобто ми так збільшимо мінімальну необхідну інтенсивність подачі в 1,5 та 2 рази.

На рис. 2.30 зображено графічну залежність маси піни K10 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску.

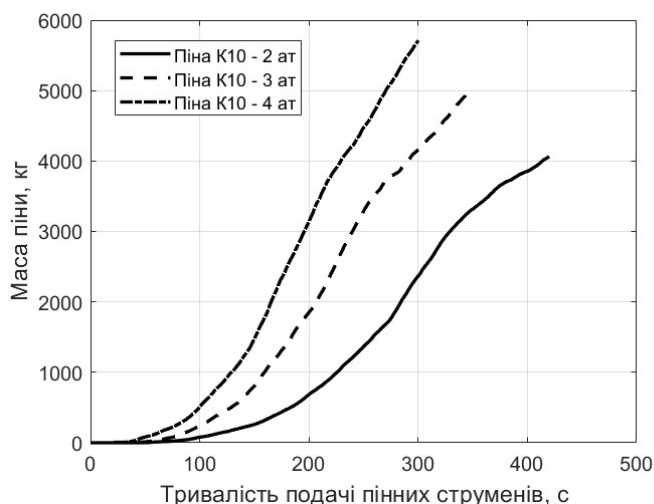


Рис. 2.30. Графічна залежність маси піни на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску

Як видно із графіка, маса пари від піни яка подається під тиском 2 атм та виходить на поверхню горіння протягом 5 хвилин, приблизно дорівнює 2500 кг. Піна, що подається під тиском 3 атм досягає цього рівня протягом 220 с, а піна, що подається під тиском 4 атм – протягом 180 с. Отже, як видно із рисунка, чим більший тиск подаванні піни, тим швидший її вихід. Тобто температуру дзеркала горіння слід перемкнути із 160 °C до 100 °C швидше, пропорційно до виходу маси піни значенням 2500 кг. Для тиску 3 атм це буде 220 с, а для тиску 4 атм – 180 с. Також слід збільшити тривалість дослідження моделі після скидання температури, оскільки, як показали дослідження, спочатку іде викид пари, а потім, в міру зменшення середньої температури, вже іде піна. Для визначення продуктивності виходу піни на поверхню горіння встановимо часовий проміжок 120 с після виходу піни

Це ж саме проробимо з піною кратністю 5.

На рис. 2.31 зображено графічну залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску.

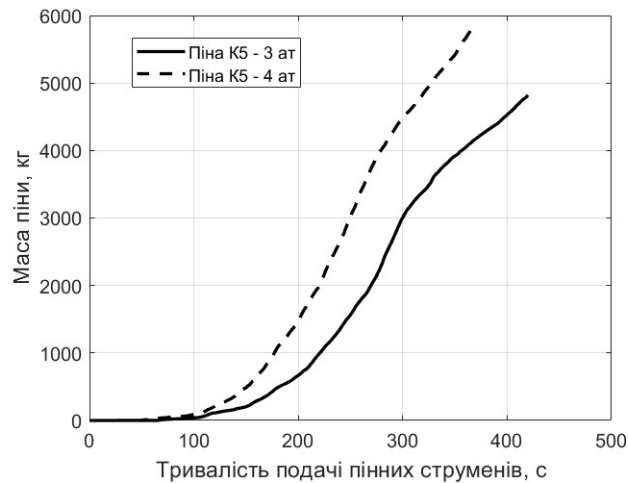


Рис. 2.31. Графічна залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску

На рисунку 2.31 не подано піну K5 під тиском 2 ат, оскільки вона не пробивається на поверхню протягом 5 хвилин.

Виходячи з цього, подальші дослідження процесу підшарового гасіння проведемо для таких параметрів піни:

1. Піна K10-3 атм 220 с+120 с;
2. Піна K10-4 атм 180 с+120 с;
3. Піна K5-3 атм 285 с+120 с;
4. Піна K5-4 атм 245 с+120 с.

Результати моделювання представлені на рис. 2.32 – 2.38.

Графічна залежність масових витрат піни K10 і пари на виході з резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 2.32.

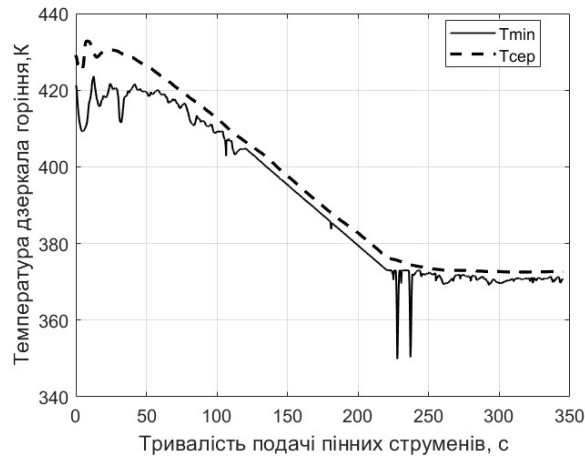


Рис. 2.32. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 3 атм).

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 3 атм із 225 с до 340 с (рис. 2.30) становить:

$$4335 - 2590 = 1745 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 15,2 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 190 \text{ л/с;}$$

Q_m – масова витрата піни, кг/с;

Q_v – об’ємна витрата піни, л/с.

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,19 = 184 \text{ с}$.

Повний час гасіння: $225 + 184 = 409 \text{ с}$.

Графічна залежність масових витрат піни K10 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 2.33.

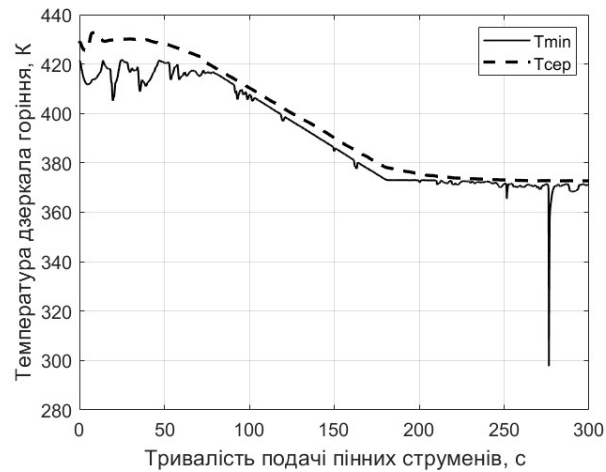


Рис. 2.33. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 4 атм)

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 4 атм із 200 с до 300 с (рис. 2.30) становить:

$$5688 - 3142 = 2546 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 25.5 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 318 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V=35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,32 = 110 \text{ с.}$

$$\text{Повний час гасіння: } 200 + 110 = 310 \text{ с.}$$

Графічна залежність масових витрат піни K5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 2.34.

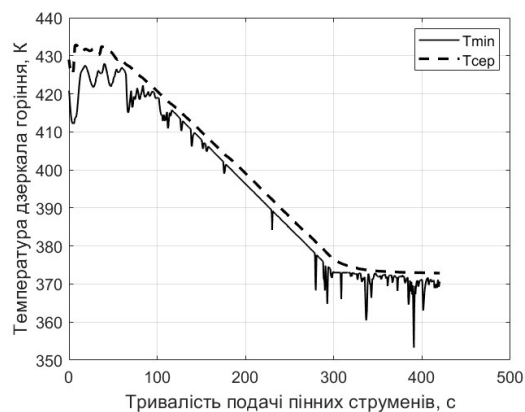


Рис. 2.34. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 3 атм)

Вихід піни K5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 3 атм із 280 с до 420 с (рис. 2.31) становить:

$$4800 - 2341 = 2459 \text{ кг (K6,25);}$$

$$Q_m = 17,6 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 110 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,110 = 318 \text{ с.}$

$$\text{Повний час гасіння: } 280 + 318 = 598 \text{ с.}$$

Графічна залежність масових витрат піни K5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 2.35.

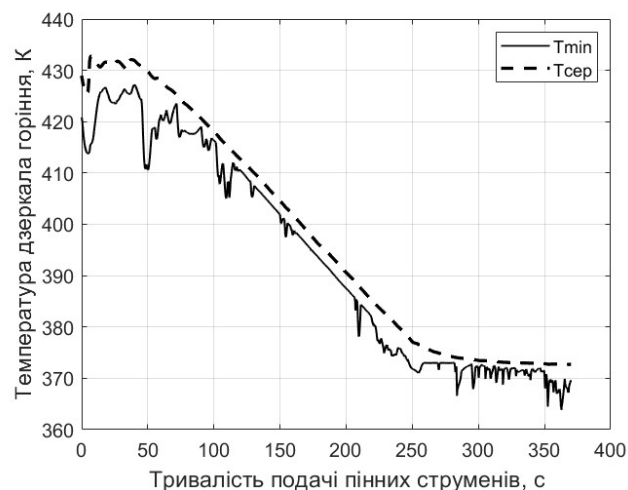


Рис. 2.35. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 4 атм)

Вихід піни K5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 4 атм із 250 с до 370 с (рис. 2.31) становить:

$$5893 - 3000 = 2893 \text{ кг (K6,25);}$$

$$Q_m = 24,1 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 150,7 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,151 = 232 \text{ с}$.

Повний час гасіння: $250 + 232 = 482 \text{ с}$.

Результати, отримані внаслідок моделювання, представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати дослідження моделі

Піна	Час подачі до гасіння, с	Витрати піни, кг	Витрати піноутворювача, кг
K10 - 3 ат	410	17220	1377
K10 - 4 ат	310	17360	1389
K5 - 3 ат	598	25116	4019
K5 - 4 ат	482	26992	4319

Виходячи з отриманих даних, робимо висновок, що подавання піни K5 займає більше часу ніж подавання піни K10 та є економічно не вигідним.

2.2.8. Визначення об'єму додаткового витіснення бензину

Додаткове витіснення бензину, крім його розширення від прогріву, відбувається ще й через об'єм піни, яка знаходиться в резервуарі.

На рис. 2.36 представлено графічну залежність об'єму піни в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання.

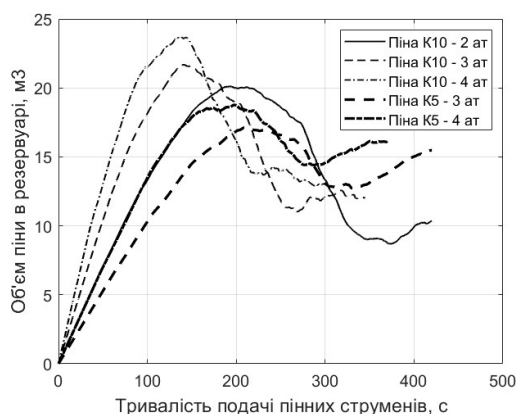


Рис. 2.36. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як бачимо, максимальне значення об'єму піни в резервуарі становить 20 - 24 м³ у випадку піни K10 та 17 – 19 м³ у випадку піни K5. Тобто вплив різниці в об'ємах піни на витискання бензину – незначний. Однак різна охолоджувальна здатність піни з різними параметрами теж впливатиме на об'єм витіснення бензину.

На рис. 2.37, представлено енергію конвективного теплового потоку для піни з різними параметрами залежно від тривалості подавання струменів.

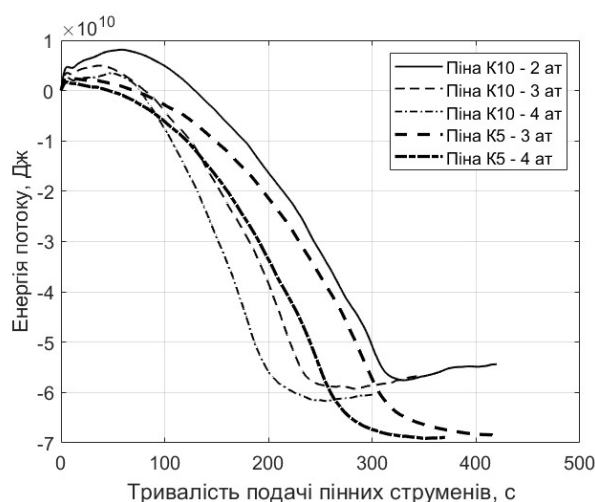


Рис. 2.37. Залежність енергії конвективного теплового потоку від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як видно із рис. 2.37 охолоджувальна здатність пінних струменів є різною. Вона залежить від параметрів піни, продуктивності та тривалості подачі. Слід відмітити, що охолоджувальна здатність піни K5 є кращою за K10.

На рис. 2.38 представлено залежність маси бензину в резервуарі від тривалості подачі пінних струменів із різними параметрами.

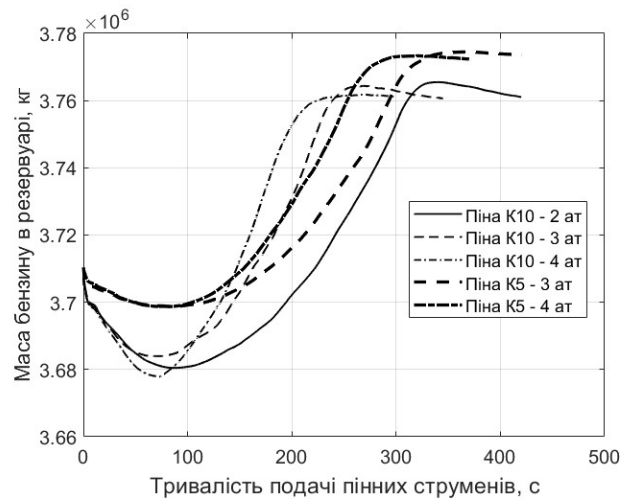


Рис. 2.38. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як видно із рисунка, маса бензину в резервуарі зменшується лише протягом перших 100 с і залежить від кратності піни. В подальшому часі весь витіснений бензин повертається до попереднього рівня внаслідок його охолодження. Із рисунка видно вплив кратності піни на витіснення бензину. Чим вища кратність піни, тим більше бензину витісняється з резервуара.

Додатковий об'єм, який варто виділити в процесі гасіння пожежі, визначаємо за формулою:

$$V_{\text{дод}} = \frac{M_1 - M_2}{\rho_{\text{сер}}}, \quad (2.10)$$

де M_1 — кінцева маса бензину на момент закінчення прогріву, кг

M_2 — нижнє значення маси бензину при подаванні протягом перших 100 с при різних значеннях кратності, кг.

Для піни K10 значення M_2 становить 3677950 кг, а для піни K5 значення M_2 — 3698730 кг, згідно з рис. 2.38;

$\rho_{\text{сер}}$ — середнє значення густини бензину, кг/м³.

1. У випадку використання піни K10 $V_{\text{дод}}$ становить 51 м³;

2. У випадку використання піни K5 $V_{\text{дод}}$ становить 20 м^3 .

Отже, з урахуванням попереднього прогріву бензину під час його горіння протягом 30 хв необхідний резервний об'єм становить:

$$V_{\text{рез}} = V_1 + V_{\text{дод}}. \quad (2.11)$$

1. У випадку гасіння піною K10 $V_{\text{рез}}$ становить 701 м^3 (12,7%);

2. У випадку гасіння піною K5 $V_{\text{рез}}$ становить 670 м^3 (12,1%).

Із цього робимо висновок, що використання піни K5 для підшарового гасіння пожежі в резервуарах із паливом є недоцільне.

Піна K10 повинна подаватися з максимально можливою продуктивністю, оскільки її подача визначає як час гасіння, так й об'єм додаткового витіснення бензину.

2.3. Висновки до розділу

1. Побудована в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations модель цілком адекватно описує рух пінних струменів в резервуарі із рідким гарючим паливом.

2. Недоліки моделі, а саме неможливість врахування фазових перетворень піни та вплив суміші водяної пари і повітря на процес горіння бензину не впливають на визначення параметрів руху затоплених пінних струменів. Ці недоліки моделі впливають на оцінку процесу підшарового гасіння в цілому, тому дана модель потребує подальшого вдосконалення.

3. Необхідний резервний об'єм резервуара у випадку тривалості горіння 30 хв до початку подавання піни кратністю 10 становить 13%.

4. Ефективність підшарового гасіння пожежі резервуара залежить від температури прогрітого бензину. Чим швидше розпочнеться процес гасіння (подавання піни), тим вищою буде ефективність.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПОДАВАННЯМ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ

3.1. Визначення параметрів (кратності, стійкості) компресійної піни та її поведінки при взаємодії з ЛЗР

3.1.1. Визначання стійкості та кратності компресійної піни

Для генерування компресійної піни було використано піноутворювач загального призначення «Барс S-2» та проведено дослідження з генеруванням компресійної піни під шар та на поверхню ЛЗР.

Випробування проводилось за таких показників навколишнього середовища, за яких сумарна похибка методики визначення перебуває на рівні заданої:

- температура повітря від +10 до +25°C;
- атмосферний тиск від 84 до 106,6 кПа;
- відносна вологість повітря від 40% до 90%.

Під час проведення дослідів умови були такими:

- температура повітря +14°C;
- атмосферний тиск 98,92 кПа;
- відносна вологість повітря 63%,

що задовільняє вимоги до проведення випробувань згідно з європейськими нормами [76]. Також для випробування було використано:

- ваги з межею зважування 10 кг з ціною поділки 0,005 кг;
- манометр згідно з [77] з верхньою межею вимірювання 1 МПа і ціною поділки 0,01 МПа;
- термометр згідно з [78] з діапазоном вимірювання від 0 до 100°C і ціною поділки 1°C;
- циліндр 1-500 згідно з [79] з ціною поділки 10 см³;
- секундомір з межею вимірювання 3600 с і ціною поділки 0,2 с;

- вода питна згідно з [80];
- посудина мірна об'ємом 12 л.

