Національний університет цивільного захисту України
Державна служба України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шахов Станіслав Михайлович

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А

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.

_____С. М. Шахов

Науковий керівник Виноградов С. А., кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Шахов С.М. Підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – пожежна безпека. Національний університет цивільного захисту України, Харків, 2021 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуально науково-практичну задачу у галузі пожежної безпеки – підвищено ефективність використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А за рахунок варіювання її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача.

На сьогодні тверді речовини і матеріали є найбільш поширеними у виробництві, народному господарстві та побуті. Відомо, що від загальної кількості пожеж, які виникають на території держави, близько 80 % відбувається у спорудах житлового сектору. В умовах гасіння пожеж, пов'язаних з горінням твердих горючих речовин, основним вогнегасним засобом є вода. Але, незважаючи на її переваги, широке поширення, зручність використання та економічну доцільність, значна її частина не потрапляє до зони горіння. На гасіння пожежі використовується лише 5–10 % води; фактично 90–95 % води залишається надмірно пролитою, що призводить до значних матеріальних збитків. Одним з напрямів підвищення ефективності гасіння пожеж класу А є застосування компресійної піни.

Компресійна піна має низку перваг над іншими вогнегасними речовинами: за рахунок технології перемішування утворюється піна, яка є високодисперсною й однорідною, що робить її більш стійкою у порівнянні з повітряно-механічною піною, за допомогою пристрою дозування можна регулювати відношення компонентів піни, що надає можливість утворювати піну необхідної кратності, як суху, так і мокру.

Проведений аналіз дозволив встановити, що закордонні виробники пропонують використання компресійної піни з різною кратністю та концентрацією водного розчину піноутворювача. На підставі проведеного аналізу виявлено, що в Україні не ведуться роботи щодо розробки систем генерування та подавання компресійної піни для підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту. Проведено огляд теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з вивченням властивостей та вогнегасної ефективності компресійної піни. Аналіз теоретичної бази та отриманих практичних результатів дозволив встановити, що більша кількість досліджень присвячена застосуванню компресійної піни для гасіння пожеж класу Б. Відсутнє наукове обґрунтування, або рекомендації, яка кратність та концентрація водного розчину піноутворювача у компресійній піні володіють найбільшою вогнегасною ефективністю для гасіння твердих горючих речовин.

На основі вищевикладеного розроблено та запропоновано математичну модель процесу генерування компресійної піни, яке дозволяє надалі виконувати проектування експериментального зразка системи для генерування та подавання компресійної піни. Розроблена математична модель дозволяє проводити технічний розрахунок параметрів системи з урахуванням її вимог, виконувати розрахунки параметрів системи в залежності від кратності піни, яку необхідно отримати, досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни. Створена на основі математичної моделі прикладна програма дозволяє вибрати необхідні характеристики системи для подачі компресійної піни, такі як робочий тиск, діаметри отвору подачі повітря та рідинної суміші, діаметр і довжину піногенеруючої вставки, діаметр вихідного отвору ствола.

Проведено аналіз існуючих способів змішування повітря та розчину піноутворювача у системах для подачі компресійної піни. Встановлено ряд переваг коаксіального способу змішування над іншими існуючими технологіями. Розроблений оригінальний пінозмішувач коаксіального типу

перемішування з реактором, в якому передбачені сопла Лаваля для інтенсифікації процесу піноутворення (отримано патент на пінозмішувач для компресійної піни). Розглянуто статичні змішувачі з різними конструктивними особливостями, які можуть бути використані для генерування компресійної піни. Ураховуючи вищевикладене, спроектовано та розроблено експериментальний зразок системи генерування та подавання компресійної піни на основі розрахункових даних, отриманих за допомогою математичної моделі й аналізу існуючих систем для подачі компресійної піни, який дозволяє отримувати піну з робочим діапазоном кратності від 5 до 25.

За допомогою розробленого зразка системи генерування та подавання компресійної піни проведено експериментальні дослідження впливу кратності та концентрації водного розчину піноутворювача «БАРС-S» у компресійній піні на її властивості та встановлено, що, на відміну від повітряно-механічної піни, компресійна піна більшої кратності має більшу стійкість. Зокрема, зі збільшенням кратності піни від 5 до 20 її стійкість підвищується з 4,5 хв до 21,8 хв, тобто майже уп'ятеро. Збільшення концентрації водного розчину піноутворювача "БАРС-S" від 4 % до 6 % супроводжується збільшенням стійкості компресійної піни, генерованої з нього, на 22 %, а зі змінюванням кратності піни в тих самих межах відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 14 %, що зумовлює збільшення тривалості її існування. Також виявлено (на прикладі піноутворювача "БАРС-S"), що у разі збільшення концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 % (концентрації, рекомендованої його виробником) відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 10 %, наслідком чого є утворення високодисперсної і більш стійкої піни. Встановлено, що за збільшення кратності піни її однорідність зростає, а саме а саме під час визначення діапазону розмірів бульбашок для піни кратністю К=12,5 діаметри бульбашок знаходилися в межах від 0,09 мм до 0,13 мм (кількість різних діаметрів бульбашок n=5), що на 66 % менше у порівнянні

з діапазоном діаметрів для піни кратністю К=5. (кількість різних діаметрів бульбашок n=15). Найбільша однорідність бульбашок спостерігається для піни кратністю К=20, де діапазон діаметрів знаходиться у межах від 0,09 мм до 0,11 мм. У співставленні з розбіжністю розмірів бульбашок піни від кратності К=20 до кратності К=6 зменшення відбулося на 80 %. (кількість різних діаметрів бульбашок n=3).

Отримано результати, що стосуються визначення вогнегасної ефективності компресійної піни, під час гасіння лабораторних (не стандартизованих) вогнищ класу А, за показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння, в залежності від кратності та концентрації водного розчину піноутворювача у компресійній піні. Визначено, що кратність піни суттєво впливає на її вогнегасну ефективність. Так, збільшення кратності піни з 15 до 25 приводить до підвищення ефективності гасіння відповідно на 60 % (від найнижчого значення показника ефективності гасіння, до його максимального значення, за яким оцінювалась вогнегасну здатність), в залежності від концентрації піноутворювача. При цьому для розчину з 6 % концентрацією піноутворювача (на прикладі піноутворювача загального призначення «БАРС-S»), має місце найбільша вогнегасна ефективність. Проведено експериментальні дослідження щодо гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі 1А водою та компресійною піною. Порівняно вогнегасну ефективність гелеутворюючих систем, компресійної піни та води. Оцінку вогнегасної ефективності проведено за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$. Під час гасіння модельного вогнища водою значення показника ефективності гасіння склало $П_{е.г} = 4{,}12 \times 10^{-3}$, $\frac{м^2}{кг \times с}$, але після гасіння модельного вогнища, через 5 хвилин, спостерігалося повторне займання. Значення показника для гелеутворючих систем $CaCl_2$ 11,4% – $Na_2O \cdot 2{,}95SiO_2$ 3,8% – H_2O 84,8% склало $П_{е.г} = 11{,}9 \times 10^{-3}$, $\frac{м^2}{кг \times с}$, що на 65 % більше, ніж вогнегасна ефективність води. Найбільша вогнегасна ефективність за

показником ефективності гасіння спостерігається для компресійної піни та становить $П_{е.г}$= 14 х 10^{-3}, $\frac{м^2}{кг \times с}$, що на 80 % більше, ніж у води, та на 15 % більше, ніж у гелеутворюючих систем.

Надано рекомендації щодо застосування систем компресійної піни в підрозділах Державної служби України з надзвичайних ситуацій. України. Запропоновано конструкцію переносної системи пожежогасіння компресійною піною, що може бути розроблена та впроваджена у практичні підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Розроблено технічні вимоги до переносного модуля пожежогасіння компресійною піною для підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій України.

Ключові слова: компресійна піна, пожежі класу А, тверді горючі речовини, пожежогасіння, стійкість, кратність.

Список опублікованих праць за темою дисертації:

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

1. Шахов С.М., Виноградов С.А., Присяжнюк В.В. Розробка системи пожежогасіння газонаповненою піною. *Проблемы пожарной безопасности.* 2017. Вип 42. С. 12–21.

2. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Вплив кратності компресійної піни на дисперсність і стійкість. *Проблемы пожарной безопасности.* 2019. Вип. 45. С. 27–33.

3. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Стилик І.Г. Визначення залежності характеристик компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2019. Т. 29, № 5. С. 103–106.

4. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею

твердих горючих речовин. *Проблемы пожарной безопасности*. 2019. Вип. 46. С. 199–205.

5. Шахов С.М., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А. Математичне забезпечення для проектування систем генерування компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020, Т. 30, № 3. С.111–115.

6. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення показника вогнегасної здатності компресійної піни. *Проблемы пожарной безопасности*. 2020. Вип. 47. С. 127–131.

7. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54). P. 29–35.

Стаття у науковому періодичному виданні інших держав з напряму, з якого підготовлено дисертацію:

8. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. Fire Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam, Water and Gel Forming Agents in a Standard Class A Test *Safety & Fire Technology*. 2020. Vol. 55.Issue 1. P. 154–160.

Статті в інших виданнях:

9. Шахов С.М., Виноградов С.А., Ларін О.М. Аналіз світових зразків систем пожежогасіння газонаповненою піною. *Надзвичайні ситуації. Попередження та ліквідація*. 2017. Вип 1. С. 50–58.

Патенти:

10. Шахов С.М., Виноградов С.А., Тітенко О.М., Кодрик А.І. Пінозмішувач для утворення компресійної піни: пат. 142507 Україна: МПК A62C 31/12, A62C 5/02, B05B 7/00. № u 2019 11826; заявл. 11.12.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11/2020.

Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Шахов С.М. Використання статичних змішувачів у системах подачі компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. IX Міжнар. наук.–практ. конф., 18–19 трав. 2018 р. Черкаси : ЧІПБ, 2018. С. 144–145.

12. Шахов С.М, Нікулін О.Ф. Функціонально–фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація* : матеріали наук.–практ. сем., 21 лют. 2019 р. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 285–287.

13. Шахов С.М. Розробка експериментальної установки для проведення досліджень властивостей компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 185.

14. Shakhov S.M., Balaka N.I. Innovative technologies in firefighting: compressed air foam. *Technologie Informacyjne i innowacyjne w XXI wieku*: mat. Miedzynarodowa konferencja naukova. Poland : Katowice, 2019. P. 395–406.

15. Шахов С.М., Кодрик А.И., Виноградов С.А., Титенко О.М. Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация* : сб. материалов докл. VIII Междунар. науч.–практ. конф. Минск : НИИПБЧС , 2019. С 103–115.

16. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Порівняння вогнегасних показників компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. XI Міжнар. наук.– практ. конф., 09–10 квіт. 2020 р. Черкаси : ЧІПБ, 2020. С. 86–88.

17. Шахов С.М., Виноградов С.А. Пеносмеситель для генерации компрессионной пены. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы* : сб. материалов докл. XI Междунар. науч.–практ. конф. 8–9 апр., 2020 г. Минск : УГЗ, 2020. С. 291–292.

18. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення найбільш ефективної вогнегасної речовини під час гасіння стандартних модельних вогнищ класу А. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки:* зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Рівне: НУВГП, 21–22 травня 2020. С. 178–180.

SUMMARY

Shakhov S.M. Improving the efficiency of use of compressed air foam for extinguishing class A fire.

Thesis for a Doctor of Philosophy in the speciality 261 – Fire Safety. National University of Civil Defence of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkiv, 2021.

In the thesis, an urgent scientific and practical problem in the field of fire safety has been solved – the efficiency of using compressed air foam for extinguishing Class A fires has been increased by varying its expansion ratio and the concentration of an aqueous solution of foam agent.

Today, solids and materials are the most common in a production, the economy, and everyday life. It is known that about 80% of the total number of fires occurring on the territory of the State occurs in the buildings of the residential sector. In the conditions of extinguishing fires associated with the combustion of solid combustible substances, water is the main extinguishing agent. But, despite its advantages, wide distribution, convenience, and economic feasibility, its significant part does not fall into the combustion zone. Only 5-10 % of water is used to extinguish a fire; in fact, 90-95 % of the water remains overspilled, resulting in significant material losses. One of the ways to increase the efficiency of extinguishing Class A fires is the use of compressed air foam.

Compressed air foam has several advantages over other fire extinguishing agents: due to the mixing technology, the foam, which is highly dispersed and homogeneous, that makes it more stable in comparison with air-filled foam, is

being formed; with the help of the dosing device, the ratio of the foam components can be adjusted, which allows the formation of foam with the required expansion ratio, both dry and wet.

The analysis made it possible to find that foreign manufacturers offer the use of compressed air foam with different expansion ratios and the concentration of an aqueous solution of foam agent. Based on the analysis, it was revealed that in Ukraine, there is no work on the development of generation systems and compressed air foam application for the units of the civil defense operational rescue service. A review of theoretical and experimental studies related to the study of the properties and fire extinguishing efficiency of compressed air foam has been carried out. The analysis of the theoretical base and the practical results obtained made it possible to establish that a large number of studies are devoted to the use of compressed air foam for extinguishing Class B fires. There is no scientific justification or recommendation which expansion ratio and concentration of a foam agent aqueous solution in compressed air foam have the greatest fire extinguishing efficiency for extinguishing solid combustible substances.