Схема пристрою для визначення кратності та стійкості піни, згідно з [76] зображена на рис. 3.1.

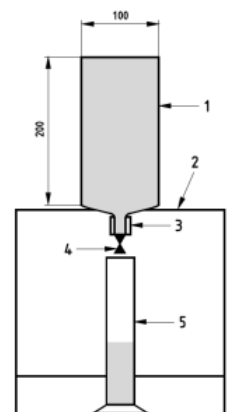


Рис. 3.1. Схема пристрою для визначення кратності і стійкості піни: 1 – бак для збирання піни; 2 – підставка; 3 – поліетиленова трубка; 4 – кран; 5 – циліндр

Для визначення стійкості і кратності піни використовувались методи з [76] для піни низької кратності. Також для цього дослідів був виготовлений піноприймач (рис. 3.2) для визначення кратності і стійкості піни низької кратності. Як матеріал для виготовлення піноприймача використали лист з алюмінієвого сплаву.

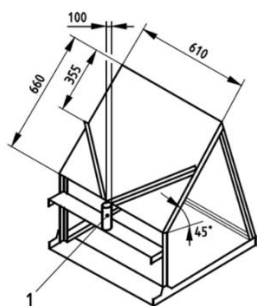


Рис. 3.2. Піноприймач для визначення кратності та стійкості піни: 1 – зливний пристрій

Хід проведення досліджень. У мірній посудині приготовано 12 л робочого розчину піноутворювача (6%). Температура робочого розчину піноутворювача становила 19 °С, що відповідає нормам (17,5+/-2,5 °С). Робочий розчин піноутворювача вилито у лабораторну установку типу вогнегасника ВВ-12 (рис. 3.3). Після чого зважено бак, підставку та циліндр і визначено їх загальну масу в кілограмах (m_1).



Рис. 3.3. Лабораторна установка типу вогнегасника для генерування компресійної піни: 1 – корпус вогнегасника (посудина для змішування води та ПУ); 2 – з'єднувальні шланги; 3 – запірні вентиля; 4 – балон із стиснутим повітрям; 5 – редуктор із манометром

Балон із повітрям приєднано до лабораторної установки та встановлено тиск повітря над розчином у межах від 0,6 до 0,65 МПа.

Оскільки для генерування та подавання компресійної піни не потрібен ствол-генератор, то подавання піни здійснено з гнучкого резинового трубопроводу, внутрішній діаметр якого становить 10 мм. Тиск у корпусі випробувального приладу – 0,6 МПа. Після встановлення тиску на редукторі, струмінь піни спрямувано в центр піноприймача, поверхню якого попередньо змочено робочим розчином піноутворювача. Через 30 с під піноприймач встановлено бак із закритим краном. Після того як бак заповнився піною, подавання піни припинено, бак забрано з-під піноприймача, лінійкою знято надлишок піни на рівні країв бака і увімкнуто

секундомір. Заповнений піною бак встановлено на підставку, а під кран бака – циліндр. Визначено масу бака наповненого піною разом з підставкою і циліндром (m_2). Маса піни в баку (m_3) дорівнює різниці між m_2 і m_1 ($m_2 - m_1 = m_3$).

Після проведених дій відкрито кран і виміряно тривалість стікання в циліндр розчину піноутворювача масою 25% і 50% від початкової маси піни в баку. Кран відрегульовано таким чином, щоб в циліндр стікав розчин, а не піна. Цього було досягнуто візуальним контролем рівня рідини в пластмасовій трубці на виході перед краном. Визначена тривалість стікання є мірою стійкості піни. Кратність піни обчислено за формулою:

$$K = \frac{V_p \times \rho_p}{m_2 - m_1}, \quad (3.1)$$

де V_p – об'єм піни, що дорівнює внутрішньому об'єму «пінозбирача», л;

ρ_p – густина робочого розчину. Згідно з рекомендаціями [76], густина робочого розчину приймається рівною 1 кг/л;

m_1 – сумарна маса підставки, циліндра і бака, кг;

m_2 – сумарна маса підставки, циліндра і бака з піною, кг.

Цю серію дослідів було проведено три рази. На кожен дослід було приготовано 12 л нового робочого розчину заданої концентрації (6%) та температурою 19 °С.

Таблиця 3.1

Результати досліджень із визначення стійкості
та кратності компресійної піни

Серія дослідів	m_1 , кг	m_2 , кг	m_3 , кг	V_p , л	K	K_{cp}	$\tau_{ст}$ для 25%,	$\tau_{стсер.}$ для 25%,	$\tau_{ст}$ для 50%,	$\tau_{стсер.}$ для 50%,
I серія дослідів	2,7485	2,872	0,124	1,7	13,7	13,7	210	209	379	377
II серія дослідів	2,7485	2,874	0,1255	1,7	13,5		215		386	
III серія дослідів	2,7485	2,87	0,1215	1,7	14		204		367	

3.1.2. Визначення впливу рідини (дизельне пальне та бензин) на руйнування піни при підшаровому подаванні та при подаванні на поверхню

З метою визначення ефективності компресійної піни при подаванні її на шар дизельного палива та бензину, проведено додатково декілька дослідів, а саме:

- подавання компресійної піни в 5-літрову скляну колбу на шар дизельного пального/бензину.

- подавання компресійної піни в 5-літрову скляну пусту колбу із додаванням дизельного пального/бензину.

У цих дослідах визначено, який проміжок часу компресійна піна зможе протриматись на шарі дизельного палива та бензину до повного її руйнування та зроблено порівняння (рис. 3.4).

В ході виконання досліджень в скляну 5-літрову колбу було залито 2 л бензину, після чого здійснювалось подавання компресійної піни на поверхню пального. Об'єм піни становив 2 л. Після закінчення подавання компресійної піни був увімкнений секундомір. Піна повністю зруйнувалась за 470 с (7 хв 50 с). Те ж саме було пророблено з дизельним паливом та встановлено, що піна повністю зруйнувалась за 14285 с (238 хв).

В ході виконання другої частини досліджень в скляну 5-літрову колбу було подано компресійну піну. Об'єм, який заповнила піна, становив 2 літри. Після чого в колбу було залито 2 літри бензину і увімкнено секундомір. Піна повністю зруйнувалась через 440 с (7 хв 20 с). Теж саме було пророблено з дизельним паливом та встановлено, що піна повністю зруйнувалась за 2621 с (43 хв 7 с).

В ході виконання цих досліджень, встановлено, що компресійна піна при подаванні на шар бензину руйнується у 30 разів швидше, ніж при подаванні на шар дизельного пального (470 с проти 14285 с), та у 6 разів швидше при подаванні під шар бензину, ніж при подаванні під шар дизельного пального (440 с проти 2621 с). Результати досліджень наведено в табл. 3.2.

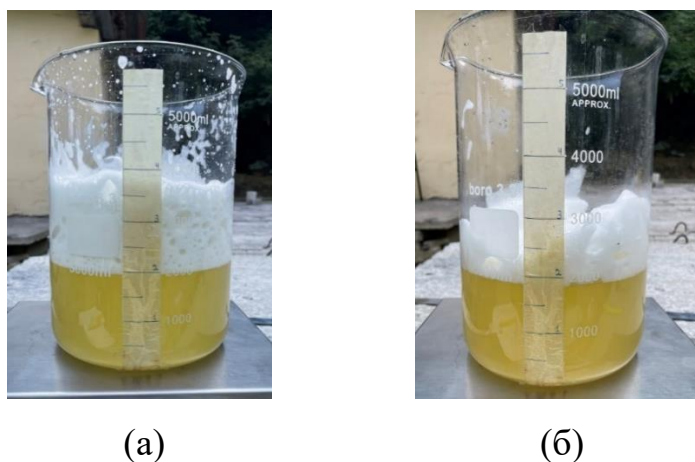


Рис 3.4. Визначення стійкості компресійної піни при взаємодії з бензином (а) та дизельним паливом (б)

Таблиця 3.2

Результати досліджень із визначення стійкості компресійної піни при взаємодії з дизельним паливом та бензином

Вид подачі піни:	Вид пального:	Номер досліджу	Об'єм піни, л	Об'єм дизельного пального, л	Об'єм бензину, л	Час руйнування піни, с
на шар пального	дизельне пальне	1.1	2	2		14285
		1.2	2		2	470
під шар пального	бензин	2.1	2	2		2621
		2.2	2		2	440

3.2.1 Розроблення установки для генерування компресійної піни та проведення дослідження з підшарового гасіння пожеж в макетному резервуарі

У дослідженні визначено ефективність підшарового гасіння резервуарів з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою компресійної піни в полігонних умовах на прикладі макетного резервуара об'ємом 0,25 м³.

Основою для проведення дослідження з підшарового гасіння пожежі в макетному резервуарі стала самостійно розроблена установка для генерування компресійної піни (рис. 3.5) яка передбачає:

- зберігання робочого розчину піноутворювача;
- подавання робочого розчину піноутворювача в камеру змішування за допомогою повітря;
- перемішування робочого розчину піноутворювача з повітрям в камері змішування та утворення компресійної піни;
- регулювання тиску у балонах з повітрям;
- подавання готової компресійної піни на гасіння.

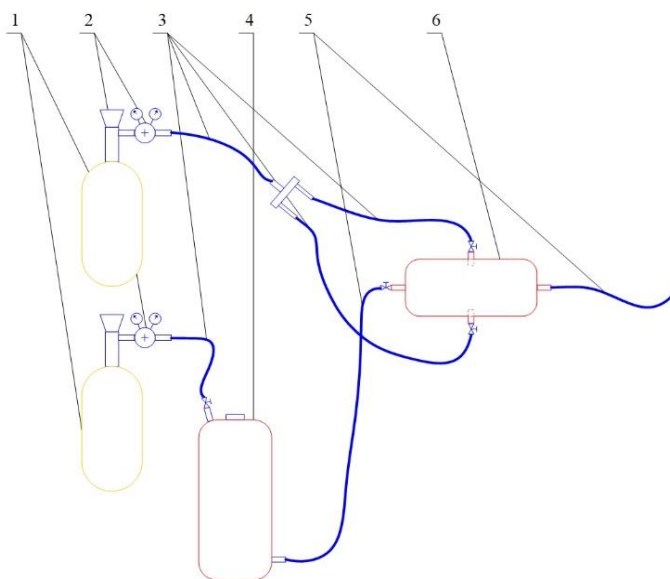


Рис. 3.5. Установка для генерування компресійної піни: 1) балони з повітрям; 2) редуктор з манометрами високого та середнього тиску; 3) міцні шланги для подавання повітря $\varnothing 10$ мм; 4) ємність (типу вогнегасника) з робочим розчином піноутворювача ($V = 12$ л); 5) гнучкі резинові трубопроводи для подавання робочого розчину/піни; 6) камера змішування робочого розчину із повітрям.

Значну увагу приділено забезпеченню герметичності всіх з'єднань та ретельному калібруванню клапанів, щоб гарантувати стабільну, безперебійну та ефективну роботу системи. Центральним і ключовим елементом установки є камера змішування, де відбувався процес генерування компресійної піни та подавання її на гасіння. Повітря надходило до камери змішування через два спеціально вмонтовані штуцери,

до яких під'єднувалися шланги високого тиску $\varnothing 10$ мм, які забезпечували установку необхідним об'ємом повітря для:

- змішування з робочим розчином піноутворювача та утворення компресійної піни;
- подавання компресійної піни до резервуара на гасіння.

Загальний вигляд камери змішування можна побачити на рис. 3.6.

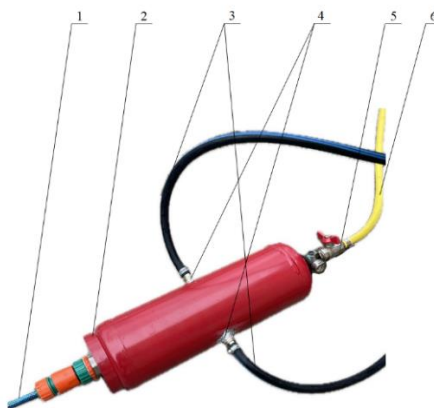


Рис. 3.6. Загальний вигляд камери змішування: 1) гнучкий резиновий трубопровід для подавання готової компресійної піни; 2) камера змішування; 3) міцні шланги для подавання повітря; 4) штуцери для подавання повітря в середину камери змішування; 5) перекидний кран; 6) гнучкий резиновий трубопровід для подавання робочого розчину в камеру змішування.

Камеру змішування виготовлено з корпусу вогнегасника об'ємом 3 л. Цього достатньо щоб генерувати необхідну кількість компресійної піни на гасіння макетного резервуара об'ємом $0,25 \text{ м}^3$. Для генерування компресійної піни було використано піноутворювач загального призначення «Барс S-2». Як горючу речовину використовували бензин у кількості 100 літрів, який було залито безпосередньо в резервуар перед початком експерименту. Всього було проведено три експерименти з підшарового подавання компресійної піни. Перед кожним експериментом система наповнювалася 12 л 6% розчину піноутворювача. Для забезпечення безпеки

експерименту резервуар з бензином встановлено на відкритому майданчику. Також для проведення експерименту було використано:

- ваги з межею зважування 10 кг з ціною поділки 0,005 кг;
- манометр згідно з [77] з верхньою межею вимірювання 1 МПа і ціною поділки 0,01 МПа;
- термометр згідно з [78] з діапазоном вимірювання від 0 до 100°C і ціною поділки 1°C;
- циліндр 1-500 згідно з [79] з ціною поділки 10 см³;
- секундомір з межею вимірювання 3600 с і ціною поділки 0,2 с.

Перед початком кожного експерименту готувалось 12 л робочого розчину піноутворювача та виливалось у ємність типу вогнегасника (рис. 3.5) для зберігання робочого розчину. Після цього ємність герметично закривалась та приєднувалась до балону із стиснутим повітрям та до камери змішування. Цей балон із стиснутим повітрям використовувався тільки для виштовхування робочого розчину піноутворювача з ємності для зберігання до камери змішування через гнучкі резинові трубопроводи. Утворення компресійної піни відбувалося в камері змішування, яка мала окреме джерело повітря. Перед початком дослідження установка для генерування компресійної піни була під'єднана до дна макетного резервуара об'ємом 0,25 м³ (рис. 3.7).

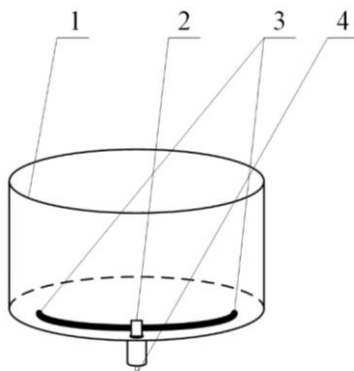


Рис. 3.7. Загальний вигляд макетного резервуара з розподільчою системою: 1) макетний резервуар ($V = 0,25 \text{ м}^3$); 2) розподільча система для подавання компресійної піни; 3) місце виходу компресійної піни; 4) місце приєднання установки для генерування компресійної піни.

Резервуар виготовлений зі сталі та має форму циліндра з герметичним дном та відкритим дахом. На дні резервуара розташована розподільча системи для подавання компресійної піни, яка забезпечує рівномірний розподіл піни під шаром горючої рідини. На початку експерименту бензин у резервуарі підпалювався відкритим полум'ям. Висота полум'я досягала 2-3 розмірів резервуара (рис. 3.8). Через 60 секунд від початку горіння подавалась компресійна піна.



Рис. 3.8. Загальний вигляд макетного резервуара після підпалу горючої рідини

Піна подавалась під шар горючої рідини через систему, змонтовану на дні резервуара. Завдяки дії повітря в камері змішування утворювалась компресійна піна з низькою кратністю, яка рівномірно розподілялася по поверхні горючої рідини. Час гасіння фіксувався секундоміром, починаючи з моменту початку подавання піни і до повного припинення горіння. Додатково проводився візуальний контроль покриття дзеркала горіння компресійною піною після гасіння, яке зображено на рис. 3.9.



Рис. 3.9. Загальний вигляд компресійної піни на поверхні горючої рідини після гасіння пожежі в макетному резервуарі.

При проведенні досліджень особлива увага приділялась стійкості піни після гасіння. Витрати розчину обчислювались шляхом вимірювання залишків після кожного експерименту. Це дозволяло оцінити ефективність системи у витратах ресурсів. У результаті проведених експериментів було отримано дані про ефективність підшарового гасіння бензину у макетному резервуарі за допомогою компресійної піни. У табл. 3.3 узагальнені основні результати досліджень.

Таблиця 3.3.

Результати підшарового гасіння бензину компресійною піною

№ Дослідів	Об'єм розчину, л	Використано розчину, л	Кратність	Тиск подавання, МПа	Час гасіння, с
1	12	3,1	10,7	4	56
2	12	2,9	10,3	4	52
3	12	3,2	10,8	4	57

Компресійна піна продемонструвала здатність ефективно ізолювати дзеркало горіння бензину. Час гасіння становив від 52-57 секунд залежно від експерименту. Це вказує на стабільну ефективність підшарового способу гасіння, який забезпечує швидке припинення горіння завдяки створенню непроникного шару піни. Система дозволила досягти ефективного гасіння при використанні 2,9-3,2 л розчину піноутворювача. Це свідчить про економічну доцільність компресійної піни, оскільки

її низька кратність забезпечує щільний і стабільний шар на поверхні горючої рідини. Кратність компресійної піни становила 10,3-10,8. Завдяки цьому піна утворює густий і щільний шар, який ізолює поверхню горючої рідини та перешкоджає випаровуванню парів. Це критично важливо для запобігання повторному займанню та ефективного контролю над горінням. Використання тиску 4 МПа забезпечило рівномірний розподіл піни по поверхні бензину. Це дозволило значно зменшити час гасіння та знизити втрати горючої рідини під час пожежі. Тиск подавання виявився достатнім для створення стабільної компресійної піни. Після припинення подавання піни, її шар утримувався на поверхні бензину протягом тривалого часу, ефективно перешкоджаючи випаровуванню горючих парів. Це підтверджує здатність компресійної піни створювати довготривалу ізоляцію, необхідну для запобігання повторному займанню.

3.2.2. Перевірка адекватності математичної моделі при застосуванні компресійної піни підшаровим способом на прикладі резервуара 0,25 м³

Відповідно до проведеного дослідження з підшарового гасіння пожежі в SolidWorks Flow Simulation спроектована модель макетного резервуара (рис. 3.10). Деякі дані взято із спроектованої математичної моделі РВС-5000. Внизу резервуара розміщено джерело подавання пінного струменя, зверху резервуар відкритий. Температура джерела горіння встановлена 160°C. Температура країв стінки резервуара встановлено 430°C. Текуче середовище – бензин. Тривалість прогріву встановлено 60 с.

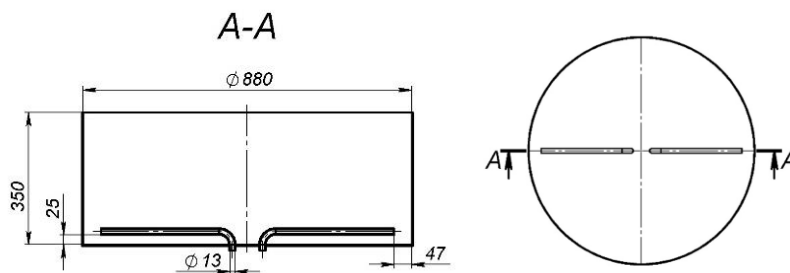


Рис.3.10. Модель макетного резервуара

Хромограма розподілу температури країв стінок макетного резервуара та текучого середовища, що проходить через вертикальну вісь симетрії макетного резервуара представлені на рис. 3.11.

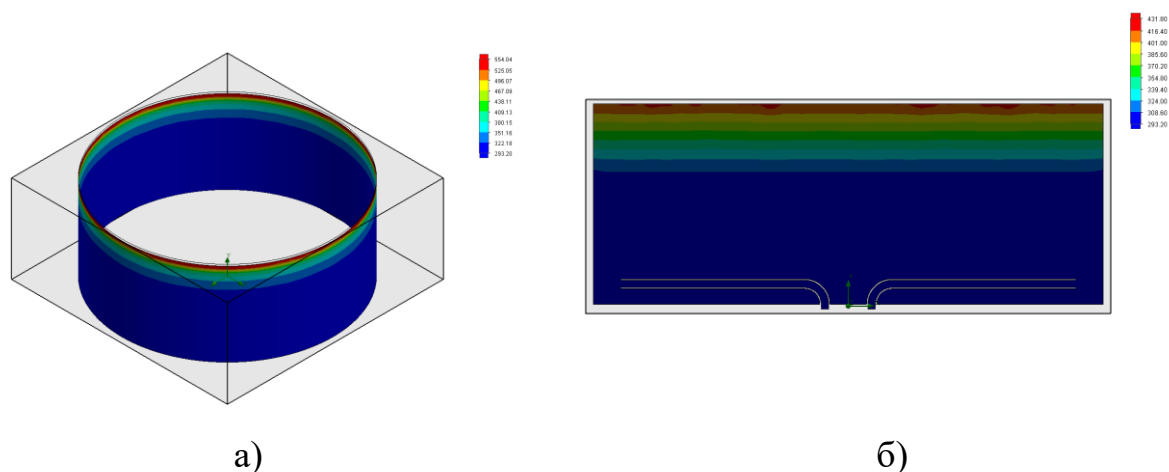


Рис. 3.11. а) температура країв стінок резервуара через 60 с прогріву; б) температура середовища на момент закінчення прогріву

Як видно із рисунка, текуче середовище макетного резервуара прогріте рівномірно.

Графічна залежність розподілу температури текучого середовища на момент закінчення прогріву за висотою макетного резервуара представлено на рис. 3.12.

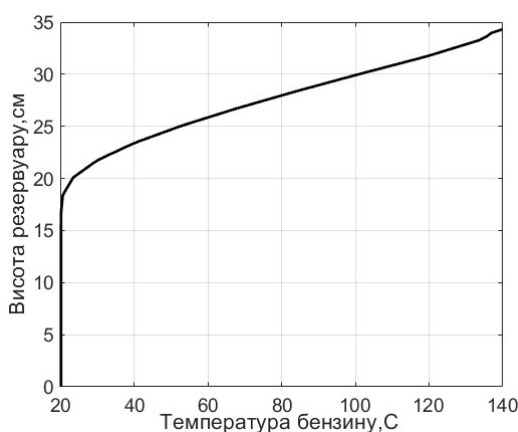


Рис. 3.12. Залежність температури бензину від висоти макетного резервуара

На рис. 3.13 представлено хромограму залежності густини бензину від його температури та графічну інтерпретацію цієї залежності вздовж вертикальної осі симетрії.

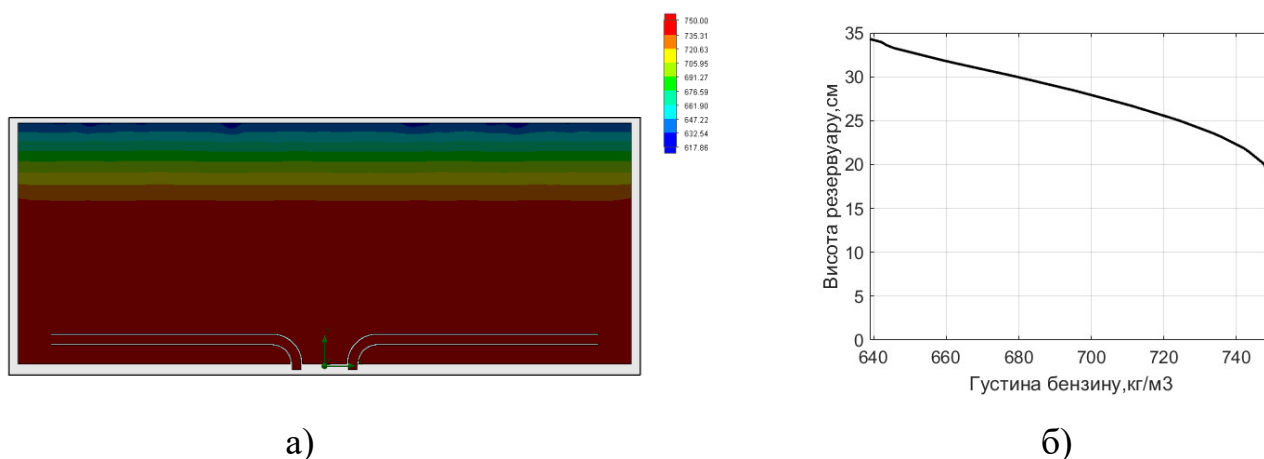


Рис. 3.13. а) густина бензину на момент закінчення прогріву; б) залежність густини бензину від координати висоти резервуара

Подавання піни здійснено із 2 сопел, які розташовані на дні макетного резервуара. Подану піну K10 продуктивністю 0,5 л/с протягом 57 с. Температуру рідини за висотою резервуара та на дзеркалі горіння після закінчення подавання піни зображено на рис. 3.14.

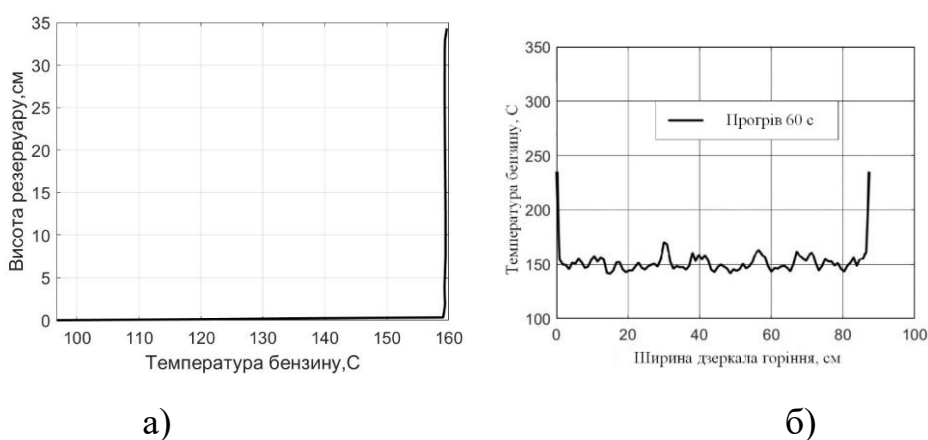


Рис. 3.14. а) Температура рідини за висотою резервуара; б) температура рідини на дзеркалі горіння

Хромограма розподілу температури на бічних поверхнях стінок макетного резервуара після закінчення подавання піни зображено на рис. 3.15.

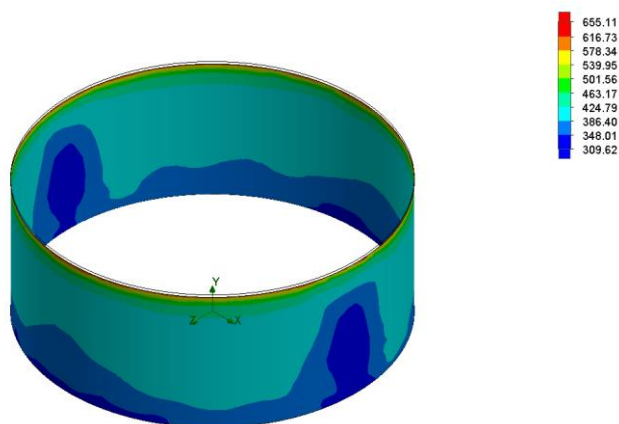


Рис. 3.15. Температура поверхні макетного резервуара після закінчення подавання піни

Як видно із рисунка температура поверхні стінок резервуара знижується з певним викривленням спектру по всій площі, що може бути викликано активним рухом текучого середовища внаслідок подавання компресійної піни підшаровим способом.

На рис. 3.16 представлено графічну залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання.

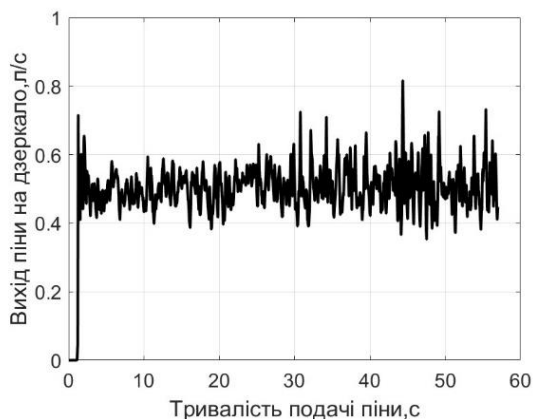


Рис. 3.16. Графічна залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання

Як видно із рисунка піна виходить на поверхню дзеркала горіння рівномірно. Середнє значення продуктивності виходу піни на дзеркало горіння протягом 57 с становить 0,494 л/с без врахування руйнування піни. Об'єм піни на поверхні дзеркала становить 28,2 л. Середнє значення товщини піни на дзеркалі горіння 4,6 см.

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась за формулою:

$$A = \frac{t_1 - t_2}{t_2} \times 100, \quad (3.2)$$

де t_1 – час гасіння у математичному моделюванні (57 с), t_2 – час гасіння встановлений під час лабораторного експерименту (55 с). Відповідно до формули (3.2) розбіжність у результатах становить майже 4%, що підтверджує адекватність отриманих результатів.

3.3. Горіння макетного резервуара та визначення швидкості прогріву і охолодження пального

Проведено дослідження з визначення температури прогріву стінок резервуара, дзеркала горіння та зони горіння на макетному резервуарі при горінні бензину. Основна мета дослідження - аналіз швидкості прогріву та охолодження пального, а також оцінка температурних показників у різних зонах резервуара під час горіння та гасіння. На макетний резервуар встановлено 6 термопар (рис. 3.17).

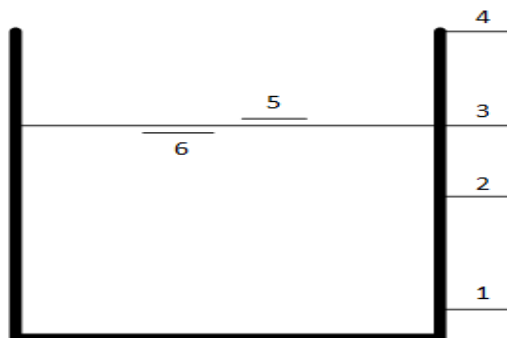


Рис. 3.17. Схема розміщення термопар на макетному резервуарі

Термопари 1 та 2 (Т1, Т2) встановлено на стінках резервуара нижче рівня дзеркала горіння; термопара 3 (Т3) встановлена на стінці резервуара на рівні дзеркала горіння; термопара 4 встановлено на стінці резервуара зверху резервуара; термопара 5 (Т5) встановлена над дзеркалом горіння; термопара 6 (Т6) встановлена на рівні дзеркала горіння.

Час вільного горіння бензину становить 60 с, після чого здійснюється подавання компресійної піни підшаровим способом. Для кількісної оцінки температурних змін в різних зонах резервуара та порівняння їх між собою результати експерименту занесено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Результати експерименту з прогріву та гасіння макетного резервуара

Час, с	Т1, °C	Т2, °C	Т3, °C	Т4, °C	Т5, °C	Т6, °C
0	14,7	14,9	16	18,8	15,1	14,1
5	14,7	14,9	15,9	18,7	15,1	14,2
10	14,6	14,9	16	18,7	15,1	14,2
Підпал пального						
15	14,6	14,9	15,9	18,7	15,1	14,2
20	14,6	14,9	15,9	18,7	44,5	14,7
25	14,6	14,9	15,9	19,8	79,3	15,1
30	14,6	14,8	28,3	24,2	134,9	22,7
35	14,7	14,8	53,3	46,2	250,4	28,1
40	14,8	14,8	82,8	98,4	372,8	36,8
45	14,9	14,8	122,9	167,6	424,9	53,4
50	15	14,9	159,2	232,3	497,5	57,5
55	15,1	15	184,8	292,6	500,7	71,8
60	15	15,1	204,5	352,6	494,4	171,2
Подавання піни						
65	15	15,2	222,1	468,4	477	122,5
70	15	15,2	235,3	526,8	445,7	114,9
75	15	15,4	214,6	571,8	424,4	130
80	15,7	15,4	197,7	491,7	417,5	119,2
85	15,8	15,5	150,4	511,6	412,9	99,9
90	15,5	15,5	128	470,8	340,3	79,2
95	15,5	16,2	78,3	401,8	279,2	54,3
100	15,3	17,2	93,8	237,9	124,3	33
105	15,4	17,6	46,7	92,5	76,7	20,7
110	15,7	17,3	40,6	84,8	22	16,9
115	15,2	17,3	39,1	79,3	22,2	18,6

Продовження табл. 3.4

120	15,7	17,6	38,3	73,4	22,5	20,3
125	15,3	17,9	38	71,1	20,9	19,3
Припинення подавання піни						
130	15,4	16,2	38,1	70,4	19,1	21,1
135	15,5	16,2	37,4	69,6	18,7	19,6
140	15,4	16,8	36,3	69,1	17,5	20,5
145	15,7	16,9	36,1	68,4	17,5	20,6
150	15,2	16,5	35,1	67,8	18,3	20,1
155	15,2	16,9	34,8	67,3	18,6	20
160	15,4	16,2	34,5	66,2	18,7	20,5
165	15	16,5	33,9	61	18,7	20,2
170	15,8	16,4	33,6	60,6	19,4	19,7

Дані з табл. 3.4 зображено у вигляді графіка на рис. 3.18. На графіку відображено залежність температури від часу під час горіння бензину (0–60 с) та після початку гасіння компресійною піною. Динаміка прогріву резервуара під час горіння та охолодження після застосування компресійної піни дозволяє візуально оцінити швидкість зміни температури в різних зонах резервуара, а також ефективність гасіння, що підтверджується зниженням температури після 60-ї секунди.