Based on the foregoing, a mathematical model of the compressed air foam generation, which allows in the future designing an experimental model of a system for generating and compressed air foam application, has been developed and proposed. The developed mathematical model makes it possible to carry out a technical calculation of the system parameters, taking into account its requirements, to calculate the parameters of the system depending on the foam expansion ratio, which should be obtained, to study the influence of the parameters of the foam-generating insert on the expansion ratio of compressed air foam. The application created on the basis of a mathematical model allows selecting the necessary system characteristics for the supply of compressed air foam, such as operating pressure, diameters of the air and liquid mixture supply holes, the diameter and length of the foam-generating insert, and the diameter of the discharge outlet of fire-hose barrel.

The analysis of existing methods of mixing air and a foam agent solution in systems for supply of compressed air foam has been carried out. A number of advantages of the coaxial mixing method over other existing technologies have been established. An original foam educator of coaxial mixing type with a reactor, in which converging-diverging nozzles (Laval nozzles) are provided to intensify the foaming process, has been developed (a patent has been obtained for a compressed air foam educator). Static educators with various design features that can be used to generate compressed air foam have been considered. Considering the above, an experimental sample of a generation system and a compressed air foam application has been designed and developed on the basis of calculated data obtained using a mathematical model and analysis of existing systems for supplying compressed air foam, which makes it possible to obtain foam with a working range of expansion ratio from 5 to 25.

Using the developed sample of the generating system and compressed air foam application, experimental studies of the effect of expansion ratio and the concentration of an aqueous solution of «BARS-S» foam agent in compressed air foam on its properties have been carried out and it was found that, in contrast to air-filled foam, compressed air foam with a larger expansion ratio has a higher stability. In particular, as the expansion ratio of foam increases from 5 to 20, its stability increases from 4.5 minutes to 21.8 minutes, that is, almost five times. An increase in the concentration of an aqueous solution of «BARS-S» foam agent from 4 % to 6 % is accompanied by an increase in the stability of compressed air foam produced from it by 22 %, and with a change of the foam expansion ratio within the same limits, the size of the foam bubble decreases by 14 %, which leads to an increase in the duration of its existence. It was also found (using the example of «BARS-S» foam agent) that if the concentration of an aqueous solution of foam agent increases from 4 % to 6 % (the concentration recommended by its manufacturer), the size of the foam bubble decreases by 10 %, which results in the formation of a highly dispersed and more stable foam. It was stated that as the expansion ratio of foam increases, its homogeneity increases, namely, when

determining the range of bubble sizes for foam with expansion ratio K=12.5, the bubble diameters ranged from 0.09 mm to 0.13 mm (the number of different diameters bubbles n=5), which is 66 % less compared to the diameter range for foam with expansion ratio K=5 (the number of different bubble diameters n=15). The greatest homogeneity of bubbles is observed for foam with the expansion ratio K=20, where the diameters range is from 0.09 mm to 0.11 mm. In comparison with the discrepancy in the size of the foam bubbles from the expansion ratio K=20 to the expansion ratio K=6, the decrease occurred by 80 % (the number of different bubble diameters n=3).

Results regarding the determination of the fire extinguishing efficiency of compressed air foam during extinguishing of laboratory (non-standardized) Class A fire sources in terms of fire extinguishing capacity and extinguishing efficiency, depending on the expansion ratio and the concentration of an aqueous solution of foam agent in compressed air foam, have been obtained. It has been determined that the foam expansion ratio significantly affect its fire extinguishing efficiency. Thus, an increase in the expansion ratio of foam from 15 to 25 leads to an increase in the extinguishing efficiency by 60 %, respectively (from the lowest value of the extinguishing efficiency factor to its maximum value, according to which the fire extinguishing capacity was estimated), depending on the concentration of the foam agent. At the same time, for a solution with 6 % concentration of foam agent (on the example of general-purpose «BARS-S» foam agent), the highest fire extinguishing efficiency takes place. Experimental studies to extinguish a standardized simulative fire center 1A with water and compressed air foam have been carried out compared of fire extinguishing efficiency of gel, compressed air foam, and water. The assessment of fire extinguishing efficiency has been carried out in terms of extinguishing efficiency $I_{e.e}$. During the extinguishing of the simulative fire with water, the value of the extinguishing efficiency factor was $I_{e.e} = 4.12 \times 10^{-3}$, , but after extinguishing the simulative fire bed, after 5 minutes, repeated ignition has been observed. The factor value for $CaCl_2$ gel 11.4 % – $Na_2O \bullet 2.95\ SiO_2$ 3.8 % – H_2O 84.8 % was $I_{e.e} = 11.9 \times 10^{-3}$, which is 65 % more

than fire extinguishing efficiency water. The highest fire extinguishing efficiency in terms of extinguishing efficiency is observed for compressed air foam and is $I_{e.e}= 14 \times 10^{-3}$, which is 80 % more than water, and 15 % more than gel.

Recommendations for the use of compressed air foam systems in the units of the State Emergency Service of Ukraine have been provided. The design of a portable fire extinguishing system using compressed air foam, which can be developed and implemented in the practical units of the State Emergency Service of Ukraine, has been proposed. Technical requirements for a portable fire extinguishing module using compressed air foam for units of the State Emergency Service of Ukraine have been developed.

Keywords: compressed air foam, class A fires, solid combustible substances, fire extinguishing, resistance, expansion ratio.

List of published works on the topic of the thesis:

Papers in scientific publications of Ukraine included in the international scientometric bases:

1. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Prysyazhnyuk V.V. Development of a Gas-Filled Foam Fire Extinguishing System. *Fire Safety Problems*. 2017. Issue 42. Pp. 12–21.

2. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M. Effect of Expansion Ratio of Compressed Air Foam on Dispersion and Stability. *Fire Safety Problems.* 2019. Issue 45. Pp. 27–33.

3. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Stylyk I.H. Determination of the Dependence of the Compressed Air Foam Characteristics. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*. 2019. Vol. 29, No. 5. Pp. 103–106.

4. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M. Determination of Fire Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam During Extinguishing Solid Combustible Substances with the Foam. *Fire Safety Problems*. 2019. Issue 46. Pp. 199–205.

5. Shakhov S.M., Kodrik A.I., Titenko O.M., Vinogradov S.A. Mathematical Tool for Designing Compressed Air Foam Generation Systems. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*. 2020, Vol. 30, No. 3. Pp. 111–115.

6. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M. Determination of the Fire Extinguishing Capacity Factor for Compressed Air Foam. *Fire Safety Problems.* 2020. Issue 47. Pp. 127–131.

7. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. No. 4/3(54). Pp. 29–35.

Paper in a scientific periodical of other States in the direction in which the thesis was written:

8. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. Fire Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam, Water and Gel Forming Agents in a Standard Class A Test *Safety & Fire Technology*. 2020. Vol. 55.Issue 1. Pp. 154–160.

Articles in the other editions:

9. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Larin O.M. Analysis of World Samples of Gas-Filled Foam Fire Extinguishing Systems. Emergencies. Prevention and Elimination. 2017. Issue 1. Pp. 50–58.

Patents:

10. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Titenko O.M., Kodrik A.I. Foam Eductor to Create Compressed Air Foam: patent 142507 Ukraine: No. u 2019 11826; decl. on 12/11/2019; publ. 06/10/2020, Bul. No. 11/2020.

Scientific conference abstracts that testify to the approbation of the thesis materials:

11. Shakhov S.M. Use of Static Educators in Compressed Air Foam Systems. *Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Response* : Collection of materials of reports of the IX International Scientific and Practical Conference, 2018, Cherkasy: ChIPB, 2018. Pp. 144–145.

12. Shakhov S.M., Nikulin O.F. Functional-Physical Diagram of the Installation for the Generation of Compressed Air Foam. *Prevention of Emergencies and Their Elimination* : Materials of the Scientific and Practical Seminar, February 21, 2019, Kharkiv: NUTSU, 2019. Pp. 285–287.

13. Shakhov S.M. Development of an Experimental Setup for Investigating the Compressed Air Foam Properties. *Problems and Prospects of Civil Protection* : Collection of Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Kharkiv: NUTSZU, 2019, P. 185.

14. Shakhov S.M., Balaka N.I. Innovative technologies in firefighting: compressed air foam. *Technologie Informacyjne i innowacyjne w XXI wieku*: mat. Miedzynarodowa konferencja naukova. Poland : Katowice, 2019. Pp. 395–406.

15. Shakhov S.M., Kodrik A.I., Vinogradov S.A., Titenko O.M. Development of a Mathematical Model of the Compression Foam Generation Setup. *Emergency Situations: Prevention and Elimination* : Collection of Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Minsk : NIIPBChS, 2019. Pp. 103–115.

16. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M. Comparison of Fire Extinguishing Performance of Compressed Air Foam. *Theory and Practice of Fire Extinguishing and Emergency Response* : Collection of Proceedings of the XI International Scientific Conference, 2020. Cherkasy: ChIPB, 2020. Pp. 86–88.

17. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. Foam Educator for Generating Compressed Air Foam. *Ensuring Life Safety: Problems and Prospects* : Collection of Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, 2020. Minsk: UGZ, 2020. Pp. 291–292.

18. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M. Determination of the Most Effective Fire Extinguishing Agent for Extinguishing Standard Model Class A Fire Sources. *Problems and Prospects for the Development of Modern Science* : Collection of Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. Rivne: NUVHP, May 21–22, 2020. Pp. 178–180.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ……17

ВСТУП……..18

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ…….....……...26

1.1. Аналіз пожеж класу А та способів гасіння……26

1.2. Аналіз використання води для гасіння пожеж…… 30

1.3. Аналіз використання повітряно-механічної піни для гасіння пожеж……....34

1.4. Аналіз використання компресійної піни для гасіння пожеж……..38

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ……..…….58

2.1. Розроблення математичної моделі процесу генерування компресійної піни.....58

2.2. Розробка експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни……..…….83

2.3. Перевірка теоретичних та практичних результатів математичної моделі процесу генерування компресійної піни …….…..…….....88

2.4. Висновки …….89

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ТА ЇЇ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ……..... 91

3.1. Експериментальні дослідження впливу кратності компресійної піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни……..……..….92

3.2. Експериментальні дослідження впливу кратності та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для генерування компресійної піни, на її вогнегасну ефективність під час гасіння нестандартизованих вогнищ пожеж класу А……...……112

3.3. Визначення показників ефективності гасіння та вогнегасної здатності…….…. 131

3.4. Порівняння двох показників вогнегасної ефективності компресійної піни між собою…….……138

3.5. Експериментальні дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни, води та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандаризованих модельних вогнищ класу А…….....143

3.6. Висновки ….....153

РОЗДІЛ 4. ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ПІДРОЗДІЛІВ ДСНС…….……..…156

4.1. Рекомендації застосування компресійної піни в підрозділах ДСНС……...156

4.2. Переваги застосування КП у порівнянні з водою та гелеутворюючими системами……..……..…166

4.3. Висновки…….167

ВИСНОВКИ……...169

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....172

ДОДАТКИ……..190

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЗС – автозаправні станції

ВР – вогнегасна речовина

ГР – горючі рідини

ГУС – гелеутворюючі системи

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій

КП – компресійна піна

ЛЗР – легкозаймисті рідини

ММ – математична модель

ОРС ЦЗ – Оперативно-рятувальна служба цивільного захисту

ПТЗКП – переносні технічні засоби для генерування і подавання компресійної піни

ПУ– піноутворювач

ТГМ – тверді горючі матеріали

AFFF – Aqueous Film-Forming Foam Concentrates (фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі)

CAF – compressed air foam (компресійна піна)

CAFS – compressed air foam system (система генерування і подавання компресійної піни)

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема, пов’язана з гасінням пожеж, є повсякчас актуальною й постійно потребує вивчення та пошуку вирішення. Щороку найбільша кількість пожеж відбувається в житловому секторі, де основним горючим навантаженням є тверді горючі речовини. Пожежі, під час яких відбувається горіння таких речовин, відносяться до пожеж класу А.

Як основну вогнегасну речовину для боротьби з такими пожежами використовують воду. Вона є найбільш поширеною вогнегасною речовиною, є зручною у використанні та має безумовну перевагу з економічної точки зору у порівнянні з іншими вогнегасними речовинами. Але, незважаючи на це, вона має суттєвий недолік – під час гасіння твердих горючих речовин відбувається надлишкове її використання. Є інформація, що більшість сучасних технічних засобів використовують на гасіння пожежі лише 5–10 % води, а 90–95 % фактично залишається марно пролитою.

Одним з напрямів підвищення ефективності гасіння пожеж класу А є застосування компресійної піни. Компресійна піна має ряд переваг у порівнянні з іншими вогнегасними речовинами: за рахунок технології перемішування утворюється піна, яка є високодисперсною й однорідною, що робить її більш стійкою; за допомогою пристрою дозування можна регулювати відношення компонентів водного розчину піноутворювача, що надає можливість утворювати піну необхідної кратності, як “суху”, так і “мокру”; стає можливим застосування компресійної піни для гасіння електрообладнання під напругою за рахунок утворення піни з низьким вмістом рідкої фази.

Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, пов’язаних з вивченням вогнегасної піни, у тому числі компресійної, було проведено такими вченими, як Кодрик А.І., Ковалишин В.В., Боровиков В.О., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Грачулин А.В., Кректунов А.А., Федяєв В.Д., Carey W.M., Colletti D.J., Huiqing L., Liebson J.L.

В роботах згаданих авторів розглянуто застосування піни для гасіння пожеж ЛЗР. Ряд досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння ТГМ, але поза увагою залишилося дослідження впливу кратності і вмісту піноутворювача у водному розчині, що використовується для генерування компресійної піни на її властивості та визначення, яка кратність та концентрація піноутворювача для піни забезпечує найбільшу вогнегасну ефективність під час гасіння пожеж класу А.

Отже, питання використання компресійної піни для гасіння твердих горючих матеріалів залишається недостатньо вивченим та потребує подальших досліджень і є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційне дослідження проводилося в рамках науково-дослідних робіт «Провести дослідження та розробити пропозиції щодо застосування переносних технічних засобів пожежогасіння для підвищення ефективності гасіння пожеж «Переносні засоби пожежогасіння» (№ державної реєстрації 0117U000840) і «Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («ПІНА – К»)» (№ державної реєстрації 0118U004501), в яких автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А за рахунок варіювання її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача.

Відповідно до сформульованої мети в дисертації поставлено до вирішення наступні завдання:

– провести аналіз методів щодо гасіння пожеж класу А;

– розробити математичну модель процесу генерування компресійної піни;

– розробити експериментальний зразок системи генерування і подавання компресійної піни;

– визначити вплив кратності та концентрації водного розчину

піноутворювача в компресійній піні на її властивості;

– експериментальним шляхом дослідити вплив кратності та концентрації водного розчину піноутворювача в компресійній піні на її вогнегасну ефективність під час гасіння лабораторних модельних вогнищ пожежі класу А;

– порівняти ефективність застосування компресійної піни для гасіння стандартизованих модельних вогнищ класу А з ефективністю застосування з цією метою водних вогнегасних речовин (води та гелеутворюючих систем);

– обґрунтувати положення і розробити рекомендації щодо застосування систем пожежогасіння компресійною піною для підрозділів ДСНС.

Об’єкт дослідження – характеристики компресійної піни і процеси гасіння нею модельних вогнищ пожеж класу А.

Предмет дослідження – вплив кратності та концентрації водного розчину піноутворювача на характеристики компресійної піни і процеси гасіння нею пожеж класу А.

Методи досліджень – у роботі використано комплексний метод досліджень, що включає аналіз і узагальнення науково-технічних досягнень з питань розробки та застосування способів і технологій систем генерування і подавання компресійної піни. Вирішення поставлених у дисертації завдань здійснювали із застосуванням математичного моделювання процесів, що відбуваються під час генерування компресійної піни. Під час проведення експериментальних досліджень з визначення вогнегасних властивостей компресійної піни використовувалися методи факторного планування експерименту. Застосовувалися метрологічно атестовані засоби вимірювальної техніки та дослідний зразок власної розробки системи для генерування і подавання компресійної піни. Дослідження процесів припинення горіння і визначення умов ефективного застосування компресійної піни здійснювали з використанням нестандартизованих

(лабораторних) і стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А. Результати теоретичних та експериментальних досліджень оброблялися з використанням статистичних методів і програмного забезпечення із використанням комп'ютерної техніки.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше отримано математичну модель процесу генерування компресійної піни, яка дозволяє розраховувати параметри системи для її подавання залежно від необхідної кратності піни;

– вперше встановлено, що на відміну від повітряно-механічної піни, з підвищенням кратності компресійної піни зростають її дисперсність, однорідність і стійкість;

– вперше досліджено залежність вогнегасної ефективності компресійної піни (від її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача на прикладі піноутворювача загального призначення «БАРС - S») під час гасіння модельних вогнищ пожежі класу А і показано, що найвища вогнегасна ефективність досягається при кратності піни 25 та у разі забезпечення концентрації піноутворювача, рекомендованої для генерування повітряно-механічної піни з використанням ежекційних стволів-генераторів;

– вперше оцінено вогнегасну ефективність компресійної піни, у порівнянні з гелеутворюючими системами і водою (без функціональних добавок) та показано, що застосування компресійної піни дає змогу підвищити ефективність гасіння на 80 % і 15 % у порівнянні з зазначеними речовинами, відповідно, а також запобігти повторному займанню погашеного модельного вогнища пожежі.

Практичне значення отриманих результатів. Підготовлено вимоги щодо проектування систем для генерування і подавання компресійної піни з визначенням технологічних параметрів таких систем. Використання розробленої математичної моделі та створеної на її основі прикладної програми дозволяє вирішувати наступні завдання: вибирати необхідні

геометричні характеристики системи для генрування і подавання КП, залжено від типу піни, яку необхідно отримати. Це забезпечує підвищену ефективність, під час використанні CAFS для гасіння пожеж.

Реалізуючи роботу математичної моделі процесу генеруваня компресійної піни, можна визначити характеристики системи (робочий тиск, діаметри отвору подавання повітря та водного розчину піноутворювача, діаметр і довжину піногенеруючої вставки, діаметр вихідного отвору ствола). Матеріали дисертації впроваджено у діяльність ТОВ « Копанія Тітал» (акт від 29.09.2020 р.), ГУ ДСНС України у Харківській області (акт від 29.08.2020р.), ГУ ДСНС України у Полтавській області (акт від 30.09. 2020р.) учбовий процес (акт від 25.08.2020р., дисципліна «Протипожежна та аварійно-рятувальна техніка», тема «Основи пінного гасіння. Пожежні автомобілі пінного гасіння»).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені у дисертації, особисто отримані автором на основі експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А. Автор особисто брав участь у підготовці та проведенні всіх експериментальних досліджень.

Особистий внесок здобувача у працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: у роботах [1, 2] проведено аналіз існуючих систем для генерування і подавання компресійної піни серед відомих виробників систем пожежогасіння, виділено та проаналізовано основні напрями застосування компресійної піни; в [3] на підставі проведеного аналізу виявлено, що на території України не ведуться роботи щодо розробки систем для генерування і подавання компресійної піни, запропоновано конструкцію переносної системи пожежогасіння компресійною піною, що може бути розроблена та впроваджена у діяльність практичних підрозділів ДСНС України, проведено оціночний розрахунок кількості повітря, необхідного для піноутворення, розроблено технічні вимоги до переносного модуля пожежогасіння компресійною піною для підрозділів ДСНС; в [4] проведено аналіз статичних

змішувачів, які використовуються для процесу генерування піни в системах CAFS, виділено основні типи насадкових елементів для отримання більш однорідної піни; в [5] запропоновано функціонально-фізичну схему системи для генерування і подавання компресійної піни, що є підґрунтям для подальшої побудови математичної моделі процесу для генерування і подавання компресійної піни; у роботах [6–8] розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни за допомогою програмного забезпечення. Розроблена математична модель дозволяє проводити технічний розрахунок параметрів системи для генерування і подавання компресійної піни з урахуванням її вимог, здійснювати розрахунки параметрів системи залежно від кратності піни, яку необхідно отримати, дозволяє досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни; у [9, 10] запропоновано оригінальний пінозмішувач для генерування компресійної піни; у [11] на основі математичної моделі [6–8] спроектовано та розроблено експериментальну систему для генерування і подавання компресійної піни з використанням змішувача [9]; у роботах [12, 13] за допомогою дослідного зразка системи [11] проведено експериментальні дослідження щодо визначення впливу кратності піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни, встановлено низку недосліджених залежностей, а саме: для піни більшої кратності має місце і більша її стійкість, зі збільшенням кратності відбувається зменшення розміру бульбашки, що приводить до збільшення тривалості її існування, наслідком чого є утворення високодисперсної стійкої піни, підтверджено, що отримана піна має рівномірну високоструктуровану будову з однаковими розмірами бульбашок; у [14,15] проведено експериментальні дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності компресійної піни, під час гасіння нею нестандартизованих (лабораторних) модельних вогнищ пожежі класу А. Встановлено вплив кратності піни та вмісту піноутворювача у водному розчині на вогнегасну ефективність компресійної піни, яка оцінювалася за

показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння; в [16] проведено порівняння показників вогнегасної ефективності компресійної піни, відповідно до результатів, отриманих у [14, 15]; у роботах [17, 18] виконано експериментальне дослідження щодо порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни, гелеутворюючих систем та води, під час гасіння ними стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А. Встановлено, що компресійна піна має найбільшу вогнегасну здатність за показником ефективності гасіння.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та національних наукових конференціях: IX Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2018); науково-практичному семінарі «Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація» (м. Харків, 2019); Міжнародній науково–практичній конференції «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту» (м. Харків, 2019); II Міжнародній науковій конференції «Інформаційні та інноваційні технології в XXI столітті» (м. Катовіце, Польща, 2019); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація» (м. Мінськ, Білорусь, 2019); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідація надзвичайних ситуацій » (м. Черкаси, 2020); XIV Міжнародній науково–практичній конференції курсантів, слухачів і ад'юнктів «Забезпечення безпеки життєдіяльності: проблеми та перспективи» (м. Мінськ, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки» (м. Рівне, 2020).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 9 наукових статтях, у тому числі у виданнях, включених до переліку фахових, 8 тезах доповідей на конференціях; отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та об’єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 175 найменувань і 5 додатків, містить 189 сторінок машинописного тексту, 23 таблиці, 75 рисунків.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А ТА ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

1.1. Аналіз пожеж класу А та способів гасіння

Згідно [19] пожежі класу А – це тип пожеж, що супроводжуються горінням твердих матеріалів, зазвичай органічного походження, під час горіння яких, як правило, утворюються тліючі вуглини. Твердими називаються матеріали, температура плавлення і розкладання яких перевищує 50 ℃, а також речовини, які не мають температури плавлення [20].

Тверді речовини і матеріали є найбільш поширеними у виробництві, народному господарстві та побуті. В наш час поряд з матеріалами природного походження широке застосування знаходять тверді речовини, які одержують синтетично. Світове виробництво полімерів подвоюється через кожні п’ять років [21]. До таких речовин відносять матеріали, виготовлені на основі целюлози, деревини, бавовни, бавовняні тканини, папір; речовини на основі вуглеводнів та їх похідних – гуми, пластмаси, хімічних волокон і тканин з них. Великою проблемою в цей час є і пожежі природних матеріалів – таких як продукти харчування – зерна і зернопродуктів, жирів, цукру тощо. Незважаючи на велику роботу з вогнезахисту природних і особливо штучних матеріалів, основна їх маса належить до групи горючих. Ця обставина є однією з причин неухильного зростання кількості пожеж твердих горючих матеріалів і збільшення збитків від них.

Горіння ряду твердих горючих матеріалів супроводжується утворенням вуглистого шару. Це деревина, пластмаси, матеріали на основі целюлози, зшиті полімерні матеріали – реактопласти. Для них є характерними два види горіння – гомогенне (полуменеве) і гетерогенне (тління) [22]. Їх співвідношення залежить від інтенсивності тепло та газообміну біля поверхні

горіння. У процесі горіння вуглистий шар акумулює значну кількість теплоти. Температура його поверхні сягає 600–700 °С [19], що є достатнім для запалювання горючих газових сумішей. В результаті для твердих горючих матеріалів зниження температури горіння до температури загасання без охолодження прогрітого шару є умовою гасіння, необхідною, але недостатньою, оскільки прогрітий шар конденсованої фази (твердої речовини або розплаву) здатний протягом деякого часу виділяти нагріті продукти розкладання і випаровування в зону горіння і бути джерелом їх займання.

Виходячи з [22], за умови, достатні для припинення горіння пожеж твердих горючих матеріалів, з точки зору фізико-хімічних процесів горіння, приймаються умови зниження температури цих матеріалів нижче температури початку їх піролітичного розкладання.

Механізм припинення горіння під час пожежі значною мірою залежить від виду і режиму горіння, зовнішніх умов, вихідного стану горючої речовини і багатьох інших чинників. Від механізму і способу припинення горіння залежить вибір вогнегасної речовини, необхідна її кількість, інтенсивність подавання та інші чинники, що визначають у кінцевому підсумку ефективність і якість гасіння пожежі.

За агрегатним станом в умовах застосування вогнегасні речовини прийнято поділяти [22] на твердофазні, рідкофазні (іноді використовується термін "рідинні вогнегасні засоби" [23]), газофазні (газові) і аерозольні.

За [22, 23] вогнегасні речовини класифікують за двома ознаками:

– за агрегатним станом;

– за механізмом припинення горіння.

Згідно [22, 23] за агрегатним станом вогнегасні речовини поділяють на рідкі (вода та водні розчини), пінні засоби пожежогасіння (повітряно-механічна та хімічна піна), порошкові склади і сипучі матеріали (пісок, земля, спеціальні сполуки тощо).

За механізмом припинення горіння автори [22, 23] поділяють вогнегасні речовини на такі групи:

– речовини, які охолоджують зону реакції горіння;

– речовини, що розбавляють реагуючі речовини в зоні реакції горіння;

– речовини, що хімічно гальмують реакцію горіння речовини;

– речовини, що ізолюють реагуючі речовини від зони горіння.

На основі літературного аналізу авторами визначено механізми гасіння [22–24], основі перваги [25–27] та недоліки [28, 29] вогнегасних речовин, які використовують для гасіння пожеж класу А. Отримані результати аналізу наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Вогнегасні речовини для гасіння пожеж класу А

Вогнегасні речовини	Домінуючий механізм пожежогасіння	Переваги	Недоліки
Вода	охолодження	– доступність; – простота застосування; – дешевизна; – зручність зберігання та транспортування; – безпечність застосування	– великі витрати; – можливість повторного займання, що тягне за собою необхідність проливання конструкцій; – низький коефіцієнт використання; – значні побічні збитки від затоплення приміщень; – висока температура замерзання; – високі енерговитрати під час підйому на висоту; – збільшення ваги речовин під час контактування з водою внаслідок набухання і надалі можливість обвалення конструкцій; – неможливість гасіння електрообладнання під напругою (крім тонкорозпиленої води)

Продовження табл.1.1

Повітряно–механічна піна	охолодження; ізолювання	– зниження ймовірності повторного займання; – зниження вторинного збитку від пожежі; – можливість гасіння великих площ; – зниження витрати вогнегасних речовин	– необхідність прибирання залишків піни після завершення гасіння; – більша вартість гасіння через використання піноутворювача; – неможливість гасіння електрообладнання під напругою
Порошкові склади	інгібування	– можливість гасіння електрообладнання під напругою; – можливість гасіння металів (спеціально призначеними для цього порошками)	– висока хімічна активність; – низька охолоджувальна здатність; – складність систем порошкового пожежогасіння; – необхідність прибирання залишків порошку після гасіння
Газові вогнегасні речовини класу інертних розріджувачів	розведення	– хімічна нейтральність; – відсутність вторинного збитку; – виключення корозії металів або окислення інших матеріалів; – можлівість гасіння електрообладнання під напругою	– неефективність на відкритих площах; – непридатність для гасіння речовин, яким для горіння не потрібен кисень; – зберігання газових модулів вимагає особливих запобіжних заходів

Продовження табл.1.1

Газові вогнегасні речовини класу інгібіторів горіння	інгібування	– можливість гасіння електрообладнання під напругою; – низька температура замерзання;	– токсичність самих вогнегасних речовин і продуктів їх термічного розкладання; – висока корозійна активність продуктів термічного розкладання.

Під час гасіння пожеж, пов’язаних з горінням твердих горючих матеріалів, найбільш ефективними є охолоджувальні вогнегасні речовини, що діють за механізмом припинення горіння охолодженням горючих матеріалів, та ізолювальні вогнегасні речовини [20].

Виходячи з аналізу літературних даних [20–23], присвячених проблемі гасіння твердих горючих речовин, вивченню механізмів та вогнегасних засобів, встановлено, що найбільш поширеними вогнегасними засобами є вода і повітряно-механічна піна. Згідно з планом дослідження було проведено аналіз використання води і повітряно-механічної піни для гасіння пожеж.

1.2. Аналіз використання води для гасіння пожеж

Вода – найбільш поширений засіб (вогнегасна речовина) для гасіння пожеж. Джерелами водопостачання можуть бути поверхневі (моря, озера, річки, ставки і т.д.) і підземні (ґрунтові, джерельні, артезіанські) води [24].

Найбільший внесок у дослідження проблеми застосування води для гасіння пожеж зробили Абрамов Ю.А. [30–34], Абдурагімов І.М. [35–37], Корольченко Д.А. [38–40], Шароварніков А.Ф. [41–43], Ross R.H. [44], Smith D.P. [45], Стась С.В. [46–48], Ольшанський В.П. [49-51], Виноградов А.Г. [52–54] та ін.

Так, ряд теоретичних і практичних досліджень спрямований на визначення найбільш ефективних розмірів краплин води [24] Широке застосування знаходить вода аерозольного розпилення із середнім діаметром краплин близько 50 мкм [55]. В останні десятиліття досвід пожежогасіння тонкорозпиленою водою застосовують багато країн Європи, ефективність якого підтверджена в роботі [56]. У роботі [57] встановлено залежність випаровуваності краплин води від їх радіусів. Питання вогнегасної ефективності дії компактного струменя на горючий матеріал досліджено в роботі [58]. Свої дослідження вивченню питання ефективності застосування тонкорозпилених і розпилених струменів води під час гасіння пожеж твердих горючих речовин присвятили доіслідники [59], з яких встановлено, що зміни в режимі гасіння пожеж розпиленими струменями приводять до значного (більше 10 разів) зменшення витрати. Залежність максимальної дальності польоту струменя від способу подавання до осередку пожежі експериментально вивчено у праці [60]. У дослідженнях [61–64] розглянуто один із напрямів вирішення проблеми підвищення ефективності використання води на пожежі шляхом застосування тонкорозпиленої та термоактивованої води. Дослідники [65] відзначають, що застосування тонкорозпиленої води є ефективним для гасіння майже усіх видів горючих матеріалів, окрім речовин, які активно реагують з водою. У роботі [66] експериментально підтверджено, що під час застосування тонкорозпиленої води витрата води на гасіння пожеж знижується у 2–3 рази, у порівнянні з нормативними витратами. Результати огляду застосування води в тонкорозпиленому стані за період із початку 90-х років наведено в праці [67]. Аналіз [68, 69] вказує на розширення використання методів гасіння тонкорозпиленою водою та іншими рідкими засобами.

Ліквідація горіння водою може бути досягнута за рахунок охолодження, ізоляції та розбавлення. Практично усі три чинники діють одночасно, але домінуючим у кожному конкретному випадку є один або два. Основною властивістю води, що забезпечує припинення горіння, є

охолодження [70]. Під час гасіння водою пожеж, пов'язаних з горінням твердих горючих матеріалів, повного припинення процесів горіння можна досягти тільки охолодженням до певної температури самого горючого матеріалу. По-перше, тому що припинення полуменевого дифузійного горіння ще не означає припинення горіння взагалі, оскільки тверді горючі матеріали здатні до гетерогенного горіння (тління). По-друге, поверхневий шар цих матеріалів у процесі горіння прогрівається до температури, що значно перевищує температуру самозаймання. Після припинення полуменевого горіння над їх поверхнею знову створюються умови, достатні для повторного займання і продовження горіння. Тому умовою повного і надійного припинення горіння цих матеріалів є не тільки припинення полуменевого горіння над їх поверхнею, але й охолодження поверхні цих матеріалів та їх прогрітих поверхневих шарів до температури, нижчої за температуру початку виходу горючих летких фракцій або початку їх піролізу.

Як правило, під час гасіння пожеж водою відбувається охолодження горючої речовини нижче температури займання, причому теплота, відібрана від вогнища пожежі, поглинається водою і відводиться водяною парою. Виходячи з цього, спосіб охолодження водою застосовується в основному для гасіння твердих речовин [71].

Вода має високий поверхневий натяг, що значною мірою перешкоджає розподілу її по поверхні, проникненню вглиб палаючих твердих матеріалів і негативно позначається на швидкості охолодження.

Одним із шляхів вдосконалення рідкофазових вогнегасних речовин є використання добавок до води. Використання водних розчинів дозволяє зберегти основні позитивні властивості води і поліпшити ряд її характеристик, як вогнегасної речовини. Одним із суттєвих недоліків води, як вогнегасної речовини є недостатньо висока змочувальна здатність по відношенню до гідрофобних матеріалів. Це призводить до погіршення контактування води з поверхнями твердих речовин і відповідно швидкому

стіканню води з них. Цю властивість води обумовлено високим значенням її поверхневого натягу. Для зниження величини поверхневого натягу застосовують поверхнево-активні речовини. В пожежній справі використовують змочувальні розчини піноутворювачів з концентраціями 0,2-2% (в деяких випадках до 5%). Для зменшення втрат за рахунок стікання води застосовують добавки до води різних загусників. Загусники - це речовини, додавання яких до води збільшує в'язкість розчинів. Ще одним способом підвищення вогнегасної ефективності води є додавання до неї неорганічних сполук. Розчини неорганічних сполук можуть чинити комплексну дію. По-перше, вони можуть виступати як антипірени, що насичують горючий матеріал і ускладнюють його горіння. По-друге, водні розчини деяких неорганічних речовин можуть пригнічувати полум'яну фазу горіння. По-третє, водні розчини після випаровування з них води часто утворюють на поверхнях тверді плівки, які мають ізолювальні і теплозахисні властивості. Ще одним ефектом застосування водних вогнегасних речовин з добавками неорганічних речовин є зниження температури замерзання водних розчинів у порівнянні з температурою замерзання води. Але застосування усіх добавок пов’язане з високими матеріальними витратами.

Отже основна проблема полягає у підвищенні ефективності використання води під час гасіння пожеж. Авторами дослідження [72] відзначено, що під час гасіння твердих горючих матеріалів має місце надлишкове і марне використання води. Коефіцієнт використання води є дуже низьким та становить від 2 % до 20 %. Більшість сучасних технічних засобів використовують безпосередньо на гасіння вогнища тільки 5–10 % поданої води, фактично 90–95 % води вважається надмірно пролитою [73]. Часто збиток від надмірно пролитої води більше ніж від самої пожежі.

Актуальність проблеми великої втрати води під час її застосування, поряд з технологічним розвитком і появою сучасних вогнегасних речовин, змушує здійснювати пошук альтернативних і ефективних способів гасіння.

1.3. Аналіз використання повітряно-механічної піни для гасіння пожеж

На сьогодні повітряно-механічна піна широко використовується у випадку гасіння пожеж на об’єктах хімічної та нафтопереробної промисловості, а також для гасіння твердих і рідких речовин [20].

Великий внесок у розвиток пожежогасіння повітряно-механічною піною зробили вчені: Шароварников А.Ф. [74–76], Казаков М.Б. [77, 78], Пешков В.В. [79–81], Розенфельд Л.М [29] та ін.

Основну кількість досліджень спрямована на вивчення питання використання повітряно-механічної піни під час гасіння рідких горючих речовин. Так, у роботі [82] описано вогневі досліди з гасіння автомобільного бензину в піддонах піною низької кратності з різними типами піноутворювачів. За експериментальними результатами [83] встановлено оптимальну площу пожежогасіння для нафтопродуктів, на якій слід перевіряти ефективність піни, для отримання надійних кількісних даних. У роботі [84] проаналізовано досліди з гасіння нафтопродуктів піною високої кратності, генерованою з робочих розчинів синтетичних піноутворювачів. Дослідниками [85] вивчено ефективність тактики подавання піни під час гасіння горючих рідин з низькою температурою замерзання. Аналізуючи дослідження [86] з гасіння нафтопродуктів на різних площах за допомогою піни, генерованої з робочих розчинів різних піноутворювачів, відзначається вплив умов розподілу піни на процес гасіння пожежі, оскільки час покриття вільної поверхні пального залежить від кількості пристроїв подавання піни. У праці [87] експериментально проведено порівняння піни середньої кратності, генерованої з робочих розчинів синтетичних піноутворювачів з піною низької кратності, що отримується із фторпротеїнових і фторсинтетичних піноутворювачів, під час гасіння нафтопродуктів. Дослідники [88] вивчали ефективність піни низької кратності, генероваонї з робочих розчинів плівкоутворювального і “спиртостійкого”

піноутворювачів,а також ефективність піни високої кратності, генерованої з робочого розчину синтетичного піноутворювача під час гасіння легкозаймистих рідин. Авторами [89] відзначено більшу ефективність піни середньої кратності у порівнянні з піною високої кратності під час гасіння бензину. Повідомляється про те, що для збивання «полум'я» в початковий момент більш ефективною є піна низької кратності.

Піна являє собою дисперсну двофазну систему, що складається з бульбашок газу, оточених плівками рідини [20, 22]. Піна, це дисперсна система, яка є нестійкою [28]. З моменту утворення піни в ній протікають процеси старіння, внаслідок яких піна змінює свої властивості. Найбільш інтенсивні зміни спостерігаються в початковий момент. Руйнування піни в нормальних умовах відбувається в результаті витікання рідини і розриву плівок всередині піни [90]. Наслідком цього є зміна структури. У процесі старіння сферична форма осередків перетворюється в багатогранну. Крім того, з моменту утворення в піні починається процес дифузійного переносу повітря з маленьких бульбашок у великі. Це призводить до зменшення загального числа бульбашок і збільшення їх середнього діаметра.

Чим менший середній діаметр бульбашки піни, тим більшою є її дисперсність. Якщо бульбашки мають однакові розміри, піна називається монодисперсною; якщо має місце різний розмір бульбашок – полідисперсною [77]. Згідно [22, 23] піна може бути високодисперсною і низькодисперсною.

Для пін, які застосовують у пожежогасінні, до основних її властивостей відносять кратність, стійкість, дисперсність і однорідність [27, 77].

Залежно від величини кратності піни поділяють на чотири групи [28, 91]: піноемульсії, К < 3; піни низької кратності, 3< К< 20; піни середньої кратності, 20< К< 200; піни високої кратності, $K > 200$.

Згідно [22, 77] кратність піни K – це відношення об'єму піни $V_п$ до об'єму рідини $V_р$, з якої вона отримана.

$$K_{\text{П}} = \frac{V_{\text{П}}}{V_{\text{Р}}}. \qquad (1.1)$$

Наступна важлива властивість піни – це її стійкість. Під визначенням стійкості піни розуміють [64, 73] час існування елемента піни (окремої бульбашки) або певного об'єму піни.