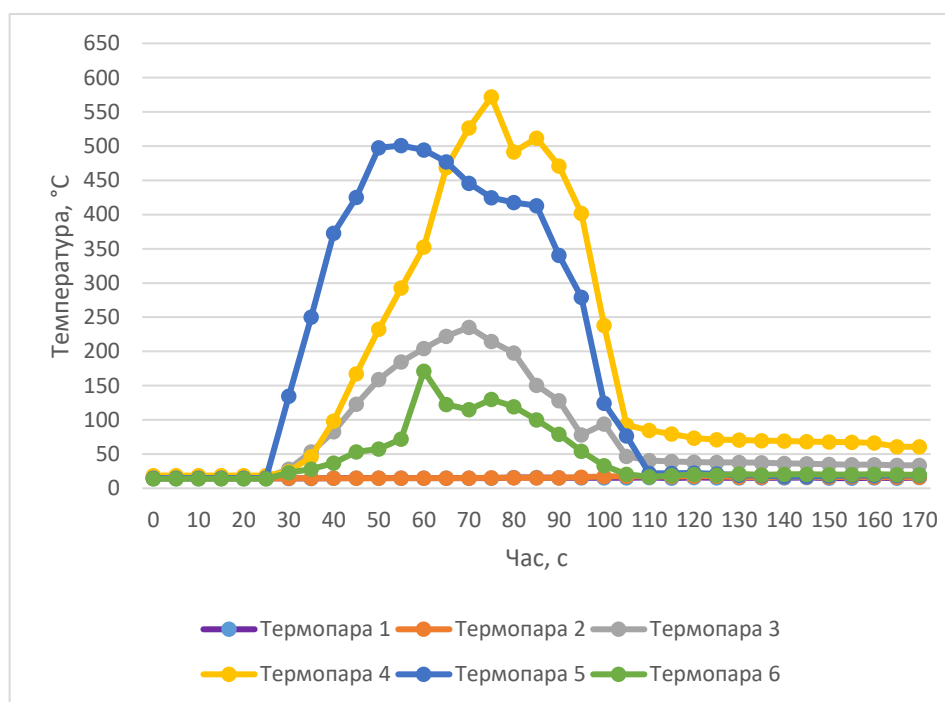


Рис. 3.18. Показники температури при прогріві та гасінні макетного резервуара

Дане дослідження є важливим для розуміння теплових процесів під час горіння пального в макетному резервуарі та оцінки ефективності підшарового гасіння за допомогою компресійної піни. Відповідно експерименту температура на дзеркалі горіння становить не більше 172 °С, що не відрізняється від [59, 74] не більше ніж на 6%.

3.4. Висновки до розділу

1. Дослідження стійкості та кратності компресійної піни, проведені з використанням піноутворювача «Барс S-2» та лабораторної установки типу вогнегасника ВВ-12, показали значення середньої кратності на рівні 13,7. Стійкість піни, визначена через тривалість стікання 25% і 50% розчину піноутворювача, продемонструвала високі показники: середній час стікання для 25% склав 209 с, для 50% – 377 с.

2. Встановлено, що при взаємодії компресійної піни з дизельним паливом піна повністю тримається на поверхні пального, не руйнуючись тривалий час (14285 с при подаванні на шар дизельного пального та 2621 с при подаванні під шар). При взаємодії з бензином компресійна піна має слабшу дію (приблизно у 30 разів менша стійкість при подаванні на шар бензину та у 6 разів менша стійкість при подаванні під шар), ніж при взаємодії з дизельним паливом.

3. Розроблена експериментальна установка для генерування компресійної піни забезпечує стабільний і керований процес. Вона дозволяє: зберігати робочий розчин піноутворювача, створювати та подавати компресійну піну з можливістю регулювання тиску. Дослідження підшарового гасіння бензину в макетному резервуарі об'ємом 0,25 м³ продемонстрували – компресійна піна гасить пожежу за 55 секунд при витраті 3 л розчину. Експерименти підтвердили ефективність компресійної піни для підшарового гасіння легкозаймистих рідин. Піна ефективно досягає поверхні нафтопродукту (бензин, дизельне паливо), ізолює зону горіння, блокує надходження горючих парів до вогню та запобігає повторному займанню.

4. Згідно проведеного математичного моделювання вдалось встановити, що розбіжність результатів експерименту в полігонних умовах на макетному резервуарі та математичної моделі становить близько 4%, що в свою чергу підтверджує адекватність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 4

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ І СПОСОБИ ЇЇ ПОДАВАННЯ

4.1. Схеми подавання компресійної піни

Підшарове подавання компресійної піни є одним із найефективніших способів гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами, що дозволяє швидко локалізувати та ліквідувати пожежу шляхом введення піни безпосередньо під шар горючої речовини. Цей спосіб вирізняється високою ефективністю завдяки здатності піни ізолювати горючу поверхню, знижуючи температуру та припиняючи горіння. Для подавання компресійної піни запропоновано дві схеми: з використанням стаціонарного пінозмішувача (рис 4.1) та з використанням переносного пінозмішувача (рис 4.2);

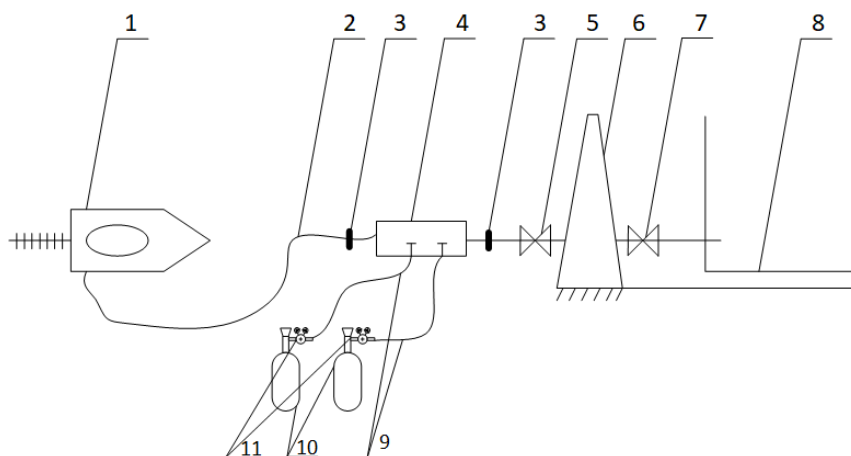


Рис. 4.1. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням стаціонарного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$); 3) з'єднувальні головки; 4) генератор компресійної піни; 5) вентиль подавання; 6) обвалування; 7) наповнювальний вентиль резервуара; 8) резервуар; 9) шланги для подавання газу (повітря); 10) балони з газом (повітрям) або компресор; 11) редуктор.

Стационарний пінозмішувач забезпечує стабільну роботу завдяки фіксованій конструкції та точному налаштуванню. Запропонована схема дозволяє пожежно-рятувальним підрозділам оперативно під'єднатись до стаціонарної системи підшарового гасіння в резервуарі та швидко розпочати гасіння. Також за цією схемою можуть використовуватись пожежні автоцистерни, які обладнані системою CAFS.

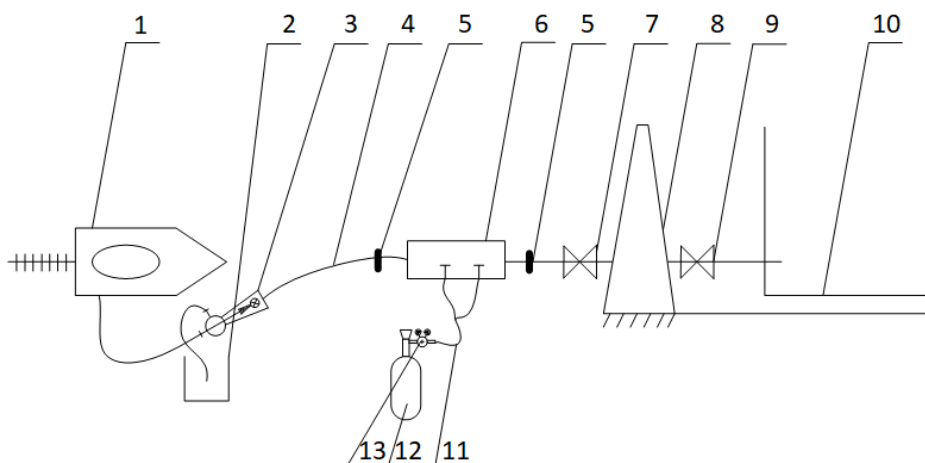


Рис. 4.2. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням переносного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) стороння ємність з піноутворювачем; 3) переносний пінозмішувач; 4) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$); 5) з'єднувальні головки; 6) генератор компресійної піни; 7) вентиль подавання; 8) обвалування; 9) наповнювальний вентиль резервуара; 10) резервуар; 11) шланги для подавання газу (повітря); 12) балон з газом (повітрям) або компресор; 13) редуктор.

Переносний пінозмішувач зазвичай використовують коли потрібно забрати піноутворювач із сторонньої ємності. Завдяки використанню переносного пінозмішувача не відбувається забруднення насоса пожежного автомобіля піноутворювачем. Експеримент з подаванням піни з використанням переносного пінозмішувача зображено на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Подавання піни від пожежної автоцистерни з використанням переносного пінозмішувача

4.2. Особливості застосування компресійної піни

Підшаровий спосіб гасіння пожеж нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) у резервуарах є спеціалізованою технологією, яка застосовується для ефективної ліквідації пожеж ЛЗР, таких як бензин чи дизельне пальне у вертикальних сталевих резервуарах. Цей спосіб базується на принципі подавання піни низької кратності безпосередньо в нижню частину резервуара, під шар палаючої рідини. Завдяки меншій густині піни порівняно з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне), вона спливає крізь рідину досягаючи поверхні, де утворює стійкий пінний шар. Цей шар ізолює дзеркало горіння не даючи горючим парам потрапити в зону горіння, тим самим перериває процес горіння, а також частково охолоджує поверхню нафтопродукту (бензин, дизельне пальне) знижуючи температуру до рівня нижчого за температуру спалаху. Такий підхід дозволяє гасити пожежу без прямого контакту з відкритим полум'ям, що значно знижує ризики для пожежних та забезпечує швидке припинення горіння. Для реалізації підшарового гасіння резервуари повинні бути обладнані відповідною інфраструктурою, яка забезпечує надійне подавання піни та її рівномірний розподіл. Основним елементом є система пінопроводів, яка складається з трубопроводів, виготовлених із корозійно стійких матеріалів, щоб витримувати агресивне середовище нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) і піноутворювачів. Ці пінопроводи прокладаються до нижньої частини резервуара, щоб піна надходила безпосередньо під шар нафтопродукту (бензин, дизельне пальне). На кінці

пінопроводів встановлюються спеціальні розподільні пристрої або пінні насадки, які забезпечують рівномірне введення піни та запобігають її змішуванню з рідиною на етапі подавання.

Традиційний спосіб підшарового гасіння із застосуванням повітряно-механічної піни є ефективними, але має певні обмеження, зокрема високе споживання ресурсів та вплив на екологічну безпеку. Компресійна піна, завдяки низькому споживанню води та піноутворювача, високій стійкості та ефективній ізоляції поверхні горіння, є перспективною альтернативою для підшарового гасіння. На основі експериментальних даних з гасіння пожеж в макетних резервуарах, а також досліджень вогнегасних властивостей компресійної піни розроблено рекомендації щодо її застосування під час гасіння пожеж в резервуарах з ЛЗР підшаровим способом.

Вогнегасна ефективність компресійної піни для підшарового гасіння визначається її кратністю, властивостями та вмістом піноутворювача. Рекомендована кратність компресійної піни – 10, при використанні 6% робочого розчину піноутворювача. Кратність піни (коефіцієнт розширення) суттєво впливає на ефективність підшарового гасіння. Результати експериментів і моделювання свідчать, що піна K10 утворює щільніший і стійкіший ізоляційний шар, ефективно ізолюючи поверхню горіння та запобігаючи повторному займанню.

Ці рекомендації визначають оптимальні параметри використання компресійної піни для підшарового гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах об'ємом до 5000 м³ із легкозаймистими рідинами (наприклад, бензин, дизельне паливо), базуючись на експериментальних дослідженнях і математичному моделюванні. Для резервуарів об'ємом від 5000 м³ інтенсивності подавання піни слід приймати згідно рекомендацій [59]. Для гасіння пожеж у резервуарах об'ємом від 5000 м³ до 20000 м³ включно рекомендується підвищувати інтенсивність подавання робочих розчинів піноутворювачів на 20–25%. Для резервуарів об'ємом понад 20000 м³ інтенсивність подавання слід збільшувати на 40–50% від установлених значень.

Спираючись на результати проведеного дослідження, продуктивність подавання компресійної піни безпосередньо впливає на швидкість і ефективність гасіння. На

основі досліджень: продуктивність подавання 56 кг/с – ефективна для гасіння резервуара діаметром 16 м (5000 м³). Запропонована продуктивність зменшує накопичення піни в резервуарі, знижуючи ризик переливу через витіснення бензину, витрати піни становлять 1389 кг.

Для безпечного та ефективного використання компресійної піни в підшаровому гасінні слід врахувати наступне:

- проведення спеціальної підготовки особового складу щодо роботи з системами для генерування компресійної піни;
- включення цих рекомендацій до протоколів гасіння пожеж в резервуарах, які обладнані системою підшарового гасіння, визначивши піну з кратністю 10 та продуктивністю 56 кг/с як стандартні параметри для гасіння пожеж ЛЗР в резервуарах підшаровим способом за допомогою компресійної піни;
- необхідний мінімальний резервний об'єм 13% від місткості резервуара для компенсації розширення бензину під час вільного горіння до початку подавання піни;
- використання піноутворювача «Барс S-2», так як експериментальні дослідження проводились із використання саме цього піноутворювача і показали високу сумісність із підшаровим гасінням;
- використання пожежних автоцистерн, які мають вбудовану технологію CAFS, або використання допоміжної системи типу CAFS MOBILE;
- створення, на базі оперативно-координаційного центру, механізму зворотного зв'язку для оцінки ефективності систем компресійної піни в реальних умовах і вдосконалення параметрів на основі оперативних даних.

Узагальнені поняття щодо порівняння підшарового способу гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами (бензин, дизельне паливо) за допомогою повітряно-механічної піни та компресійної піни зазначено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Порівняння підшарового способу гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою ПМП та КП

Критерій порівняння	Повітряно-механічна піна	Компресійна піна
Принцип дії	Піна подається через спеціальні пристрої (генератори) під шар пального, спливаючи на поверхню і створюючи ізолюючий шар	Піна формується в системі зі стисненим повітрям, подається під тиском під шар пального, швидко заповнює об'єм та ізолює горючий шар
Технологія генерування	Формується за допомогою змішування ПУ та води в генераторах піни	Використовує стиснене повітря, воду та ПУ для створення піни з високою щільністю і стабільністю. (не потребує спеціальних генераторів піни)
Швидкість подавання	Повільна, залежить від продуктивності генераторів і тиску в системі	Швидша, завдяки легкості піни та компактності системи
Ефективність гасіння	Ефективна для резервуарів із легкими нафтопродуктами, але може бути менш стабільною в умовах високої температури	Висока ефективність навіть в умовах високої температури, завдяки стабільності піни
Стійкість	Менш стійка до руйнування під дією високих температур	Висока стійкість через щільну структуру та менший вміст води
Витрата ПУ	Вища витрата через більший об'єм піни і меншу щільність	Нижча витрата завдяки компактності та ефективному розподілу піни
Екологічність	В основному генерується з фторвмісних плівкоутворювальних ПУ, які є шкідливими для екології	Генерується з ПУ загального призначення, які є біологічно м'якими

Ці рекомендації створюють практичну основу для впровадження інноваційної технології, сприяючи вдосконаленню практики пожежної безпеки в Україні.

4.3. Рекомендації щодо коригування деяких нормативних документів та довідників

Абзац 2 пункту 17.2.1 розділу 17.2. «Пожежогасіння, організація пожежної охорони» ВБН В.2.2-58.-94 «Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа» [26] доповнити:

«Пожежогасіння компресійною піною допускається передбачати для резервуарів при подаванні її під шар нафтопродуктів (бензин, дизельне паливо), за умови що резервуар обладнаний відповідною інфраструктурою, яка забезпечує надійне подавання піни та її рівномірний розподіл».

Розділ 3. «Терміни та визначення понять» ДСТУ 3789:2015 [28] «Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування» доповнити:

1. «пункт 3.2.1. Компресійна піна – це однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, отримана шляхом змішування піноутворювача, води та стиснутого повітря»;

2. «пункт 3.2.2. Система пожежогасіння компресійною піною (compressed air foam system «CAFS») - система, де піноутворювач і повітря під тиском безперервно подаються до води, що надходить із відцентрового пожежного насоса»

Розділ 10 «Методи випробування» ДСТУ 3789:2015 «Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування» [28] доповнити:

«пункт 10.11. «Метод випробування піни низької кратності (компресійної піни)». Метод випробування піни низької кратності описано в EN 1568-3 «Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню» [76], EN 1568-4 «Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню» [81] та в додатку D «Методика випробування з визначення параметрів піни, генерованої CAFS» ДСТУ EN 16327:2018 «Пожежогасіння. Напірні пінозмішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS)» [82].

Розділ 2. «Нормативні посилання» ДСТУ 3789:2015 [28] «Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування» доповнити:

1. EN 1568-3 «Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню» [76];

2. EN 1568-4 «Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню» [81];

3. ДСТУ EN 16327:2018 «Пожежогасіння. Напірні пінозмішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS)».

Пункт 2.2.2. розділу 2. «Основи припинення горіння та вогнегасні речовини» Довідника КГП [59] доповнити:

«Компресійна піна – це однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, отримана шляхом змішування піноутворювача, води та стиснутого повітря. Компресійна піна може бути застосована для гасіння пожеж класу А та В, а також для гасіння пожеж ЛЗР в резервуарах при подаванні під шар за умови, якщо резервуар обладнаний відповідною системою. Продуктивність подавання компресійної піни при підшаровому подаванні необхідно встановити не нижче 28 кг/с (рекомендовано 56 кг/с для резервуарів 5000 м³)».

4.4. Економічний ефект від впровадження гасіння компресійною піною

Для аналізу економічної ефективності використання компресійної піни для підшарового гасіння нафтопродуктів (бензин) у резервуарах розглянуто розрахунки для резервуара РВС-5000, змодельованого в середовищі SolidWorks Flow Simulations. Площа дзеркала горіння становить 346 м². Рекомендована інтенсивність подавання піни для підшарового гасіння, згідно з [4] становить 0,08 л/м³×с. Усі розрахунки виконано на основі цієї інтенсивності.