Для отримання числового значення стійкості піні визначається час, протягом якого з піни виділяється 50 % об'єму рідини, з якої вона отримана [92]. Стійкість залежить від дисперсності піни. Чим вище дисперсність утворених бульбашок піни, тим більше її стійкість [22, 23], а отже і вогнегасна ефективність.

Дисперсність $D_{\text{п}}$ піни оцінюється або середнім розміром бульбашки, або розподілом бульбашок за розмірами [22, 23]. Найчастіше під дисперсністю розуміють величину, обернену до середнього розміру бульбашки піни:

$$D_{\text{П}} = \frac{1}{d_{\text{ср}}},\ d_{\text{ср}} = \frac{\sum_{\text{i=1}}^{\infty} d_{\text{i}} N_{\text{i}}}{\sum N_{\text{i}}}, \qquad (1.2)$$

де d_{i} – діаметр бульбашок фракції; $\sum N_{\text{I}}$ – загальне число бульбашок у всіх фракціях; N_{i} – число бульбашок фракції і с діаметром d_{i}.

Дисперсність є однією з найважливіших вогнегасних властивостей піни [23]. Стверджується [27], що чим вище дисперсність (менше середній радіус бульбашки), тим більше стійкість піни і вище її вогнегасна ефективність.

Відомо [22], що у разі отримання піни повітряно-механічним способом за збільшення кратності зростає і середній діаметр бульбашок. При цьому за збільшення кратності піни товщина плівок між бульбашками зменшується. Отже, зі збільшенням кратності повітряно-механічна піна стає низькодисперсною й її стійкість зменшується, наслідком чого є зниження її вогнегасної здатності.

Однорідність піни характеризується низьким розбігом розмірів бульбашок, з яких вона утворена. У свою чергу на розміри бульбашок піни та їх однорідність [93, 94] впливають методи одержання піни, тип і концентрація піноутворювача, наявність стабілізуючих речовин та кратність.

Піну низької кратності використовують для гасіння пожеж на складах деревини, для гасіння технологічного обладнання, невеликих розливів пального. Її можна подати струменем значної довжини на відстань понад 20 м [95]; крім того, вона добре проникає крізь нещільності та утримується на поверхні, володіє високими ізолюючими й охолоджуючими властивостями [90].

Піна середньої кратності є основним засобом гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів у резервуарах і на розлитих поверхнях [95]. Дальність подавання струменів становить 10–13 м. Піною середньої кратності гасять за площею і за об'ємом [23]. Вона також використовується для витіснення диму у випадку пожежогасіння об'ємним способом, ізоляції розташованих поруч з осередками пожежі об'єктів від впливу теплових і газових потоків.

Піна високої кратності використовується в основному для гасіння різних об'ємних споруд шляхом їх заповнення [24]. Високократна піна ефективно застосовується для осадження радіоктивних забруднень з повітря, гасіння пожеж на суднах і в бібліотеках, архівах, шахтах і т.д. Вогнегасна дія високократної піни базується головним чином, на ефекті пригнічення і витіснення. Охолоджуюча дія є настільки малою, що її вплив на процес пожежогасіння є несуттєвим [77].

Більш сучасним засобом пінного гасіння є компресійна піна, яка набула широкого поширення в Європі та Америці та має ряд переваг як у порівнянні з водою, так і в порівнянні з повітряно-механічною піною, за рахунок способу і технологічних параметрів її генерування. До останнього часу в Україні не проводили жодних розробок або досліджень, присвячених використанню компресійної піни.

Проведений нижче аналіз дозволяє впевнитись у перевагах компресійної піни у порівнянні з іншими вогнегасними засобами з точки зору ефективності гасіння пожеж.

1.4. Аналіз використання компресійної піни для гасіння пожеж

Компресійна піна (англійською – CAF – Compressed Air Foam) – однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, що отримана шляхом змішування води, піноутворювача та повітря, або азоту під тиском [96–97]. Також зустрічаються назви: «газонаповнена», «пневматична піна», «легка піна».

Технологія генерування компресійної піни вперше була застосована в 1932 році в Данії та використовувалася для гасіння пожеж на суднах. Вогнегасні властивості цього типу піни отримали позитивну оцінку, та в 1944 році вона була поставлена на озброєння у ВМС США. А в 70-х роках XX сторіччя системи для генерування і подавання компресійної піни застосовувалися для гасіння будинків у сільських районах штату Техас (США) за допомогою модульних систем пожежогасіння [98]. Найбільшого розвитку піна отримала в 90-ті роки XX сторіччя. У 1990 році її було вперше застосовано для захисту багатоповерхових будівель автоматичними системами пінного пожежогасіння. У 1996 році компанія «Ziegler» отримала контракт на розробку та виготовлення двох перших пожежних автомобілів, які реалізували технологію утворення компресійної піни. Після цього у Німеччині у 1997 році на державному рівні почали впроваджувати цю технологію для цілей пожежогасіння. На сьогодні пожежні автомобілі, які використовують компресійну піну для пожежогасіння, мають більшість провідних європейських країн. У США діє закон, згідно з яким у штатах, де місцева пожежна охорона використовує пожежні автомобілі з технологією CAFS, страхові внески жителів цього штату можуть бути зменшені [99].

Компресійна піна генерується у спеціальних системах – CAFS (з англійської – compressed air foam system). Основними складовими елементами системи CAFS є пожежний насос, компресор (або балони з повітрям) і система регулювання подавання піноутворювача [**3**,100,101]. Для отримання компресійної піни використовуються ті ж три складові (вода, піноутворювач і повітря), що й для генерування повітряно-механічної піни. Основною відмінністю системи CAFS є принцип змішування водного розчину піноутворювача, який у випадку створення компресійної піни відбувається не пасивно (ежекцією повітря струменем водного розчину піноутворювача), а активно – нагнітанням повітря у змішувальну камеру. На рис 1.1 наведено схему генерування компресійної піни. Після відкриття балона зі стисненим повітрям (1) повітря надходить в ємність із водою (2), а також в окремий картридж із піноутворювачем (3). Таким чином створюється постійний робочий тиск. (Також у деяких системах передбачено попереднє приготування водного розчину піноутворювача та зберігання його в одній ємності). Під час приведення в дію ручного пожежного ствола (4) вода, що знаходиться в ємності (2), витісняється в сифонну трубу (5), а піноутворювач з окремого картриджа (3) послідовно змішується з нею в камері змішувача (6). Потім зазначений водний розчин піноутворювача за рахунок примусового спінювання в камері з піногенеруючими вставками (7), за допомогою стисненого повітря з балона перетворюється в компресійну піну і подається через ручний ствол (4).

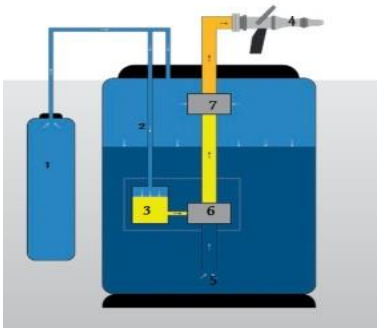


Рис. 1.1. Схема [94] утворення компресійної піни: 1 – балон зі стисненим повітрям; 2 – ємність із водою; 3 – картридж із піноутворювачем; 4 – пожежний ствол; 5 – сифонна трубка; 6 – камера змішувача; 7 – камера з піногенеруючими вставками

В результаті такого активного змішування компресійна піна, на відміну від повітряно-механічної, виходить більш однорідною.

Під час активного генрування піни одна краплина води перетворюється на велику кількість бульбашок піни, тим самим збільшується площа корисного контакту для теплообміну. Крім цього, компресійна піна за рахунок своєї однорідної структури затримується на поверхнях і сприяє тривалому поглинанню теплоти. В результаті цього більша частина води, що міститься в компресійній піні, випаровується, максимально охолоджуючи вогнище пожежі. За рахунок випаровування води перекривається доступ кисню до вогнища. Крім цього, компресійна піна, завдяки високій адгезії, утворює тонкий захисний шар між палаючою поверхнею і джерелом кисню. Він найкращим чином ізолює надходження кисню до вогнища пожежі. Завдяки високій кінетичній енергії компресійної піни і зниженню поверхневого натягу, завдяки використанню піноутворювача забезпечується глибоке проникнення води в пори і тріщини палаючої поверхні, що забезпечує змочування розташованих нижче шарів матеріалу.

Отримана за технологією CAFS компресійна піна (далі – КП) впливає забезпечує гасіння пожежі одночасно за трьома механізмами [94]:

– КП накриває горючу речовину, тим самим припиняючи доступ кисню;

– КП надійно тримається на похилих та вертикальних поверхнях, тим самим знижуючи їх температуру;

– непрозора КП захищає горючі матеріали від впливу теплового випромінювання полум’я.

Основною перевагою технології CAFS є унікальна можливість отримання піни різних типів, що відрізняються за вогнегасними властивостями, що, у свою чергу, надає широкі можливості вибору типу піни для гасіння пожеж у кожній конкретній ситуації [96–98]. Піна, отримана за технологією CAFS, налипає на стіни і стелі [96], припиняє горіння і перешкоджає повторному займанню.

За фізичними параметрами (кратністю) компресійна піна буває трьох видів [102]: «мокра (wet)» К = 1–5, яка застосовується найчастіше для гасіння пожеж назовні приміщень; «рідка (fluid)» К = 5–10, яка застосовується для гасіння пожеж у приміщеннях, і «суха, або жорстка (dry or stiff)» К = 10–20, яку можна застосовувати для захисту поверхонь від теплвового випромінювання (рис. 1.2).

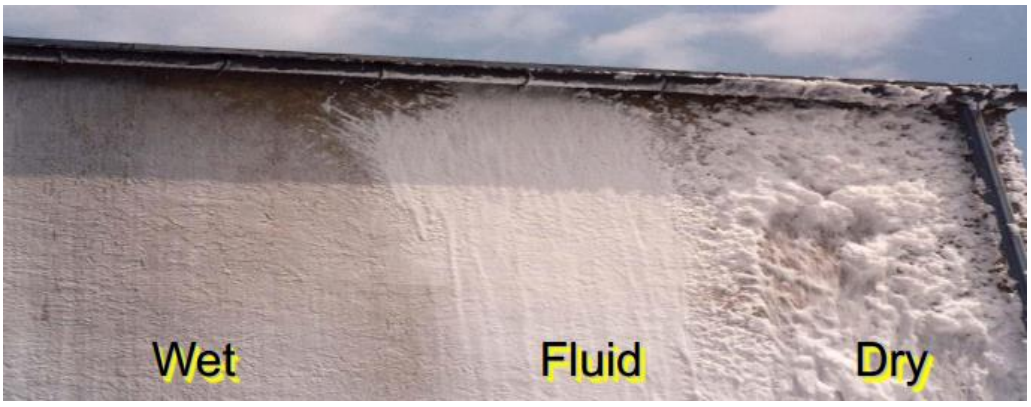


Рис 1.2. Види компресійної піни [103]

Зовні компресійна піна виглядає як легка однорідна коміркова маса білого кольору. Адгезія у КП тримається на поверхні предметів після

нанесення, в тому числі на вертикальних та гладких поверхнях. Проведені дослідження [104, 105] показали, що компресійна піна дозволяє ефективно створювати протипожежні бар'єри на шляху низових пожеж різної ширини.

Рядом авторів відзначено, що КП має наступні переваги у порівнянні з ПМП та водою [98, 100, 101]:

– утворення піни відбувається безпосередньо біля насосної установки;

– на відміну від звичайної вогнегасної піни, КП утворюється вже в технічному засобі пожежогасіння, що дає змогу зменшити витрати енергії на її доставку до місця пожежі; піну можна подавати на значні відстані, навіть по вертикалі (до 400 м по рукаву);

– КП є високоструктурованою, компактною та складається з великої кількості однорідних одиничних бульбашок. Відношення маси до поверхні є сприятливим для інтенсивної теплопередачі, що приводить до значного ефекту охолодження;

– оскільки КП утворюється за допомогою повітря під тиском, то використання енергії цього тиску достатньо для її доставки безпосередньо в осередок пожежі. При цьому не відбувається випаровування малих крапель на етапі доставки струменя в осередок пожежі, що підвищує коефіцієнт використання вогнегасної речовини;

– для подавання КП не потрібно спеціальних пристроїв, для цього можуть бути використані звичайні насоси, рукава та пожежні стволи;

– пожежні рукави, що заповнені компресійною піною, є значно легшими, отже, підвищується маневреність працюючого зі стволом;

– КП може мати підвищений вміст рідкої фази, що підвищує ефект охолодження, а також може мати місце дуже низький вміст рідкої фази, що робить її більш в'язкою та дозволяє використовувати її захисту вертикальних поверхонь від теплового випромінювання і запалювання;

– низький вміст рідкої фази знижує прямі збитки під час гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях та на горищах через відсутність затоплення поверхів, розташованих нижче;

– гасіння КП не потребує особливих навичок від особового складу;

– стиснене повітря, що використовується для генерування компресійної піни, може бути використане також для пневматичного аварійно-рятувального інструменту.

Разом з тим до недоліків такої піни можна віднести той факт, що у практичній діяльності було зафіксовано кілька випадків руйнування рукавів, що були наповнені компресійною піною, в умовах високої температури пожежі, через їх нагрівання та розширення повітря в піні [106]. Проте це питання ще потребує додаткового вивчення.

Технологія змішування повітря і розчину піноутворювача та складові камери змішування є ключовою точкою CAFS, ефект цього перемішування визначає вогнегасну ефективність піни.

Аналіз існуючих способів перемішування дозволив встановити, що ця технологія поділяється на два типи, відповідно до напрямку потоку повітря, що вводиться в розчин піноутворювача: вертикальне і коаксіальне перемішування [107–110]. Визначення, аналіз та відповідні пояснення вертикального і коаксіального перемішування наведені нижче.

CAFS у патентах США № 6357532 B1 і US 6276459 B1 [109, 110] передбачали використання Т–подібного пінозмішувача. Складники пінозмішувача зображено на рис. 1.3.

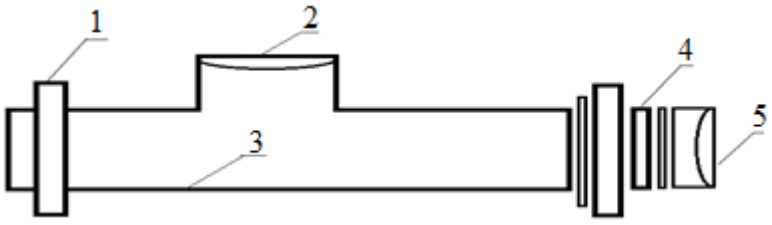


Рис. 1.3. Т–подібний пінозмішувач: 1 – з’єднувальний пристрій з ємністю води і піноутворювача; 2 – отвори для подавання повітря; 3 – змішувальний

трубопровід; 4 – сітчастий екран; 5 – з’єднувальний пристрій з рукавом

Структура Т–подібного пінозмішувача є дуже простою і легкою в обслуговуванні. Принципову схему перемішування розчину піноутворювача та повітря в пінозмішувачі такого типу зображена на рис. 1.4.

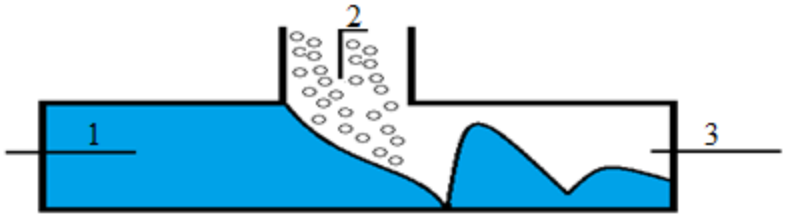


Рис. 1.4. Схема перемішування в пінозмішувачі Т–подібного типу: 1 – потік розчину піноутворювача; 2– потік повітря; 3 – вихід готової компресійної піни

Процес перемішування в Т–подібному пінозмішувачі поділяється на декілька варіантів. В першому випадку [108] подавання повітря передбачається одним потоком крізь отвір, в якому процес перемішування відносять до типу «Повітря зовні, рідина всередині» На рис. 1.5 зображено таку схему.

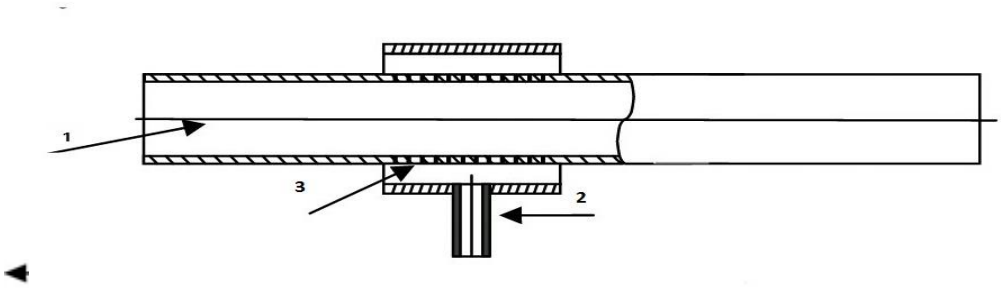


Рис. 1.5. Схема перемішування типу «Повітря зовні, рідина всередині»: 1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – отвори для входу повітря у трубопровід із розчином ПУ

Наступним варіантом [107, 108] Т–подібного змішування передбачається подавання стисненого повітря крізь отвір не одним потоком, як у першому випадку, а крізь маленькі отвори, тим самим забезпечується

збільшення кількості місць, де повітря контактує з розчином піноутворювача. Ця технологія вводу повітря дозволяє ретельно перемішувати повітря з рідиною, тим самим покращуючи ефект змішування. У цьому випадку повітря вводиться вертикально через трубопровід, який безпосередньо введений в основу пінозмішувача, де здійснюється змішування розчину. Трубопровід зі стисненим повітрям закупорений, на ньому зроблено кілька маленьких отворів. Схему процесу перемішування із введенням трубопроводу на центральній осі зображено на рис. 1.6. На рис. 1.7 зображено схему змішування, в якій трубопровід розміщено під кутом.

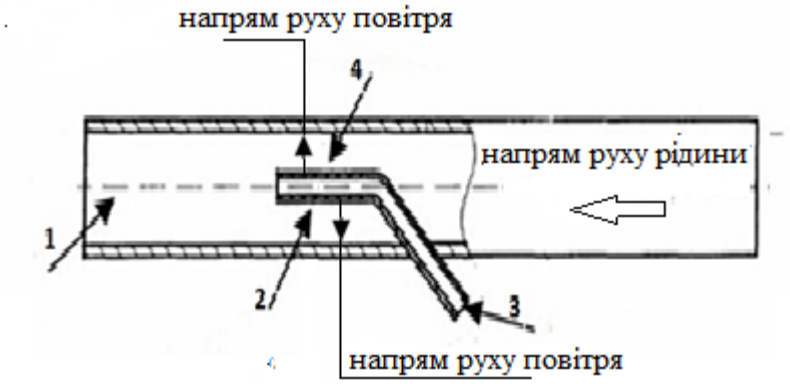


Рис. 1.6. Схема змішування на осі: 1 – трубопровід для розчину піноутворювача; 3 – трубопровід для стисненого повітря; 2, 4 – маленькі отвори для входу повітря у трубопровід із розчином ПУ

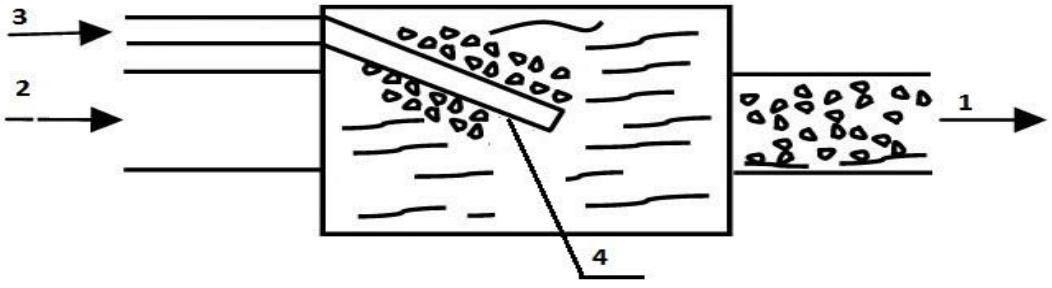


Рис. 1.7. Схема змішування під кутом: 1 – вихід готової піни; 2 – трубопровід для стисненого повітря; 3 – трубопровід для розчину піноутворювача; 4 – отвори для контакту повітря з розчином ПУ

Також поширений коаксіальний метод змішування [111–114], у якому відбувається турбулентне співвісне перемішування розчину піноутворювача і повітря. Варіанти виконання коаксіальної змішувальної камери показані на рис. 1.8 та 1.9. Подавання розчину піноутворювача здійснюється з тонкого трубопроводу, при цьому створюючи коаксіальний потік зі стисненим повітрям. Далі відбувається коаксіальне змішування.

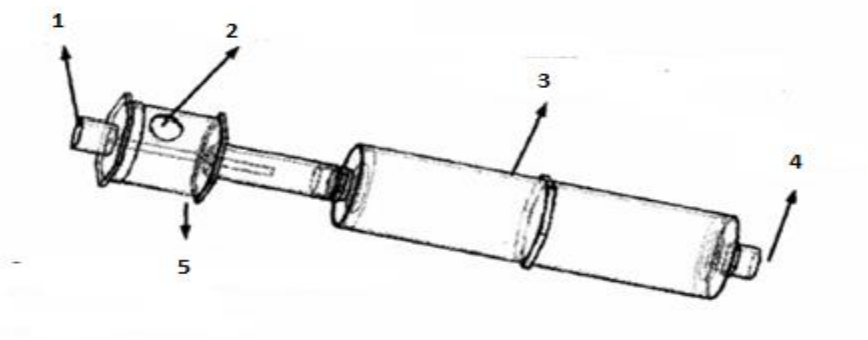


Рис. 1.8. Просте коаксіальне змішування: 1 – вхід для розчину ПУ; 2 – вхід для подаванн стисненого повітря; 3 – змішувальна частина; 4 – вихід готової піни; 5 – зовнішня будова коаксіальної камери

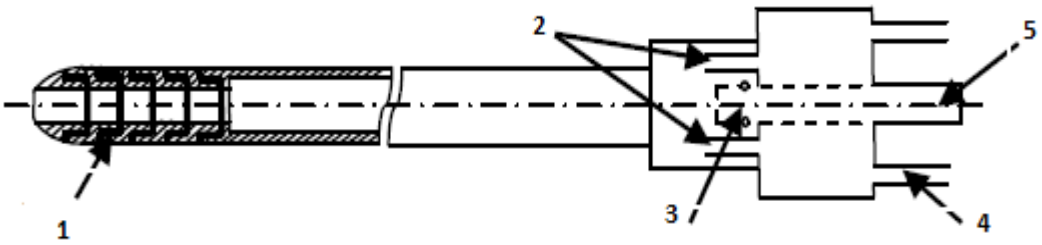


Рис. 1.9. Коаксіальне змішування через сітки: 1 – багатошарові сітки; 2 – форсунки для вприскування повітря; 3 – форсунки для вприскування розчину піноутворювача; 4 – вхід для подавання стисненого повітря; 5 – вхід для розчину піноутворювача

Наступним етапом є генерування піни, яке здійснюється під час проходження суміші повітря і розчину піноутворювача через пористі тіла або інші елементи, які розташовані у статичних змішувачах [**4**].

На рис. 1.10–1.13 наведено приклади статичних змішувачів з різними конструктивними особливостями, які можуть бути використані для генерування компресійної піни [115–117].

Рис. 1.10. Змішувач із гвинтовими елементами [116]

Рис. 1.11. Змішувач із нерегулярними насадковими елементами [118]

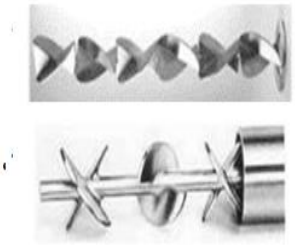


Рис. 1.12. Тип конструкцій з лезами [119]

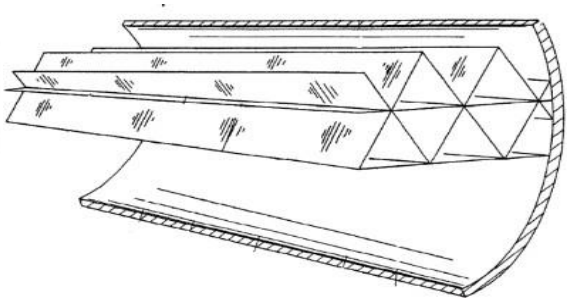


Рис. 1.13. Змішувач з елементами гофрованих пластин [120]

На рис. 1.14 наведено процес утворення піни за допомогою такого статичного змішувача.

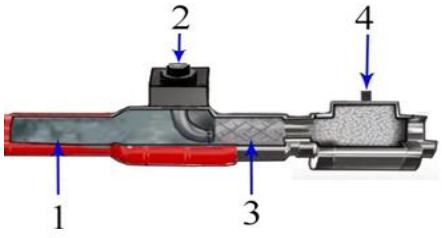


Рис. 1.14. Процес утворення піни за допомогою статичного змішувача: 1– розчин піноутворювача; 2 – отвір для подавання повітря; 3 – статичний змішувач; 4 – готова компресійна піна **[4]**

Застосування компресійної піни є відносно новим та маловивченим, способом пожежогасіння. Тому кількість наукових робіт, які присвячено цій тематиці менше, у порівнянні з кількістю праць, у яких досліджуються іншими методи пожежогасіння.

Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з вивченням вогнегасних пін, у тому числі й компресійних, було проведено такими вченими, як Ковалишин В.В. [121–123], Кодрик А.І. [124, 125], Боровиков В.О. [126–128], Тітенко О.М. [129, 130], Виноградов С.А. [131, 132], Colletti J.L. [98, 101, 106], Carey W.M. [133], Liebson J.L. [134], Грачулин А.В. [135], Федяєв В.Д. [136], Grampton G. [137], Dong Ho. [138], Wang X. [139].