Таблиця 4.2

Геометричні параметри резервуарів та необхідна кількість стволів для охолодження резервуарів і генераторів піни для гасіння нафтопродуктів в них

Геометричні параметри резервуарів				Кількість водяних стволів для охолодження резервуара:		Кількість генераторів піни для гасіння резервуара, де зберігається:	
об'єм ($V_{рез}$), м ³	діаметр ($D_{рез}$), м	висота ($H_{рез}$), м	площа дзеркала горіння ($S_{рез}$), м ²	що горить	сусіднього	бензин, гас	дизпаливо
				А або аналог/ лафетні		ГПС-600/ ГПС-2000	
100	4,7	6	17,3	3/–	2/–	1/–	1/–
200	6,6	6	34,2	3/–	2/–	1/–	1/–
300	7,6	7,5	45,3	3/–	2/–	1/–	1/–
400	8,5	7,5	56,7	3/–	2/–	1/–	1/–
700	10,4	9	84,9	4/–	2/–	2/–	1/–
1 000	10,4	12	84,9	4/–	2/–	2/–	1/–
2 000	15,2	12	181,4	6/3	2/2	3/1	2/1
3 000	19	12	283,4	7/3	2/2	4/2	3/1
5 000	21	15	346,2	–/3	–/2	5/2	3/1
10 000	28,5	18	637,6	–/4	–/2	9/3	6/2
20 000	40	18	1256	–/5	–/2	17/5	11/4
30 000	45,6	18	1632,3	–/6	–/2	22/7	14/5
40 000	56,9	18	2541,5	–/8	–/2	34/11	22/7
50 000	60,7	18	2892,3	–/8	–/2	39/12	25/8

Згідно табл. 4.2 [61] необхідна кількість ГПС-600 для гасіння нафтопродуктів для РВС-5000 становить 5 шт.

Орієнтовний час подавання піни при гасінні бензину взято з табл. 4.3. [61]

Таблиця 4.3

Орієнтовний час подавання піни для гасіння нафтопродуктів в резервуарах

Вид та засоби подавання піни	Розрахунковий час (хв.) гасіння:		
	бензин, гас	дизпаливо	мазут
Піна середньої кратності (ГПС-600, ГПС-2000)	50	30	25
Піна низької кратності (ПЛС, СПП)	60	50	35

В табл. 4.4 зазначено необхідну кількість ГПС-600 для поверхневого гасіння пожежі [59].

Таблиця 4.4

Необхідне число ГПС для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж					
	ГПС-200		ГПС-600		ГПС-2000	
	При подачі розчину, л/(м³·с)					
	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08
1	2	3	4	5	6	7
до 25	1	1	1	1	-	-
40	1	2	1	1	-	-
75	2	3	1	1	-	-
100	3	4	1	2	-	-
120	3	5	1	2	-	-
150	4	6	2	2	-	-
180	5	8	2	3	-	-
200	5	8	2	3	1	1
250	7	10	3	4	1	1
300	8	-	3	4	1	2
350	9	-	3	5	1	2
400	10	-	4	6	1	2
450	-	-	4	6	2	2
500	-	-	5	7	2	2
600	-	-	5	8	2	3
700	-	-	6	10	2	3
800	-	-	7	11	2	4
900	-	-	8	12	3	4
1000	-	-	9	14	3	4
1100	-	-	10	15	3	5
1200	-	-	10	16	3	5
1300	-	-	11	18	4	6
1400	-	-	12	19	4	6
1500	-	-	13	20	4	6
1600	-	-	14	-	4	7
1700	-	-	15	-	5	7
1800	-	-	15	-	5	8
1900	-	-	16	-	5	8
2000	-	-	17	-	5	8

Згідно з табл. 4.4 для гасіння пожежі площею 346 м² при інтенсивності подавання піни 0,08 л/м³·с необхідно забезпечити роботу 5 ГПС-600, що збігається з даними табл. 4.2.

В табл. 4.5 [59] зазначено необхідну кількість стволів типу СПП для гасіння за встановленою площею пожежі.

Таблиця 4.5

Необхідне число повітряно-пінних стволів для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж								
	СПП			СПП-4 (СППЄ - 4)			СПП-8 (СППЄ-8)		
	При подачі розчину, л/(м³·с)								
	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15
до 25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	2	1	1	1	1	1	1
60	1	2	2	1	1	2	1	1	1
80	2	2	2	1	2	2	1	1	1
90	2	2	3	2	2	2	1	1	1
100	2	2	3	2	2	2	1	1	1
120	2	3	3	2	2	3	1	1	2
160	3	4	4	2	3	3	1	2	2
180	3	4	4	3	3	4	2	2	2
200	4	4	5	3	4	4	2	2	2
220	4	5	6	3	4	5	2	2	2
240	4	5	6	3	4	5	2	2	3
260	5	6	7	4	4	5	2	2	3
280	5	6	7	4	5	6	2	3	3
300	5	6	8	4	5	6	2	3	3
320	6	7	8	4	5	6	2	3	3
350	6	7	9	5	6	7	3	3	4
400	7	8	10	5	7	8	3	3	4
450	8	9	12	6	7	9	3	4	5
500	9	10	13	7	8	10	4	4	5

Згідно табл. 4.5 необхідна кількість стволів типу СПП становить:

- СПП – 6 шт;
- СПП-4 – 5 шт;
- СПП-8 – 3 шт;

Також, згідно [59, 60] при розрахунку сил та засобів для гасіння пожеж необхідно враховувати запас вогнегасних засобів від розрахункової кількості вогнегасних речовинна гасіння. У табл. 4.6 зазначено запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі.

Таблиця 4.6

Запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі

Вид пожежі, вогнегасна речовина	Коефіцієнт запасу K_z від розрахункової кількості ВР на гасіння	Розрахунковий час запасу τ_z , год
Більність пожеж:		
вода на період гасіння	5	-
вода на період догашування (розбирання конструкцій, проливання місця горіння та ін.)	-	3
Пожежі для об'ємного гасіння яких застосовують:		
Діоксид вуглецю, інші газові вогнегасні речовини	1,3	-
Пожежі на судах (піноутворювач для гасіння в МКВ, трюмах і надбудовах)	3	-
Пожежі нафти і нафтопродуктів в резервуарах:		
піноутворювач	3	-
вода для гасіння піною	5	-
вода на охолодження наземних резервуарів:		
пересувними засобами	-	6
стаціонарними засобами	-	3
вода на охолодження підземних резервуарів	-	3
Пожежі на технологічних установках переробки нафти і нафтопродуктів (піноутворювач)	3	-
Пожежі в підвалах і інших заглиблених приміщеннях при об'ємному гасінні пінами середньої та високої кратності (піноутворювач)	2...3	-

Згідно даних із табл. 4.6 для гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарах необхідно забезпечити трикратний запас піноутворювача.

Загальну витрату по піноутворювачу вираховуємо за формулою:

$$W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}} = N_{\text{пр}}^{\Gamma} \times q_{\text{пр}} \times 60 \times \tau_{\text{р}} \times K_z, \quad (4.1)$$

де $W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}}$ – загальна витрата піноутворювача, л; $N_{\text{пр}}^{\Gamma}$ - необхідна кількість технічних приладів подавання вогнегасної речовини (СПП, ГПС); $q_{\text{пр}}$ – подавання (витрата) вогнегасної речовини, що визначається із технічного приладу подавання, л/с; $\tau_{\text{р}}$ -

розрахунковий час гасіння пожежі, хв; K_3 - коефіцієнт запасу вогнегасної речовини.

Відповідно до формули (4.1) та згідно даних з табл. 4.2, 4.3, 4.4 та 4.6 загальна витрата піноутворювача для ГПС-600 становить:

$$W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}} = 5 \times 0,36 \times 60 \times 50 \times 3 = 16200 \text{ л}$$

Загальні витрати піноутворювача для стволів СПП, СПП-4 та СПП-8 визначаємо за тією ж формулою. Дані по кількості необхідних СПП взято з табл. 4.5. Для СПП витрати ПУ становлять 15552 л; для СПП-4 – 25920 л; для СПП-8 – 31104 л.

Для підшарового гасіння за допомогою КП, при використанні піни К5 та К10 при тиску 4 МПа значення витрат піноутворювача взято з табл. 2.1. розділу 2. Для піни К10 витрата піноутворювача на гасіння становить 1389 кг, а для піни К5 4319 кг. З урахуванням трикратного запасу загальні витрати становлять 4167 кг та 12957 кг відповідно.

Згідно отриманих даних прораховано вартість гасіння пожежі в РВС-5000 при використанні різних технічних приладів подавання піни. Вартість ПУ «Барс S-2» становить 40 грн/кг (станом на 01 червня 2025 р).

Таблиця 4.7

Результати проведених розрахунків

Технічний прилад	ГПС-600	СПП	СПП-4	СПП-8	КП К10	КП К5
Витрата, л	16200	15552	25920	31104	4167	12957
Вартість, грн	648000	622080	1036800	1244160	166680	518280

Згідно отриманих даних можна зробити висновок, що гасіння пожежі в РВС-5000 за допомогою компресійної піни К10 із застосуванням підшарового способу обходиться майже в 4 рази дешевше ніж при застосуванні традиційних технічних засобів.

4.5. Висновки до розділу

1. Розроблено схеми подавання компресійної піни підшаровим способом для гасіння нафтопродуктів (бензину, дизельного пального) в резервуарах із застосуванням переносного і стаціонарного пінозмішувачів. Також можуть використовуватись пожежні автоцистерни, які оснащені системою CAFS.

2. Запропоновано рекомендації щодо застосування компресійної піни для ефективного гасіння пожеж ЛЗР у РВС. Для резервуарів об'ємом до 5000 м³ пропонується використовувати компресійну піну з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% для підшарового гасіння з інтенсивністю не нижче 0,08–0,09 л/с×м².

3. Представлено рекомендації щодо коригування нормативних документів та довідників: ВБН В.2.2-58.-94, ДСТУ 3789:2015 та Довідник КГП, а саме: доповнення положеннями про використання компресійної піни для підшарового гасіння пожеж ЛЗР у резервуарах; Включення визначень компресійної піни та систем CAFS до ДСТУ 3789:2015, а також способів випробування компресійної піни; доповнення ВБН В.2.2-58.-94 необхідністю оснащення резервуарів відповідною інфраструктурою для надійного подавання та розподілу компресійної піни, що є критичним для її ефективного використання.

4. На основі отриманих даних визначено, що гасіння пожежі в РВС-5000 з використанням компресійної піни К10 підшаровим способом є майже вчетверо економнішим порівняно з традиційними способами гасіння (166 680 грн проти 648 000 грн).

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу з розроблення технології підшарового пожежогасіння за допомогою компресійної піни в РВС для зберігання нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне), зокрема:

1. В результаті аналізу методів гасіння РВС встановлено, що в Україні підшаровому гасінню не приділяється достатньої уваги. Компресійна піна взагалі не використовується для підшарового гасіння і потребує ґрунтовних досліджень з наступним розробленням нормативних документів.

2. Удосконалена модель в SolidWorks Flow Simulations адекватно відтворює рух пінних струменів у резервуарі з рідким гарячим паливом. Недоліки моделі, зокрема неможливість врахування фазових перетворень піни та впливу суміші водяної пари і повітря на горіння бензину, не впливають на визначення параметрів руху затоплених пінних струменів, але знижують точність оцінки процесу підшарового гасіння загалом, що вимагає подальшого вдосконалення моделі та обґрунтовано необхідний резервний об'єм РВС-5000, який становить 13% у випадку тривалості вільного горіння 30 хв до початку подавання піни, тобто бензин витісняється із вщент заповненого резервуару. Для запобігання цього явища, в резервуарі необхідно мати певний резервний об'єм, який і заповниться розігрітим бензином.

3. Встановлено в результаті лабораторних досліджень, що компресійна піна при контакті з дизельним паливом залишалася стабільною на поверхні пального 14285 с при подаванні зверху та 2621 с при подаванні під шар. При контакті з бензином стійкість піни була значно нижчою: приблизно в 30 разів меншою при подаванні на поверхню та в 6 разів меншою при подаванні під шар порівняно з дизельним паливом. Компресійна піна, отримана з піноутворювача «Барс S-2» на лабораторній установці типу вогнегасника ВВ-12, має хороші показники кратності та стійкості. Середня кратність становила 13,7. Стійкість піни, оцінена через час стікання 25% (209 с) і 50% (377 с) розчину піноутворювача.

4. Розроблена експериментальна установка для генерування компресійної піни забезпечує стабільність подавання піни з можливістю регулювання тиску.

Дослідження підшарового гасіння бензину в макетному резервуарі (0,25 м³) показали, що компресійна піна з низькою кратністю гасить пожежу за 55 с при витраті 3 л розчину. Експерименти на макетному резервуарі підтвердили придатність компресійної піни для підшарового гасіння легкозаймистих рідин. Піна ефективно проникає на поверхню бензину, ізолює зону горіння, перешкоджає надходженню горючих парів до вогню та запобігає повторному спалаху.

За результатами математичного моделювання встановлено, що розбіжність між даними експерименту в полігонних умовах на макетному резервуарі та математичною моделлю становить приблизно 4%, що свідчить про адекватність отриманих результатів.

5. Розроблено схеми подавання компресійної піни підшаровим способом у резервуар з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) із застосуванням переносного і стаціонарного пінозмішувачів. Також передбачено використання пожежних автомобілів, оснащених системою CAFS.

6. Запропоновано рекомендації щодо використання компресійної піни для ефективного гасіння пожеж легкозаймистих рідин (ЛЗР) у вертикальних сталевих резервуарах. Для резервуарів об'ємом до 5000 м³ рекомендується застосовувати компресійну піну з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% для підшарового гасіння з інтенсивністю не менше 0,08-0,09 л/с×м².

Пропонуються зміни та доповнення до вітчизняних нормативних документів і довідників, зокрема ВБН В.2.2-58.-94, ДСТУ 3789:2015 та Довідника КГП. Рекомендується додати положення про використання компресійної піни для підшарового гасіння ЛЗР у резервуарах; включити до ДСТУ 3789:2015 визначення компресійної піни, систем CAFS та методи її випробувань; доповнити ВБН В.2.2-58.-94 вимогами щодо оснащення резервуарів інфраструктурою для надійного подавання та розподілу компресійної піни.

7. На основі отриманих даних встановлено, що гасіння пожежі в РВС-5000 із використанням компресійної піни К10 підшаровим способом є майже вчетверо економнішим порівняно з традиційним способом гасіння (166 680 грн проти 648 000 грн).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amuay tragedy (2012, 25 august). English Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Amuay_tragedy;
2. Внаслідок вибуху нафтопроводу в Мексиці загинули десятки людей. (2019, 19 січня). BBC News Україна. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-46933867>;
3. A huge fire at a Texas chemical plant is out, 4 days after it started. (2019, 17 July). CNN. URL: <https://edition.cnn.com/2019/03/20/us/deer-park-itc-plant-fire-Wednesday/index.html>;
4. Войтович Т.М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами : дис. ... д-ра філос. : 21.06.02. Львів, 2020. 216 с.;
5. Kodryk, A., Nikulin, O., Titienko, O., Kurtov, A., & Shakhov, S. (2019). ЗАЛЕЖНІСТЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ВІД РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГЕНЕРУВАННЯ ПІНИ. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(1(7)), 54–63. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.1.54-63>;
6. Fu X., Bao Z., Chen T., Xia J., Zhang X., Zhang J., and Hu Y. (2012). Application of Compressed Air Foam System in Extinguishing Oil Tank Fire and Middle Layer Effect // International Symposium on Safety Science and Technology. *Procedia Engineering*. Vol. 45, pp. 669-673;
7. Вілінський Р.В. Гаврилюк А.Ф. Аналіз використання компресійної піни. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. Львів, 2020. С.16-17;
8. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КРАТНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 43, 34-40. <https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>;
9. Ларін О.М., Баркалов В.Г., Виноградов С.А. та ін. Пожежні машини : навч. посіб. Харків, НУЦЗУ: МПБП «Гордон», 2016. 288 с;

10. Robert G. Taylor (1998) Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / Robert G. Taylor - Morristown Fire Bureau - Morristown, New Jersey – pp. 75-112;
11. Compressed Air Foam Systems [Електронний Ресурс] / Neal Brooks. –Режим доступу: <http://compressedairfoamsystem.com>;
12. Colletti, D. J. (1994). Compressed air foam mechanics. Fire Engineering, 147. March. pp. 61-65;
13. Li Huiqing. (2000). Experimental study of foam generated by compressed air foam system [D]. Beijing: Beijing Forestry University. pp. 105-111;
14. Виноградов С.А., Шахов С.М. Технологія та переваги використання компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2017. – 482 с.;
15. Ковалишин, В. В., Лозинський Р. Я., Войтович Т. М., Великий Н. Р. Розширення галузі застосування компресійної піни. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. наук. праць Всеукраїнської наук.-практ. конф. з міжнародною участю. Львів, 2022. С.372-374;
16. Tytarenko A. (2015). ГАЗОНАПОВНЕНА ПІНА – ЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ. *Науковий вісник НЛТУ України*, 25(9), 246-250;
17. Звіт про науково-дослідну роботу «Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («Піна-К»)). Укр. НДІЦЗ. 2018;
18. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Sorochych, M. (2021). ЗАСОБИ ОТРИМАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 39, 94-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.11>;
- 19., Patent U.S.A, US 6357532 B1. Compressed air foam systems. Michael A. Laskaris, Michael Sulmone. - Date of Patent: Mar. 19, 2002

20. Patent U.S.A, US 6276459 B1. Compressed air foam generator/ Bradford James Herrick, Mark D. Baxter. - Date of Patent: Aug. 21, 2001;
21. Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння : навч. посіб. Львів : СПОЛІОМ, 2007. 168 с.;
22. Nash P., Whittle J. (1978). Fighting fires in oil storags tanks. Using base injection of foam. Part 1 // Fire Tehnol. V. 14. №1. pp. 15–27;
23. Fittes D. W., Griffiths D. J., Nash P. (1988). The reason we use light Water AFFF/AIC is because we fight // Hazardous Cargo Bulletin, 1988. V. 4. pp. 67;
24. NFPA 11-1983. (1983). Stanard of medium an fires fighting expansion foam systems. USA. NFPA;
25. НАПБ А.01.001-2014. (2014). Правила пожежної безпеки в Україні. Міністерство внутрішніх справ України;
26. ВБН В.2.2-58.1-94* (1999). Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а). Державний комітет нафтової, газової та нафтопереробної промисловості України (Держнафтогазпром);
27. Voitovych, T., Kovalyshyn, V., & Chernetskyi, V. (2019). ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ «ПІДШАРОВОГО» ГАСІННЯ. *Пожежна безпека*, (34), 21-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.04>;
28. ДСТУ 3789-2015. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань (2015);
29. ДСТУ 4041-2001. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань (2001);
30. Інструкція про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння. Наказ МНС України № 851 від 24.11.2008 р.;
31. Ковалишин, В. В., Марич, В. М., Войтович, Т. М., Гусар, Б. М. (2018). Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин. Екологічна безпека як

основа сталого розвитку суспільства. *Європейський досвід і перспективи*: матеріали III Міжнародної наук.-практ. конфер. Львів, 2018. С. 42-43;

32. Боровиков В. «Вогнегасні речовини: минуле, сучасність, майбутнє. Частина I: Тіні забутих предків». URL: https://web.archive.org/web/20150217171437/http://www.security-info.com.ua/articles/?ELEMENT_ID=753;

33. Боровиков В. «Вогнегасні речовини: минуле, сучасність, майбутнє. Частина II: Плоди століття технологій». URL: https://web.archive.org/web/20150217165906/http://www.security-info.com.ua/articles/index.php?ELEMENT_ID=775&sphrase_id=1145;

34. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. В. Вогнегасні речовини : Навчальний посібник. Київ : Пожінформтехніка, 2004. 176 с.;

35. Піноутворювачі для гасіння пожеж. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%96%D0%BD%D0%BE%D1%83%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87%D1%96_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%B3%D0%B0%D1%81%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6;

36. Less F. Loss prevention in the process industries / Frank P. Less. – Elsevier. – 497 p.;

37. Casal J. Evaluation of the Effect and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants / Joaquim Casal. – Industrial Safety Series. V. 8. – Elsevier, 2008. – 117 p.;

38. Persson H. Tank fire review of fire incidents 1951-2003 / H. Persson A. Lonnermark // Brandforsk Project 513-021. – Borås: Swedish National Testing and Research Institute. – 2004.;

39. Бабенко Ю. В., Савельєв І. В., Боровиков В. О. та ін. (2002). Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. Київ : УкрНДІПБ. 142 с.;

40. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Коврегін В.В. та ін. (2010). Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Ч. II. НУЦЗУ. 314 с.;

41. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами : дис. ... канд. тех. Наук : 21.06.02. Львів, 2015. 121 с.;
42. Халченков О.В., Ковалець І.В. (2017). Використання моделі атмосферного переносу calpuff та моделі прогнозу погоди wrf для оперативного прогнозування наслідків довготривалого атмосферного викиду під час пожежі на нафтобазі під Васильковим у 2015 році. Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. С. 49–53.;
43. Brushlinsky N., Hall J., Sokolov S., Wagner P. (2006). Fire statistics. Int. association of fire and rescue services. CTIF. 72 p. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report11_world_fire_statistics_2006.pdf;
44. IMPEL. (2023). Lessons learnt from industrial accidents 2023 seminar - 15th edition (Report No. 2022(II)). European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law;
45. Mannan, M. S. (2009). A technical analysis of the Buncefield explosion and fire. In Hazards XXI: Symposium Series No. 155. Institution of Chemical Engineers (IChemE), pp. 662-673;
46. Abbasi, M. H., Benhelal, E., & Ahmad, A. (2014). Designing an Optimal Safe Layout for a Fuel Storage Tanks Farm: Case Study of Jaipur Oil Depot. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical and Molecular Engineering, 8(2), pp. 147-155;
47. Campbell, R. (2014). Fires at outside storage tanks. Quincy, MA: NFPA;
48. Persson, H., & Lzonnermark, A. (2004). Tank fires. SP Swedish National Testing and Research Institute;
49. Haynes, J. G., & Stein, G. P. (2018). Canadian fire department profile 2014-2016. Quincy, MA: NFPA;
50. Chang, J., & Lin, Ch.-Ch. (2006). A study of storage tank accidents. Journal of Loss Prevention In The Process Industries, 19(1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.05.015>;
51. Petroleum Association of Japan. (2004). List of oil spill accidents;

52. Нафтова промисловість України. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D1%84%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8;

53. Запорожець О. І., Протоєрейський О. С., Франчук Г. М., Боровик І. М. Основи охорони праці : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2009. 264 с.;

54. Овчаренко О. О. Пожежна безпека на об'єктах підвищеної небезпеки. Osvita.ua. 2010. URL: <https://osvita.ua/vnz/reports/bjd/23490/>;

55. Про затвердження Порядку гасіння пожеж підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту. Наказ МВС України № 141 від 27.02.2018 р.;

56. ДСТУ 3789:2015. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування. (2015);

57. ДСТУ 4041-2001. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. (2001);

58. Про затвердження Методики розрахунку сил і засобів, необхідних для гасіння пожеж у будівлях і на територіях різного призначення. Наказ МНС України № 1341 від 16.12.2011;

59. Довідник керівника гасіння пожеж / за загальною редакцією В.С. Кропивницького. Київ : ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.

60. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Наказ ДСНС України В-269 від 23.05.2022 р.;

61. ДОСЛІДЖЕННЯ ГАСІННЯ МОДЕЛЬНОГО ВОГНИЩА ПОЖЕЖІ КЛАСУ «В» СИПКИМИ МАТЕРІАЛАМИ (2023). В. С. Макаренко, О. О. Кіреєв, М. А. Чиркіна-Харламова, Н. В. Мінська, А. Я. Шаршанов. НУЦЗУ, *Проблеми надзвичайних ситуацій*, № 2(38);

62. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КРАТНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 43, 34-40;

63. Войтович, Т. М., Ковалишин, В. В., Новіцький, Я. М., Войтович, Д. П., Пастухов, П. В., Фірман, В. М. (2020). Вплив параметрів руху затоплених пінних струменів на «підшарове» гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 3, 10(105), 6-17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206032>;

64. Войтович, Т. М., Ковалишин, В. В., Чернецький, В. В. (2019). Особливості проектування і розрахунку системи «підшарового» гасіння. *Пожежна безпека*, 34, 21-27.;

65. Боровиков В. (2015). Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. *Пожежна та техногенна безпека*. 2015. – №11(26). – С. 28-29.;

66. Корольов Р.А., Ковалишин В.В., Штайн Б.В. (2017). АНАЛІЗ СПОСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ В РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ КОМБІНОВАНИМ СПОСОБОМ. *Scientific Journal «ScienceRise»*. №1 (35). <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.104613>;

67. Chen, Y., Chen, T., Hu, C., Fu, X. C., Bao, Z. M., Zhang, X. Z., & Xia, J. J. (2017). The research of press drop of compressed air foam flow through the bend. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 81, 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012118>;

68. Chen, Y., Chen, T., Fu, X. C., Bao, Z. M., & Hu, C. (2021). The research of compressibility of compressed air foam. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012021>;

69. Su, L., Wang, L., Wang, Z., Zhang, J., Tian, Y., & Yan, Y. (2012). Investigation on compressed air foams fire-extinguishing model for oil pan fire. *Procedia Engineering*, 45, 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.219>;

70. Rie, D.-H., Lee, J.-W., & Kim, S. (2016). Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*, 6(7), 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

71. Kurowski, P. (2016). Engineering analysis with SOLIDWORKS Simulation 2016. SDC Publications;

72. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В. Інженерна графіка в SolidWorks : навч. посіб. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.;

73. Плашихін, С. В. Параметричне моделювання технологічних процесів. Розділ 2. Моделювання фізичних процесів в CAD/CAE системі SolidWorks : навч. посіб. Електрон. мережне навч. вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 125 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/52105/1/Parametrychne_modeliuvannia_tekhnolohichnykh_protseviv_2.pdf;

74. П.П. Ключ, В.Г. Палюх, А.С. Пустовой, Ю.М. Сенчихін, В.В. Сировой. Пожежна тактика : підручник. Харків : Основа, 1998.;

75. Звіт про ДКР «Розроблення технічного засобу пожежогасіння компресійною піною та дослідження його характеристик («піна–засіб»)). URL: <https://dsns.gov.ua/upload/1/3/2/5/0/2021-7-9-pina-zasib-rozdil-6.pdf>;

76. ДСТУ EN 1568-3:2018. Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню (EN 1568-3:2018, IDT);

77. ДСТУ 7224:2011. (2011). Метрологія. Манометри, мановакуумметри, вакуумметри, напороміри, тягонапороміри, тягоміри з пневматичними вихідними сигналами. Методика повірки (калібрування). Київ: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України;

78. ДСТУ OIML R 133:2019. (2019). Термометри рідинні скляні (OIML R 133:2002, IDT). Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»);

79. ДСТУ ISO 1042:2005. (2005). Посуд лабораторний скляний. Колби мірні з однією позначкою (ISO 1042:1998, IDT). Київ: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики;

80. ДСТУ 7525:2014. (2014). Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Київ: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України;

81. ДСТУ EN 1568-4:2018. Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню (EN 1568-4:2018, IDT);

82. ДСТУ EN 16327:2018. Пожежогасіння. Напірні пінозмішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS) (EN 16327:2014, IDT);

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Фізико-механічні параметри компонентів текучого середовища моделі
SolidWorks Flow Simulations

1. Фізико-механічні властивості повітряно-механічної піни

Элементы	Свойства элемента	Таблицы и графики
Свойство	Значение	
Имя	Піна 5 газ	
Комментарии		
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	1.27	
Молекулярная масса	4.8 kg/mol	
Динамическая вязкость	0.0135 Pa*s	
Удельная теплоемкость (Cp)	1640 J/(kg*K)	
Коэффициент теплопроводности	0.026 W/(m*K)	

Рис. А1. Властивості піни кратністю 5

Элементы	Свойства элемента	Таблицы и графики
Свойство	Значение	
Имя	Піна 10 газ	
Комментарии		
Показатель адиабаты (Cp/Cv)	1.27	
Молекулярная масса	2.4 kg/mol	
Динамическая вязкость	0.0135 Pa*s	
Удельная теплоемкость (Cp)	1325 J/(kg*K)	
Коэффициент теплопроводности	0.026 W/(m*K)	

Рис. А2. Властивості піни кратністю 10

2. Фізико-механічні властивості авіаційного бензину Б70

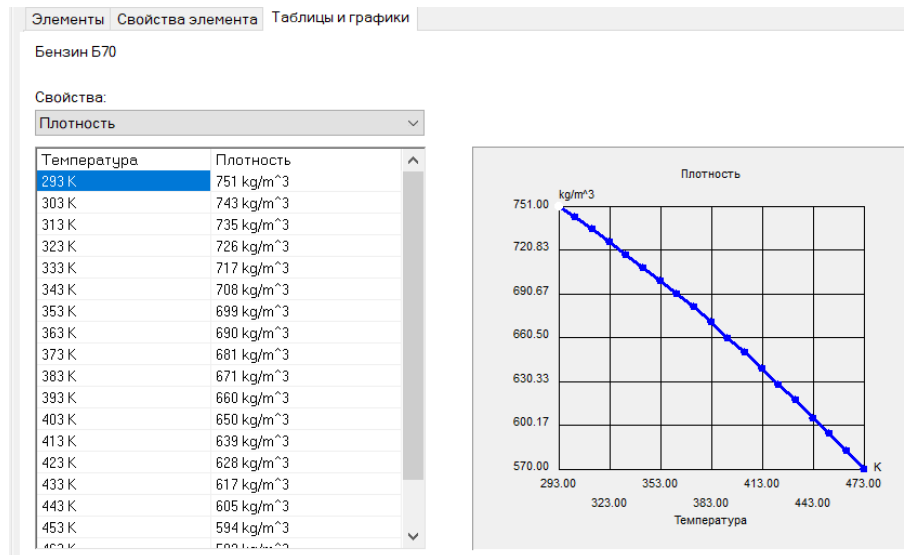


Рис. А.3. Залежність густини бензину від його температури

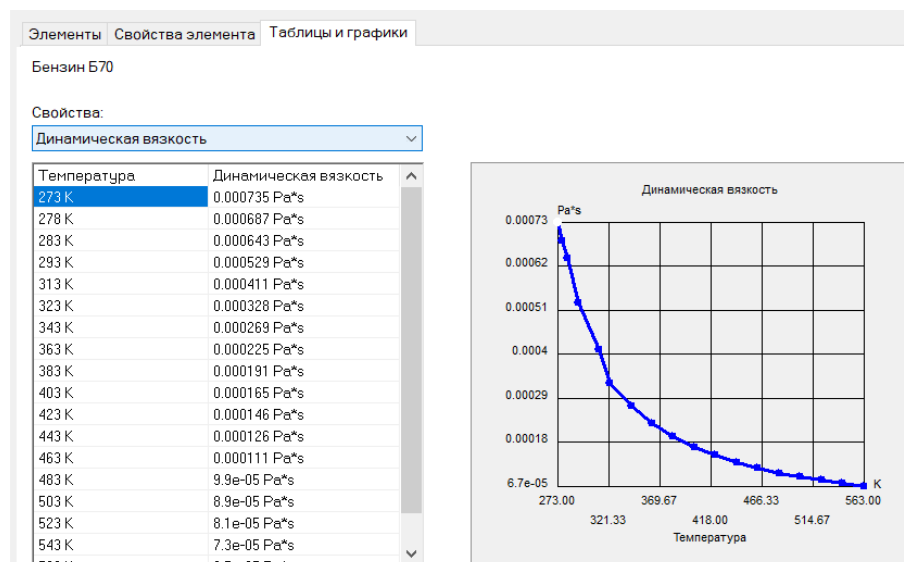


Рис. А.4. Залежність динамічної в'язкості бензину від його температури

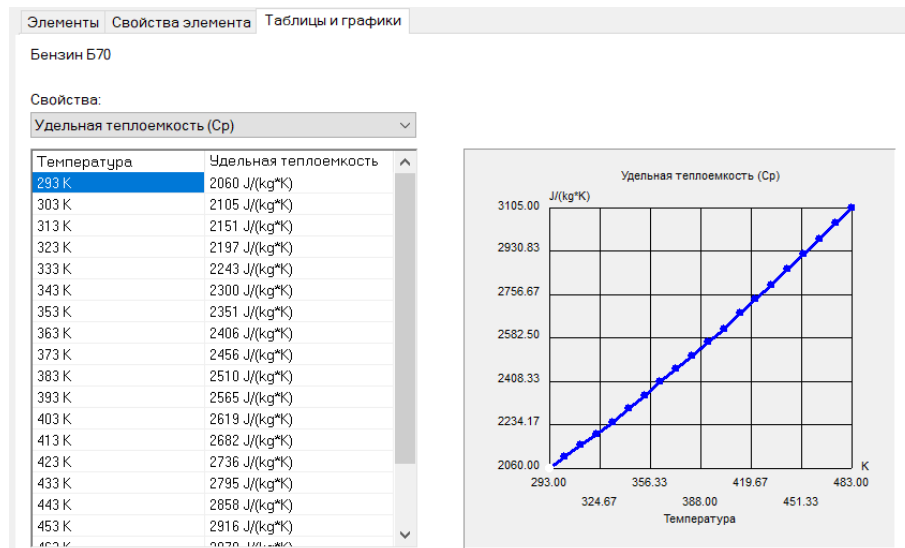


Рис. А.5. Залежність питомої теплоємкості бензину від його температури

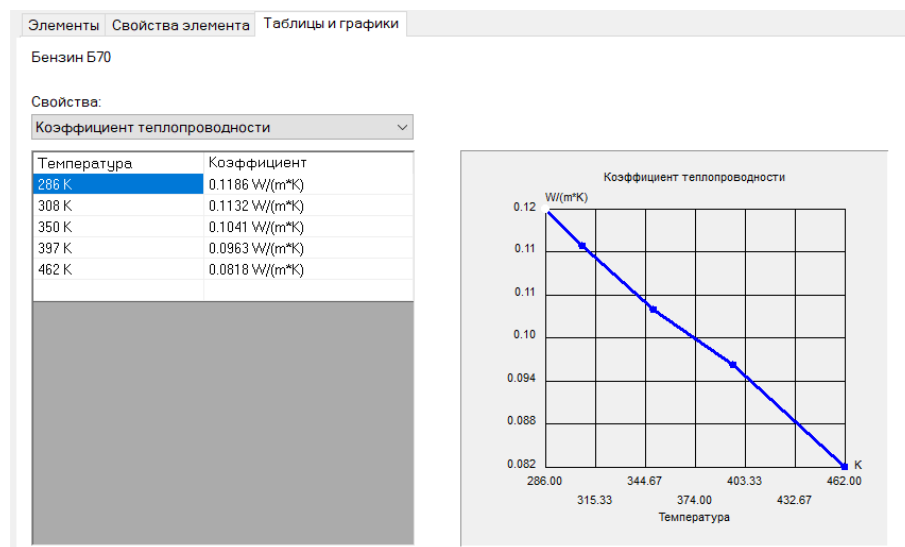


Рис. А.6. Залежність теплопровідності бензину від його температури

ДОДАТОК Б

1. Хромограми на площині перерізу резервуара масової концентрації пінних струменів, густини та температури прогрітого текучого середовища.