Найбільшу кількість відомих досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин. У роботі [138] оцінювалася вогнегасна ефективність системи генерування і подавання компресійної піни за різних співвідношень кількості стисненого повітря і водного розчину піноутворювача для гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням плівкоутворювального піноутворювача (AFFF) з концентрацією робочго розчина 3 %. Експериментально визначено, що співвідношення 1:7 за однакових умов є найбільш ефективним. У дослідженні [137] порівнювали ефективність гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням піноутворювачів класу А (змочувальників) і AFFF (плівкоутворювальний). Застосовувалися системи генерування і подавання компресійної та повітряно-механічної піни. Концентрація піноутворювачів класу А у розчині з водою складала 0,6 %, а AFFF – 1,5 %, 2 %, 3 %. Дослідження показали, що тривалість гасіння модельного вогнища пожежі із застосуванням CAFS у 1,7–2,4 рази менша за тривалість гасіння повітряно-механічною піною. У роботі [140] вивчено вплив типу пінних бульбашок КП на тривалість гасіння пожежі. Як джерело запалювання використовували бензин. Концентрація піноутворювача змінювалася від 0,4 % до 1 %, витрата розчину піноутворювача – від 0,35 м^3/год. до 1,7 м^3/год., а витрата стисненого

повітря – від 2,2 г/с до 2,7 г/с. Виділено три типи пінних бульбашок: мокрі, середні та сухі. При цьому менша тривалість гасіння спостерігалася у випадку застосування “сухої” піни.

В роботі [141] дослідники визначили, що втрати тиску в рукавній лінії у разі подавання піни на висоту залежать від кратності піни і тиску в рукавній лінії, що було підтверджено дослідженням [142], яке показало, що за кратності піни 8,5 втрати тиску складають 0,05 МПа на кожні 10 м висоти, за висоти підйому піни до 250 м і тиску на насосі в 1,23 МПа. Таким чином, у порівнянні з повітряно-механічною піною втрати тиску в рукаві зменшуються удвічі. У роботі [143] авторами проведено дослідження з вивченню формування піни під час пропусканя водного розчину піноутворювача через пористе тіло. Було відзначено, що зі збільшенням швидкості потоку зменшується діаметр пінної бульбашки. Встановлено, що розміри пор відіграють велику роль у формування розміру бульбашки. Промодельовано залежності розмірів діаметрів бульбашки від конструкційного виконання пористого тіла.

Щодо застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин можна вказати, що в роботі [135] проведено порівняння ефективності гасіння таких пожеж компресійною та повітряно-механічною піною низької кратності. Результати показали, що на гасіння вогнища пожежі компресійною піною необхідно удвічі менше води та удвічі менше часу. Але у роботі поза увагою залишилося вивчення впливу кратності у компресійній піні на її вогнегасну ефективність. У роботі [139] досліджувався вплив концентрації піноутворювача на ефективність гасіння модельних вогнищ пожеж твердих та рідких горючих речовин компресійною піною, де концентрації змінювалися від 1,2 % до 12 %. Випробування показали, що зниження концентрації піноутворювача з 12 % до 2,2 % зменшувало тривалість гасіння більш ніж у 2 рази. У разі подальшого зниження концентрації піна втрачала свої вогнегасні властивості й тривалість гасіння зростала.

Серед провідних світових виробників засобів протипожежного призначення системи компресійної піни CAFS набули значного поширення **[1–2].**

Можна виділити три основних напрями застосування CAFS:

– стаціонарні автоматичні системи пожежогасіння;

– пересувні системи пожежогасіння;

– системи, вбудовані в пожежні автомобілі.

Розглянемо основних виробників систем компресійної піни.

Однією з найбільш відомих виробників систем CAFS є німецька фірма «One seven» [144, 145], яка володіє патентом на цю технологію та виготовляє стаціонарні та мобільні системи пожежогасіння, та австрійська фірма «Rosenbauer Osterriech Gmbh», яка в 2000 році створила перший промисловий зразок системи CAFS (рис. 1.15), одночасно з сучасним зразком пересувної системи пожежогасіння ONE SEVEN.

Окрім наведеної продукції, фірма виробляє обладнання для системи CAFS POLY BIKE SL35–50 – для установки на мотоциклах, POLY SKID MODUL SL50–100 – для універсального використання, POLY EPH SL50 – на рукавній котушці, POLY ATV SL100 – на автомобілі підвищеної прохідності.

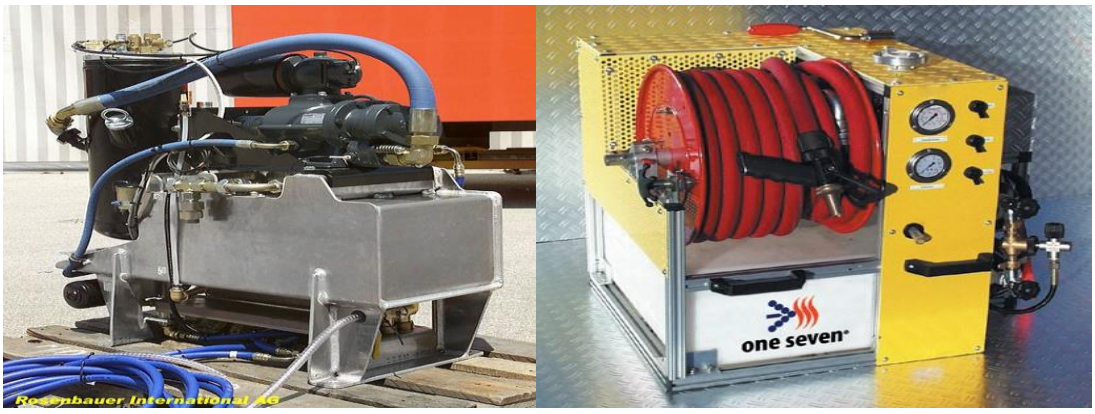


Рис. 1.15. Система CAFS, 2000 р., та сучасна мобільна система ONE SEVEN

На цей час фірма випускає пожежні автомобілі, пінозмішувачі, переносні та стаціонарні системи пожежогасіння з використанням системи

CAFS: переносний ранцевий вогнегасник з компресійною піною POLY PORTEX SL10; пересувний вогнегасник з компресійною піною POLY TROLLEY SL35–50; пересувний вогнегасник з компресійною піною, виконаний на транспортній рамі POLY MOBILE SL50; система пожежогасіння спеціальними розчинами POLY EXTINGUISHING SYSTEM. На рис 1.16 наведено один із зразків продукції фірми.

Рис. 1.16. Переносний ранцевий вогнегасник з компресійною піною POLY PORTEX SL10

Системи «One seven» генерують компресійну піну із вмістом піноутворювача в розчині у діапазоні від 0,3 % до 1 %. У цьому разі відношення об’єму розчину піноутворювача до об’єму повітря у готовій піні складає 1:7, що й набуло відображення у назві технології. На рис. 1.17 наведено зображення стаціонарної системи пожежогасіння «One seven» [144].

Рис. 1.17. Загальний вигляд стаціонарної системи пожежогасіння «One seven»

Окрім наведеної вище системи, компанія «One seven» виготовляє також такі системи пожежогасіння [145]:

– Stored–Energy–Systeme – замкнена система із запасом води, піноутворювача та повітря – дозволяє працювати до 10 хвилин під час гасіння пожежі;

– Maxi–Xtinguisher – мала стаціонарна система із заздалегідь підготовленим водним розчином піноутворювача, що знаходиться під тиском – має дуже малу тривалість приведення в дію;

– Wandhydranten WXS – стаціонарна настінна система пожежогасіння, що може бути використана як альтернатива звичайним пожежним кран-комплектом; має рукав довжиною до 60 м та дальність подавання струменя піни до 15 м, протягом 20 хв.

Фірма «Rosenbauer» має запатентовану технологію CAFS [146]. Перелік продукції наведено нижче:

– CONTI & FLASH CAFS 400–2400 – система для пожежних автомобілів, дозволяє отримувати компресійну піну із кратністю від 4 до 15 та витратою готової піни від 1600 до 9600 л/хв., залежно від продуктивності насоса та кратності піни;

– SKY CAFS – система для протипожежного захисту висотних будівель подаванням компресійної піни на висоту до 400 м, що досягається за рахунок малої питомої ваги піни;

– FLASH CAFS AR 30–400 – високопродуктивна потужна система генеруванн і подавання компресійної піни для аеродромних автомобілів; дозволяє отримати до 64000 л/хв. піни кратністю 8. Повітря у камеру змішування надходить із повітряних балонів;

– CAFS MOBILE – мобільна система генерування і подавання компресійної піни, дозволяє отримувати піну кратністю від 4 до 20 включенням її в рукавну лінію, що йде від відцентрового насоса (рис. 1.18). Дозволяє отримувати від 400 до 1600 л/хв. готової піни введенням у потік

водного розчину піноутворювача повітря у визначеній кількості, що надходить із підготовлених повітряних балонів.

Рис. 1.18. CAFS MOBILE

Американська компанія «Waterous» має запатентовану технологію пінозмішування ONE STEP CAFSystem [147]. Вона використовує автономну, запатентовану систему регулювання тиску, яка тримає постійний тиск змішування в камері змішувача системи. Перелік продукції:

– Eclipse CAFSystem – безмоторна система пожежогасіння в комплексі з насосом та компресором, що дозволяє отримати до 9000 л/хв. піни, в залежності від моделі, за тиску 15 бар [147];

– автомобільний насос із вбудованою системою КП CAFSystem ONE STEP 150 – OS (рис. 1.19), дозволяє отримувати суху або мокру піну із вмістом піноутворювача в розчині з водою у кількості 0,1–1,3 % та 6 % в залежності від потреб. Повітря нагнітається від вбудованого компресора продуктивністю до 4,25 м^3/хв., за тиску 8,6 бар;

Рис. 1.19. CAFSystem ONE STEP 150– OS

– модулі пожежогасіння 70–35–GP, 100–50–DS, 200–100–DS, 100–50–OS, 200–100–OS (рис. 1.20), що включають у себе насос із приводним двигуном, компресор та систему дозування піноутворювача. Вони працюють у широкому діапазоні значень витрати піни (до 800 л/хв.) та з максимальним напором 35, 50 та 100 м. вод. ст., в залежності від моделі [147].

Рис. 1.20. Waterous 200–100–OS

Французький виробник протипожежної техніки «Gimaex», яку компанія «One seven» оснащує автомобільними модулями пожежогасіння, виготовляє лінійку пожежних автомобілів із вбудованими системами генерування і подавання компресійної піни (рис. 1.21), автоцистерни, аеродромні автомобілі, лісові пожежні автомобілі, автомобілі для промислових підприємств [148].

Рис. 1.21. Пожежний автомобіль GPlus «HLF 20 OS»

Американська компанія «Hale Products Inc» встановлює на свої пожежні автомобілі системи CAFS90/CAFS200 з технологією дозування піноутворювача Hale Foam Master [149]. Система працює з пожежними насосами, що дозволяють отримати напір водяного струменя до 10 бар з можливістю генерування “мокрої” або “сухої” піни.

У Російській Федерації з 2012 року компанією «СпецАвтоТехника» розроблено та впроваджено у виробництво систему гасіння пожеж компресійною піною «NATISK» [150]. Основними перевагами запропонованої системи виробники називають скорочення тривалості гасіння у 5–7 разів та зниження витрати води у 5–15 разів за рахунок скорочення тривалості роботи ствола. Кратність готової піни – 5–15. Повітря нагнітається від балонів під тиском. Із систем NATISK слід виділити мобільні системи пожежогасіння «NATISK–50M BL» (рис. 1.22, а), «NATISK–100M BL» та «NATISK–300M BL» (рис. 1.22, б) [150].

а) б)

Рис. 1.22. Мобільні установки пожежогасіння «NATISK»

Також «СпецАвтоТехника» виготовляє пожежні автомобілі, що реалізують систему NATISK [150]. Це пожежні автоцистерни та автомобілі першої допомоги, які можуть бути виготовлені на базі автомобілів Урал, КамАЗ, ГАЗ, УАЗ, SILANT (рис. 1.23).

Рис. 1.23. АПП–0,6–2,0 NATISK(2868 SILANT)

Санкт-Петербурзькою фірмою «Сталт» розроблено та впроваджено технологію компресійної піни STALT–fireflex (рис. 1.24), що реалізована в системах автоматичного пожежогасіння [151]. У цих системах використовується 2%-й розчин піноутворювача, кратність готової піни – 10.

Рис. 1.24. Автоматична система пожежогасіння STALT–fireflex

Серед відомих виробників систем пожежогасіння, що реалізують технологію генерування і подавання компресійної піни, слід виділити «WellCrown International Resources Ltd» (Гонконг), «KSSIELER Feuerwehr und Rettungssysteme» (Німеччина), «Firematic Supply Co.» (США), «W.S. Darley», «СпецАвтоТехника» (Росія) та інші. У США, Німеччині, Італії, Японії, Китаї, Франції, практично в кожній пожежній частині є щонайменше один пожежний автомобіль, оснащений системою пожежогасіння, що передбачає генерування і подавання компресійної піни.