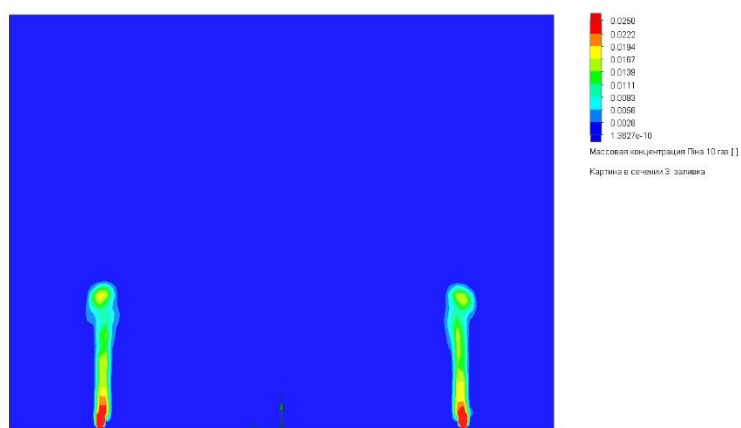


Рис. Б.1.1. Масова концентрація пінних струменів (фільтр >2.5%)

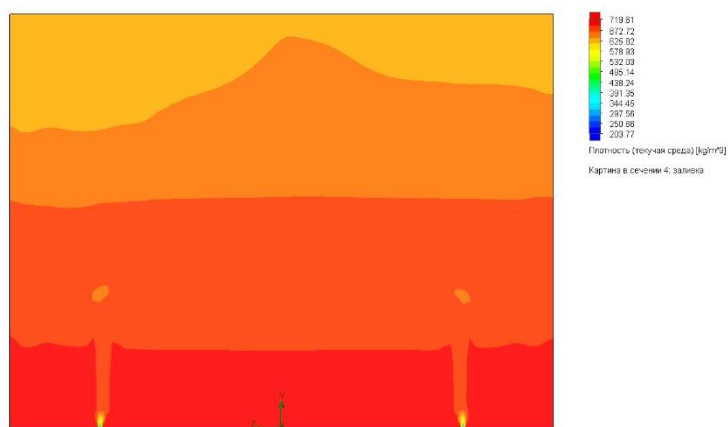


Рис. Б.1.2. Густина прогрітого текучого середовища

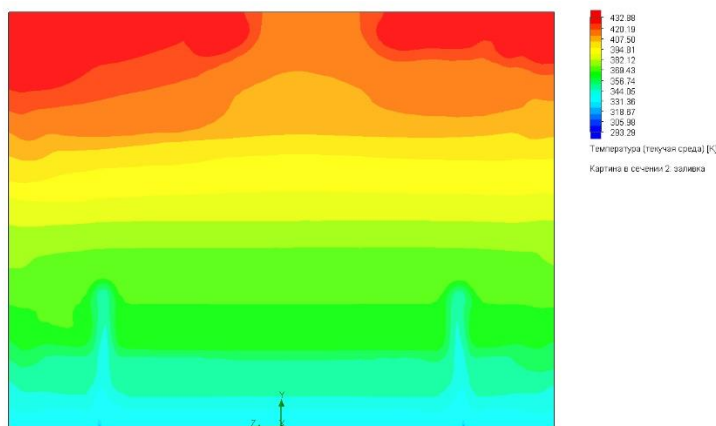


Рис. Б.1.3. Температура прогрітого текучого середовища

Як показує аналіз рисунків Б.1.1 – Б.1.3, в текучому середовищі резервуару, протягом перших 10-ти секунд, спостерігається яскраво виражена структурованість за масовою концентрацією, густиною та температурою.

2. Результати моделювання процесу подавання піни протягом 60 секунд подано в додатку Б.

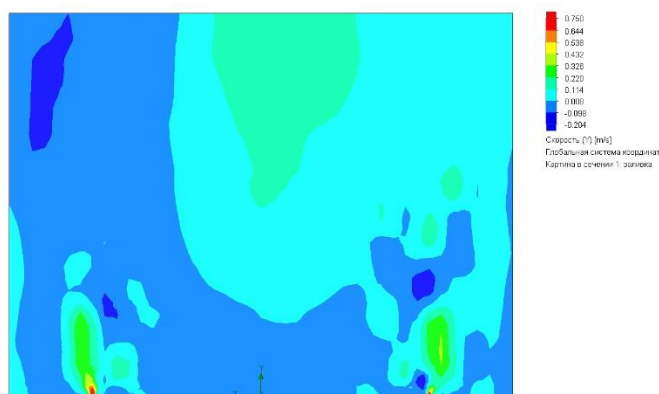


Рис. Б.2.1. Вертикальна швидкість середовища через 60с подачі піни

Як видно із рисунка, текуче середовище після 60 с подавання піни закамутилося, тобто встановлюються процеси глобального перетікання рідини, як наслідок тривалого впливу кінетичної енергії струменів та в'язкості рідини.

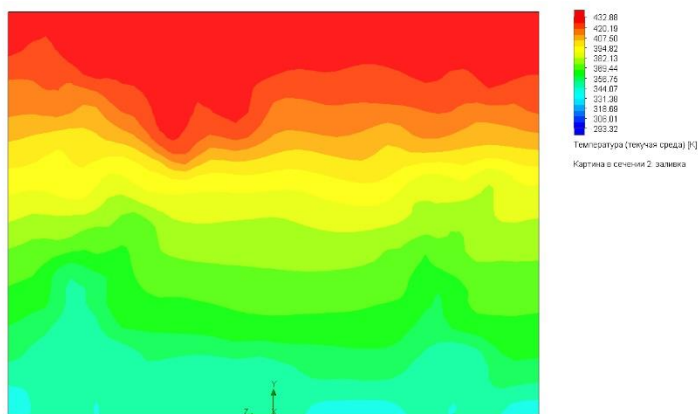


Рис. Б.2.2. Хромограма температури текучого середовища

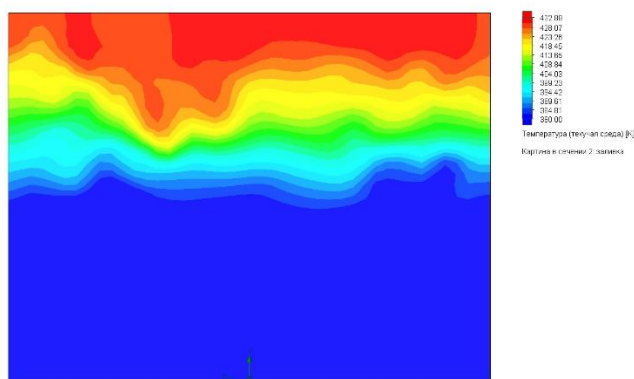


Рис. Б.2.3. Температура середовища через 60 с після подачі палива. Відфільтровано значення нижче 380 °K

Як видно з рис. Б.2.3 температура вище синього кольору (380 K) це зона кипіння палива під тиском верхніх шарів палива. В цій зоні вода палива перетворюється в пару. Пара піднімається швидше від палива, але охолодження бензину буде відбуватися вдвічі повільніше (теплоємність пари вдвічі менша за теплоємність води). На жаль фазові перетворення води в цій моделі не враховуються, тому рух пари і охолодження паром врахувати неможливо. Єдине, що можливо, це відслідкувати вихід палива або пари на поверхню дзеркала горіння в залежності від мінімального значення температури поверхні дзеркала в даному місці.

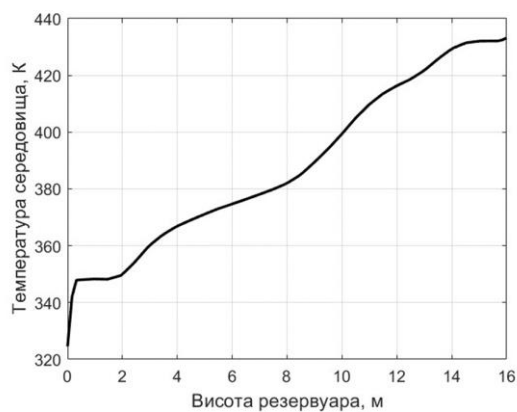


Рис. Б.2.4. Розподілу температури текучого середовища за висотою резервуара

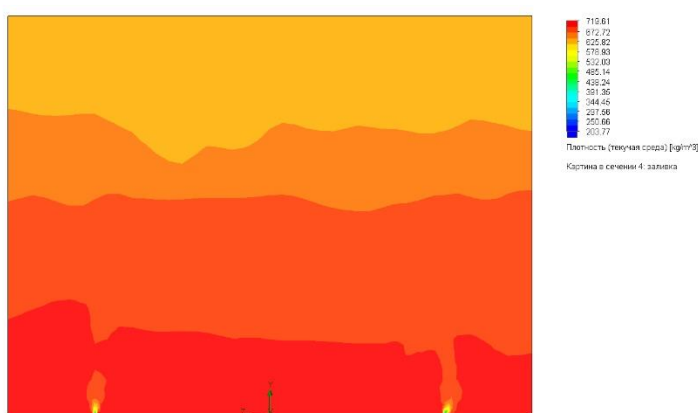


Рис. Б.2.5. Густина середовища через 60 с після подачі піни

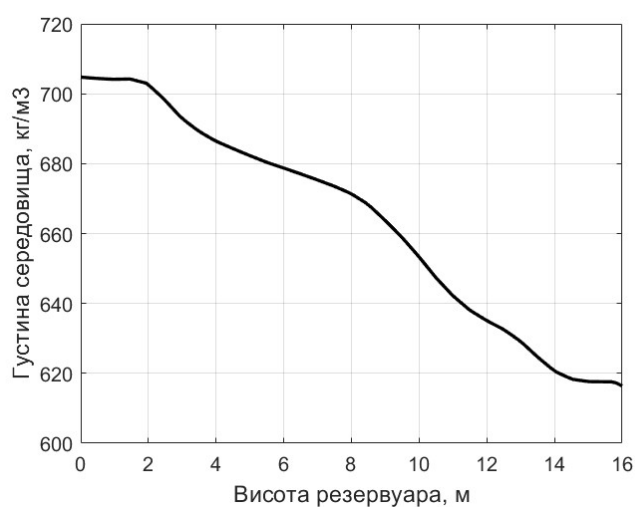


Рис. Б.2.6. Графічна залежність густини середовища від висоти резервуара.

Як видно із порівняння графіків густини після прогріву (рис. 2.5; рис. 2. 10) і рис. Б.2.6, температура середовища продовжує підніматися. Густина верхніх шарів зменшилася ще на 20 кг/м^3 .

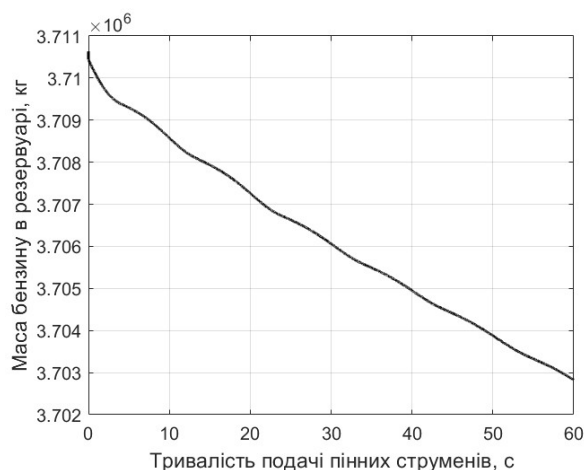


Рис. Б.2.7. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від часу подавання піни

Як показує аналіз рисунка, протягом 1 хв подавання піни витіснилось із резервуара 8 тон бензину, а протягом такого ж часу прогріву резервуара без подавання піни (рис. 2.11) витіснилося 15 тон бензину. Отже, витіснення бензину в часі носить нелінійний характер. Можливо це вплив охолодження середовища на його густину.

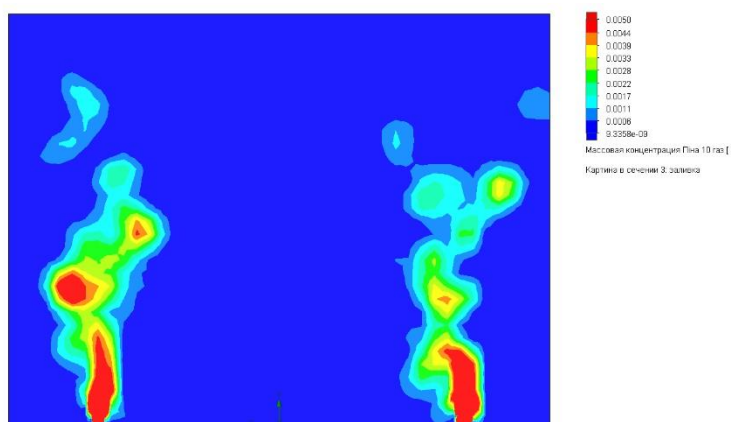


Рис. Б.2.8. Масова концентрація піни через 60 с після її подачі. Відфільтровано нижче 0,005 (0,5 %)

Як бачимо із рисунка, рух піни сповільнюється внаслідок її пригнічування низькою густиною і, як наслідок, поганою підйомною силою, від хмароподібного масиву піни відриваються окремі частини. Тобто суцільного потоку піни через 60 с вже не спостерігається.

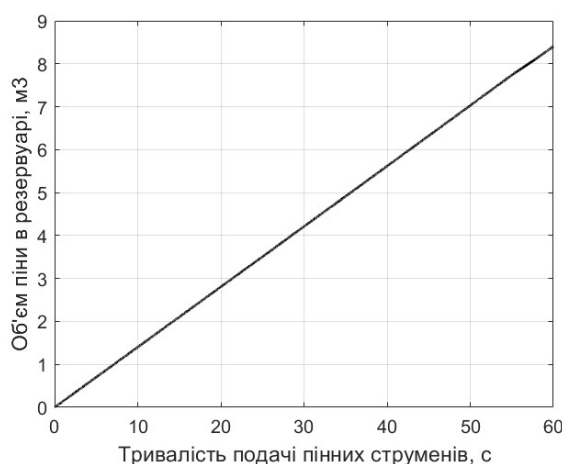


Рис. Б.2.9. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу її подачі.

Як видно із рисунка, піна прибуває рівномірно. При подаванні піни продуктивністю $0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ протягом 60 с, об'єм піни визначиться як добуток $0,14 \times 60 = 8,4 \text{ м}^3$, що і зображено на графіку. Тобто вся піна, яка подається в резервуар протягом 60 с в ньому і залишається.

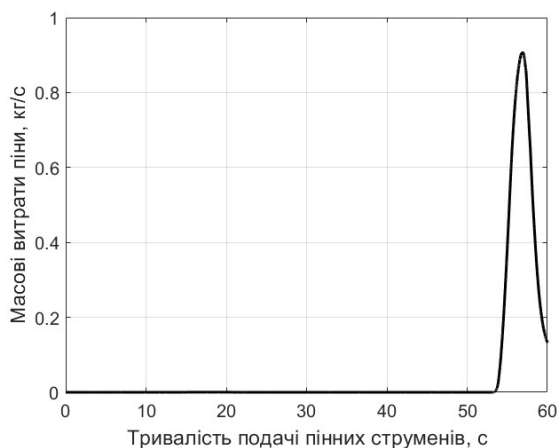


Рис. Б.2.10. Графічна залежність масових витрат піни на виході резервуара від часу її подачі.

Як видно із рисунка, на 54-тій секунді спостерігається вихід піни на дзеркало горіння. Власне, перший проміжок часу протягом якого виконується детальний аналіз і був пов'язаний з тривалістю подавання піни в резервуар до її виходу на дзеркало горіння. Витрати піни на виході резервуара становлять $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ і тривають лише 5 с. Тобто це вихід окремого куска піни, що і зображено на рис. Б.2.8.

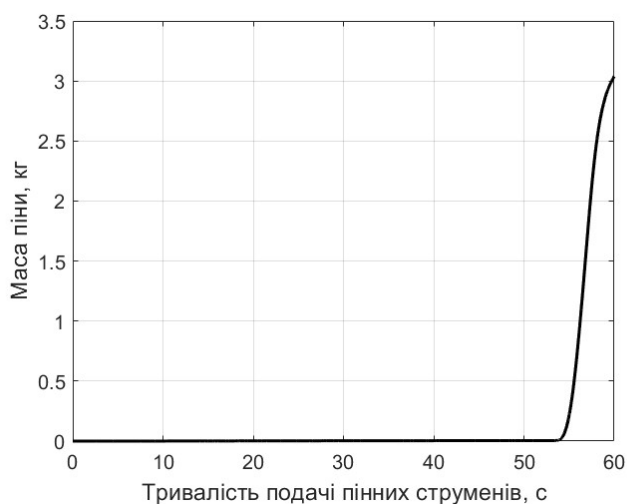


Рис. Б.2.11. Графічна залежність маси піни на виході від часу її подавання.

Рис. Б.2.11. це проінтегрована попередня графічна залежність (рис. Б.2.10). Як видно із графіка, протягом 60-ти секунд подавання піни на поверхню вийшло 3 кг.

На рис. Б.2.12 зображено залежність мінімального значення температури дзеркала горіння від часу подавання піни. Температура на дзеркалі горіння у нас стабільна 433 К. (вона задана в початкових умовах). Для можливості аналізу температури конвективного потоку, який виходить на поверхню дзеркала горіння розміщено додаткову площину під дзеркало горіння на відстані 5 см і температуру дзеркала горіння виміряно на цій площині. Тобто під самим дзеркалом.

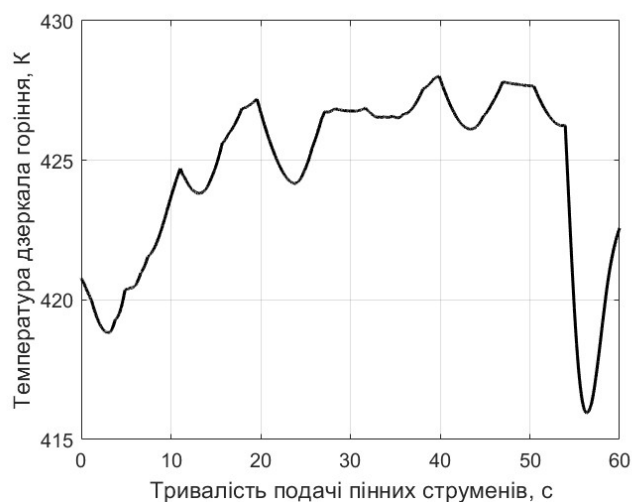


Рис. Б.2.12. Графічна залежність мінімального значення температури на дзеркалі горіння від часу подачі піни.

Як видно із графіка, протягом 54 с мінімальні значення температури на дзеркалі горіння коливалися в міру піднімання струменями холоднішого бензину і піднімалися вгору у зв'язку із дією тепла від дзеркала горіння. На 55-ій секунді температура на дзеркалі короткочасно опустилася на 10 градусів. Тобто відбулося охолодження верхніх шарів середовища у місці виходу піни. Детальніший аналіз температури та тиску вказує на те, що на поверхню дзеркала вийшла пара, а не піна.

Отже, як показали проведені теоретичні дослідження процесу подавання пінних струменів в середовище прогрітого бензину, ламінарний рух струменів в середовищі триває лише протягом незначного проміжку часу і переходить в турбулентний.

Піна акумулюється в середовищі бензину в середній частині резервуара і лише через певний проміжок часу (55 с) виходить на поверхню у вигляді окремих частин.

Піна перед виходом на поверхню перегрівається, руйнується (закипає) і виходить на поверхню горіння у вигляді водяної пари та повітря.

При цьому спостерігається локальне охолодження ділянок дзеркала горіння у зоні виходу пари.

ДОДАТОК В

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора філософії зі спеціальності 261 «Пожежна безпека»
ВЕЛИКОГО Назарія Романовича

Комісія у складі: заступник начальника загону з організації реагування на НС 3 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Львівській області Остап СЕМБАЙ та начальник 29 ДПРЧ 3 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Львівській області Назарій ДОВГАНІК з однієї сторони, а також науковий керівник, професор кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, д.т.н., професор Василь КОВАЛИШИН та виконавець, ад'юнкт денної форми здобуття освіти Назарій ВЕЛИКИЙ з другої сторони, склали цей акт про впровадження результатів завершеної дисертаційної роботи «Розроблення системи підшарового пожежогасіння компресійною піною».

У практику 29 ДПРЧ 3 ДПРЗ ГУ ДСНС України у Львівській області впроваджено навчальні матеріали (лекція, презентація, фото та відео) для проведення занять з особовим складом чергових караулів, в яких описано результати проведених досліджень щодо покращення ефективності гасіння пожеж у вертикальних сталевих резервуарах призначених для зберігання нафтопродуктів шляхом подавання компресійної піни «підшаровим» способом.

Заступник начальника загону з організації
реагування на НС 3 ДПРЗ ГУ ДСНС
України у Львівській області



Остап СЕМБАЙ

Начальник 29 ДПРЧ 3 ДПРЗ
ГУ ДСНС України у Львівській області



Назарій ДОВГАНІК

Професор кафедри цивільного захисту
доктор технічних наук, професор



Василь КОВАЛИШИН

Ад'юнкт денної форми здобуття освіти
докторантури-ад'юнктури ЛДУБЖД



Назарій ВЕЛИКИЙ

ДОДАТОК Г

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор університету із
навчально-методичної роботи
полковник служби цивільного захисту

Олександр ПРИДАТКО

2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня
доктора філософії зі спеціальності 261 «Пожежна безпека»
(освітньо-наукова програма «Пожежна безпека»)

ВЕЛИКОГО Назарія Романовича

Цим актом підтверджується, що впроваджені у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності результати дисертаційних досліджень ВЕЛИКОГО Назарія Романовича на тему: «Розроблення системи підшарового пожежогасіння компресійною піною», використані у освітньому процесі при проведенні лекційних занять за темами: «Особливості організації гасіння пожеж на об'єктах критичної інфраструктури», «Розбір пожеж» та «Сучасні методи та підходи організації гасіння пожеж та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій» зі слухачами інституту післядипломної освіти, які проходять підвищення кваліфікації за освітніми програмами «Основи організації ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій», «Управління силами і засобами під час реагування на надзвичайні ситуації» та «Організація взаємодії підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та інформаційне забезпечення»,

Члени комісії:

Начальник інституту
післядипломної освіти
к.психол.н.

Володимир СЛОБОДЯНИК

Заступник начальника інституту
післядипломної освіти
к.т.н.

Михайло КЛИМ'ЮК

Старший викладач кафедри
ліквідації наслідків
надзвичайних ситуацій

Ігор КОЗИРА



ДСНС України
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ
 (ЛДУ БЖД)

вул. Клепарівська, 35, м. Львів, 79007, тел. (032) 233-32-40, факс (032) 233-00-88
<https://ldubzh.edu.ua> Код ЄДРПОУ 08571340 E-mail: ldubzh.lviv@dsns.gov.ua

№ _____ На № _____ від _____

Директору нафтобазового господарства
 АТ «Концерн Галнафтогаз»
 Василю КІНДІЮ

Про сприяння впровадження
 системи підшарового гасіння

Шановний пане директоре!

Просимо посприяти у впровадженні системи підшарового гасіння в резервуарному парку АТ «Концерн Галнафтогаз».

У Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності розроблена Спосіб гасіння пожеж нафтопродуктів в резервуарах компресійною піною підшаровим способом та випробувано його на пожежах малого масштабу. Переваги способу гасіння резервуарів компресійною піною над повітряно-механічною: можливість подавання на великі відстані; вища стійкість піни; дає змогу ліквідувати пожежу незважаючи на руйнування верхнього поясу; уся піна потрапляє в резервуар, що дає змогу зменшити витрати вогнегасних речовин; практично виключається пошкодження системи підшарового гасіння від вибухів і теплових потоків; не залежить від атмосферних явищ (вітру, опадів); розташування техніки і людей на безпечній відстані.

Для встановлення системи потрібно: генератор піни, який ми розробили; з'єднувальні головки D=77 мм для підключення до насоса, який подає розчин піноутворювача; балони з газом (CO₂, N₂) 40-80 л, у кількості не менше 2-8 шт.,



СЕД АСКОД ЛДУ БЖД
 № 90 01-2462/90 19 від 04.06.2025
 Підписувач Бондар Дмитро Володимирович
 Сертифікат 368DC35ECECB2DC10400000036B40100E1C10500
 Дійсний з 09.04.2025 0:00:00 по 08.04.2027 23:59:59

2

залежно від ємкості резервуара або компресор повітряний, потужністю 3,60 м³/хв чи з розрахунку залежно від об'єму резервуару. Схема підключення додається.

Очікуваний результат: інноваційна та ефективна система пожежогасіння резервуарів з паливом.

Разом до перемоги! Слава Україні!

Додаток: на 1 арк. в 1 прим.

З повагою
ректор
генерал-майор служби цивільного захисту

Дмитро БОНДАР

Ярослав ІЛЬЧИШИН, 097-649-63-21

Національний орган
інтелектуальної власності
Державна організація
«Український національний
офіс інтелектуальної
власності та інновацій»
вул. Дмитра Годзенка, 1,
м. Київ-42, 01601

**Заявка
на державну реєстрацію винаходу (корисної моделі)**

(Під час заповнення відповідна клітинка "□" відмічається позначкою "×")

1. Вхідні реквізити заявки

Номер заявки, визначений заявником: 06/2025

(86) ☐ Номер та дата подання міжнародної заявки: _____

(62) ☐ Ця заявка є виділеною з попередньої заявки: _____

☐ Ця заявка подається на основі додаткових матеріалів, поданих _____,
(дата)
щодо заявки: _____

2. Заява про державну реєстрацію винаходу (корисної моделі)

Прошу (просимо) здійснити державну реєстрацію

☒ винаходу

☐ корисної моделі

☐ секретного винаходу

☐ секретної корисної моделі,

зазначеного (зазначеної) в цій заявці.

3. (71) Відомості про заявника/заявників

☐ 3.1. Для фізичної особи

Прізвище _____

Ім'я _____

По батькові* _____

Число, місяць, рік народження _____

Реквізити документа, що посвідчує особу _____ № _____,
серія*

найменування органу, що видав, _____,
дата видачі _____

Реєстраційний номер облікової картки платника податків* _____

Унікальний номер запису в Єдиному державному демографічному реєстрі* _____

Задеклароване/zareєстроване місце проживання (перебування) _____

Адреса для листування _____

Номер телефону _____

Адреса електронної пошти _____

Код держави _____

X 3.2. Для юридичної особи

Повне найменування

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

Код згідно з ЄДРПОУ **08571340**

Реєстраційний номер в іноземній державі (для нерезидентів)* _____

Місцезнаходження **вул. Клепарівська 35, м. Львів, 79007, Україна (UA)**

Адреса для листування **вул. Клепарівська 35, м. Львів, 79007, Україна (UA)**

Номер телефону **(032) 233-24-79**

Адреса електронної пошти **vnrd@ldubgd.edu.ua**

Код держави **UA**

☐ У зв'язку з відсутністю вільного місця відомості цього розділу додаються до заявки, про що зроблено відмітку в пункті 10.8 розділу 10.

4. (72) Відомості про винахідника/винахідників

☐ Заявник/усі заявники, зазначений/зазначені в пункті 3.1 розділу 3, є винахідником/винахідниками**

Прізвище **Ковалишин**

Ім'я **Василь**

По батькові **Васильович**

Число, місяць, рік народження

Реквізити документа, що посвідчує особу
найменування органу, що видав,
дата видачі

Реєстраційний номер облікової картки платника податків

Унікальний номер запису в Єдиному державному демографічному реєстрі

Задеклароване/zareєстроване місце проживання (перебування)

Адреса для листування

Номер телефону

Адреса електронної пошти

Х У зв'язку з відсутністю вільного місця відомості цього розділу додаються до заявки, про що зроблено відмітку в пункті 10.8 розділу 10.

5. (54) Назва винаходу (корисної моделі):

Спосіб підшарового гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами компресійною піною

6. (74) Відомості про представника

Прізвище, ім'я, по батькові (за наявності)/повне найменування представника:

Реєстраційний номер свідоцтва представника у справах інтелектуальної власності (патентного повіреного)* _____

Адреса для листування _____

Номер телефону _____

Адреса електронної пошти _____

7. (98) Адреса для листування***

Прізвище, ім'я, по батькові (за наявності)/повне найменування адресата

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

☐ Поштова адреса **вул. Клепарівська 35, м. Львів, 79007, Україна (UA)**

☐ Адреса електронної пошти **vnrd@ldubgd.edu.ua**

8. Заява про пріоритет

8.1. Прошу (просимо) встановити пріоритет за датою:

☐ (30) подання заявки в державі – учасниці Паризької конвенції про охорону промислової власності від 20 березня 1883 року або в державі – члені Світової організації торгівлі:

(31) номер заявки _____

(32) дата подання _____

(33) код держави _____

☐ (62) подання або пріоритету попередньої заявки, з якої виділено цю заявку:
номер заявки _____ дата подання _____ дата пріоритету _____

☐ подання попередньої заявки до УКРНОІВІ:
номер заявки _____ дата подання _____

☐ (62) подання додаткових матеріалів до заявки, поданої до УКРНОІВІ:
номер заявки _____ дата подання заявки _____
дата подання додаткових матеріалів до заявки _____

☐ 8.2. Інші відомості заяви про пріоритет додаються до заявки, про що зроблено відмітку в пункті 10.8 розділу 10.

☐ 8.3. Заява про пріоритет щодо окремого (окремих) пункту (пунктів) формули винаходу додається до заявки, про що зроблено відмітку в пункті 10.8 розділу 10.

9. Заяви/Декларації

☐ У заявці:

☐ опис

☐ креслення

заміняється посиланням на раніше подану заявку (заявки), зазначену (зазначені) у розділі 8 _____

☐ Прошу (просимо) прискорити публікацію заявки

☐ Прохання не згадувати винахідника/винахідників у будь-якій публікації

☐ Підстави для виникнення права на подання заявки та реєстрацію, якщо заявником не є винахідник:

☐ є документ про передачу прав винахідником або роботодавцем правонаступнику

☐ є документ про право спадкування

10. Перелік документів, що додаються до заявки

10.1. Опис винаходу (корисної моделі) (без переліку послідовностей) на **3** арк.

10.2. Формула винаходу (корисної моделі) на **1** арк.

10.3. Реферат на **1** арк.

10.4. Креслення на **1** арк.

10.5. Перелік послідовностей нуклеотидів та амінокислот*

10.6. Фігура креслень, запропонована для публікації з рефератом _____

10.7. Документ, що підтверджує повноваження представника (якщо заявка подається за участю представника заявника)

☐ довіреність на арк.

☐ інший документ, що підтверджує повноваження представника, на арк.

☐ копія довіреності на арк.****

10.8. Відомості розділу (розділів) ☐ 3, ☒ 4, ☐ 8 на 2 арк.

10.9. Засвідчена копія попередньої заявки на арк.

10.10. Довідка про дату подання попередньої заявки на арк.

10.11. Відомості щодо депонування мікроорганізму або іншого біологічного матеріалу _____

10.12. Інше:

- документ про сплату збору за подання заявки на 1 арк.

- документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору на 1 арк.

11. Я, який нижче підписався, підтверджую достатність і достовірність відомостей, зазначених у матеріалах заявки.

Проректор з наукової роботи

Василь ПОПОВИЧ

Дата підпису

31.01.2025

М.П.



СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Kovalyshyn, V., Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Sorochych, M. (2021). ЗАСОБИ ОТРИМАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 39, 94-104. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.11;>

2. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КРАТНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05;>

3. Kovalyshyn, V. V., Velykyi, N. R., Kovalyshyn, V. V., Lyn, A. S., Pastukhov, P. V., & Velykyi, A. Y. (2024). ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ПОДАВАННІ «ПІДШАРОВИМ» СПОСОБОМ. *Пожежна безпека*, 45, 10-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.45.2024.02;>

4. Ковалишин, В. В., & Великий, Н. Р. (2025). ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШАРОВОГО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ В РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ. *Комунальне господарство міст*, 1(189), 390–397. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-390-397;>

Статті у наукових журналах, що входять до бази даних Scopus:

5. Ковалишин, В. В., Великий, Н. Р., Ковалишин, В. В., Войтович, Т. М., Бунь, Р. А., Новіцький, Я. М., & Фірман, В. М. (2024). Розроблення технології гасіння компресійною піною підшаровим способом резервуарів з нафтопродуктами. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (129), 6–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.305684;>

Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Ковалишин В.В., Лозинський Р.Я., Войтович Т.М., Ковалишин Вол.В., Великий Н.Р. Розширення галузі застосування компресійної піни. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. наук. праць Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 372-374;

7. Великий Н.Р., Ковалишин Вол.В., Войтович Т.М., Ковалишин В.В. Розроблення безпечних методів гасіння резервуарів з використанням компресійної піни. *Охорона праці : освіта і практика. Проблеми та перспективи розвитку охорони праці*: зб. наук. праць III Всеукраїнської науково-практичної конференції викладачів та фахівців-практиків та XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів. Львів : ЛДУ БЖД, 2023. С. 159-161;

8. Великий Н.Р., Лозинський Р.Я., Ковалишин В.В. Дослідження витрат розчину піноутворювача при подаванні компресійної піни «підшаровим» способом. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 158-160;

9. Великий Н.Р., Ковалишин В.В., Лозинський Р.Я., Ковалишин Вол.В. Вплив насадки «заспокоювача» на подачу компресійної піни. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 13 грудня 2024 р. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 161-163;

10. Великий Н.Р., Ковалишин В.В., Лин А.С., Пастухов П.В. Моделювання процесу подавання пінних струменів «підшаровим» способом в середовище прогрітого бензину. *Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. 13 грудня 2024 р. Львів : ЛДУ БЖД, 2024. С. 17-19;

11. Великий Н.Р., Лозинський Р.Я., Лин А.С., Ковалишин В.В.. Дослідження ефективності підшарового гасіння резервуарів із нафтопродуктами за допомогою компресійної піни в лабораторних умовах. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XX Міжнародної науково-

практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С. 209-212;

12. Войтович Т.М., Великий Н.Р., Ковалишин В.В. Дослідження впливу інтенсивності та кратності компресійної піни на ефективність гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів : ЛДУ БЖД, 2025. С.257-259.