В табл. 1.2 наведено порівняльну характеристику продукції виробників систем генерування і подавання компресійної піни.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика продукції виробників систем для генерування і подавання компресійної піни

Виробник	Технологія	Концентрація водного розчину ПУ, %	Кратність піни
One seven	One seven	0,1–6,0	4–20
Rosenbauer	CAFS	0,3–0,6	7–20
Waterous	One Step	0,1–1, 3, 6	«Wet» або «dry»
Hale	CAFS S90 / CAFS 200	0,1–9,9	3–20
Сталт	STALT–fireflex	2–6	10
СпецАвто Техника	NATISK	1	5–20

Як зрозуміло з табл. 1.2, кожен з виробників пропонує різну кратність піни та вміст піноутворювача. Відсутні рекомендації, щодо використання визначеної кратності та концентрації піноутворювача для гасіння пожеж твердих горючих речовин. Також незрозуміло, чи саме зумовлено вказані діапазони концентрації водних розчинів піноутворювачів і кратності генерованої піни: маркою піноутворювача, класом пожежі, видами горючих матеріалів чи іншими міркуваннями.

Проведений огляд дозволив визначити мету і задачі дослідження, які наведено у Вступі.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

2.1. Розробка математичної моделі процесу генерування і подавання компресійної піни

Загальна тенденція при проектуванні різноманітних конструкцій, особливо складних, побудованих на внутрішній взаємодії окремих структурних одиниць, – є розробка математичної моделі (ММ), що передує конструктивним рішенням та часто є розрахунковою основою для них. Досить часто такою ММ є багатовимірна система рівнянь алгебраїчних, диференційних, яку можна вирішувати, як правило, тільки чисельними методами. Сучасні програмні продукти, такі як графічне середовище імітаційного моделювання Simulink (інтегроване у програмне середовище MatLab), що дозволяє за допомогою окремих блоків у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, є досить зручним інструментом для вирішення таких проблем у випадку описання стаціонарних та перехідних процесів при проектуванні конструкцій. Структура такої моделі побудована на основі окремих, самостійних блоків, що самі по собі є окремими ММ. Кількість таких блоків може змінюватися, самі блоки можуть модернізуватись, вдосконалюватися.

Схема фізичних процесів [**5**], що мають місце в системі генерування і подавання компресійної піни, представлена на рис. 2.1 **[5]**. Водной розчин піноутворювача (заданої концентрації) знаходиться в ємності 1, тиск p_{comp} робочого газу (повітря), що є енергетичним джерелом роботи установки, подається до отвору 2. Необхідна кількість повітря та водного розчину піноутворювача регулюються відповідно дроселями: газовим 3, що має регульовану площу вихідного перерізу F_{air}, та витратою газу G_{air}, та рідинним

4, що має регульовану площу вихідного перерізу F_w, та витратою суміші (водной розчин піноутворювача) G_w. Далі повітря змішується з водним розчином піноутворювача в камері змішування 5 під тиском p_{mix}, маючи витрату G_{mix}, та проходить через вставку 6, де відбувається генерування КП, що надходить у передкамеру 8, яка має площу перерізу F_{ex} вихідного сопла та знаходиться під тиском p_{ex}. Готова піна виходить крізь сопло 7, що має площу вихідного перерізу F_{atm}.

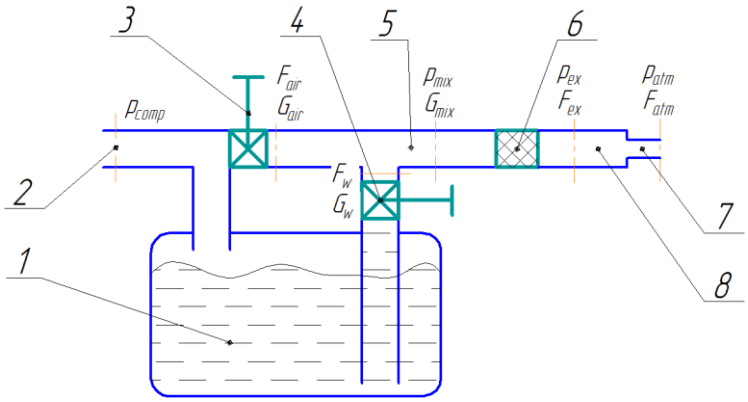


Рис. 2.1. Фізична модель системи генеруваня і подаваня та подачі КП: 1 – ємність з водним розчином піноутворювача; 2 – вхід для високого тиску; 3 – дросель газовий; 4 – дросель рідинний; 5 – камера змішування; 6 – піногенеруюча вставка; 7 – вихідне сопло; 8 – передкамера

ММ процесу генерування КП створено таким чином, що вона є об’єднанням окремих блоків, кожний з яких являє собою автономну ММ зі своїми входом та виходом, за допомогою яких здійснюється взаємодія між блоками у процесі виконання загальної задачі ММ.

Ці окремі блоки можна змінювати відповідно до змін конструкції системи, залишаючи сталою тільки зовнішню оболонку (кількість входів, виходів, розмірність) окремого блока. В математичному сенсі ця ММ є еволюційною системою диференційно-алгебраїчних рівнянь, що виконує задачу опису перехідного процесу (для певних заданих параметрів) у разі подавання тиску на вхідний отвір 2 системи.

Блок-схема ММ процесу генерації КП включає в себе **[7]** п’ять створених спеціальних блоків: Блок подачі газу («Air»), Блок подачі суміші води з піноутворювачем («Liquid»), Блок піногенеруючої вставки («Generator»), Блок руху піни у шлангу («Pipe»), Блок руху піни у каналі пістолета-розпилювача («Pistol») та систему комунікацій між блоками.

2.1.1. Блок подачі газу (згідно Блок-схеми ММ: «Air»)

Блок подачі газу розраховує параметри потоку газу на основі прийнятих даних про тиск на вході та на виході й установлених для нього параметрів.

Вхідними даними є:

– p_{comp} – тиск на вході 2 в систему, Па;
– p_{mix} – тиск у камері змішування 5, Па;
– d_{a} – критичний діаметр газового сопла, м;
– T – температура навколишнього середовища, К.

Вихідними даними є:

– G_{a} – потік газу (масової витрати) через отвір сопла подачі газу, кг/с.

Для розрахунку параметрів потоку газу на основі прийнятих даних про тиск на вході та на виході й установлених для нього параметрів використаний метод гідродинамічних функцій (гл. 5, [152]). Згідно формул 127 та 128 [152] отримано величину приведеної швидкості:

$$\lambda = \sqrt{\left(1 - \frac{p_{\text{mix}}}{p_{\text{comp}}}\right)^{\frac{k-1}{k}} \cdot \frac{k+1}{k-1}}, \qquad (2.1)$$

де p_{comp} – тиск, що діє на вході 2 в системі, Па; p_{mix} – тиск, що діє у змішувальній камері 5, Па; k – показник адіабати для робочого газу.

Тоді потік газу (масова витрата) через сопло, що утворюється при дроселюванні, обчислюється на основі формули 107 та 109, с. 237 [152] за такою формулою:

$$G_a = \frac{\pi \cdot d_{air}{}^2 \cdot m_{const} \cdot p_{comp} \cdot \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}}{4 \cdot \sqrt{T}}, \text{ кг/с, (2.2)}$$

де λ – приведена швидкість газу згідно з формулою (2.1); T – температура гальмування газу, К; m_{const} – характерна стала для газу, що обчислюється за формулою (згідно з формулою 109, розділ. 5, [152]):

$$m_{const} = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{air}}}, \text{ м}^{-1}\cdot\text{с}\cdot\text{К}^{0,5}, \quad (2.3)$$

де R_{air} – універсальна газова стала для газу, Дж/(кг·К).

Отримано алгоритм обчислення потоку газу G_a **[6]** (масової витрати) від наступних параметрів:

- p_{comp} – тиск на вході в систему, Па;
- p_{mix} – тиск у камері змішування, Па;
- d_a – критичний діаметр газового сопла, м;
- T – температура навколишнього середовища, К;
- R_{air} – універсальна газова стала для газу, Дж/(кг·К).
- k – показник адіабати для робочого газу.

2.1.2. Блок подачі суміші води та піноутворювача (згідно Блок-схеми ММ: «Liquid»)

Блок подачі суміші води та піноутворювача вирішує подібну задачу, як і блок подачі газу, але для рідинної фази на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході й установлених для нього параметрів.

Вхідними даними є:

– p_{comp} – тиск в ємності суміші 1, Па;

– p_{mix} – тиск у камері змішування 5, Па;

– d_w – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.

Вихідними даними є:

– G_w – потік суміші (масова витрата) крізь отвір сопла подачі, кг/с.

Виходячи з рівності потенційної енергії тиску в ємності суміші 1 та кінетичної енергії струменя води, що виходить з рідинного дроселя 4, використавши ф-лу 59, с. 28 [152] – рівняння Бернуллі для ідеальної нестисливої рідини, отримаємо **[6]** величину швидкості v_w цього струменя:

$$v_w = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_{comp} - p_{mix})}{\rho_w}}, \text{ м/с,} \tag{2.4}$$

де ρ_w – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м^3.

Тоді потік суміші води з піноутворювачем можна обчислити за формулою:

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot d_w^{\,2}, \text{ кг/с.} \tag{2.5}$$

Отримано алгоритм обчислення потоку суміші води з піноутворювачем, що реалізує роботу блока подачі суміші води та піноутворювача G_w **[6]** від наступних параметрів:

– p_{comp} – тиск в ємності суміші 1, Па;

– p_{mix} – тиск у камері змішування 5, Па;

– d_w – діаметр отвору сопла подачі суміші, м.

– ρ_w – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м^3.

2.1.3. Блок руху піни у шлангу (згідно Блок-схеми ММ: «Pipe»)

Блок руху піни у шлангу вирішує задачу розрахунку параметрів потоку вже згенерованої піни через рукав на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході цього блоку і установлених параметрів цього блоку.

Вхідними даними блоку математичної моделі руху газорідинної суміші у шлангу («Pipe») є:

– p_2 – тиск на вході шланга, Па;

– p_1 – тиск на виході шланга, Па;

– D – внутрішній діаметр шланга, м;

– L – довжина шланга, м.

Вихідними даними є:

– Q_w – потік рідинної фази газорідинного потоку (об'ємної витрати), м^3/с.

– Q_a – потік газової фази газорідинного потоку (об'ємної витрати), м^3/с.

Зроблено припущення, виходячи з фізики процесів, при якому піногенеруюча вставка розглядається як осесиметричне пористе тіло з одновимірною течією газорідинного потоку. Простішою моделлю газорідинного потоку, згідно зі с. 141 [153], є квазігомогенна модель, що введена Г. Лоренцем. Тоді, згідно з формулою (6–4) [153], величина падіння тиску по довжині каналу піногенеруючої вставки для газорідинної суміш дорівнюватиме:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{2 \cdot D} \cdot \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w}\right) \cdot \frac{\omega''}{\omega'}\right), \quad \text{Па/м}, \tag{2.6}$$

де ψ – приведений коефіцієнт опору для прийнятих режимів руху газорідинної суміші, її газовмісту та іншими конструктивними особливостями, що уточняються експериментальним шляхом;

$\lambda(p)$ – коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку в нашому випадку рідинної фази, що рухається із приведеною швидкістю рідинної фази;

ρ_w – густина рідинної фази, кг/м^3;

D – внутрішній діаметр шланга, м;

$\rho_{air}(p)$ – густина газової фази, що знаходиться під тиском p, кг/м^3;

ω' – приведена швидкість рідинної фази, м/с;

ω'' – приведена швидкість газової фази, м/с.

На основі визначення поняття кратності (1.1) отримаємо величину Q_{a_NC} - об'ємної витрати повітря:

$$Q_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w, \quad \text{м}^3/\text{с}, \tag{2.7}$$

де Q_{a_NC} - об'ємна витрата повітря, м^3/с;

Q_w – об'ємна витрата суміші води з піноутворювачем, м^3/с.

$Q_a(p)$ – процес об'ємної витрати повітря, яке знаходиться в умовах тиску p; вважаємо **[6]** ізотермічним термодинамічним процесом, тому формула буде мати вигляд:

$$Q_a(p) = Q_{a_NC} \cdot \frac{p_{NC}}{p}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \tag{2.8}$$

де $Q_a(p)$ – об'ємна витрата газової фази, м^3/с;

p_{NC} – атмосферний тиск, Па;

p – тиск, під яким знаходиться піна у розрахунковий момент часу, Па.

Об'ємний потік газорідинної суміші, що знаходиться в умовах тиску p, обчислюємо [**6]** за формулою:

$$Q_f(p) = Q_a(p) + Q_w, \qquad \text{м}^3/\text{с}. \tag{2.9}$$

Масова витрата газу, з урахуванням формули (2.7), визначається **[6]** за формулою:

$$G_a = Q_{a_NC} \cdot \rho_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \rho_{a_NC}, \quad \text{кг/с}, \tag{2.10}$$

де ρ_{air_NC} – густина повітря, кг/м^3.

Знаходимо **[6]** формулу густини газової фази, яка знаходиться в умовах тиску, підставивши значення величин згідно з формулами (2.7), (2.8), (2.10), та зробивши алгебраїчні спрощення:

$$\rho_{air}(p) = \frac{G_a}{Q_a(p)} = \frac{(k_m - 1) \cdot Q_W \cdot \rho_W \cdot \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}}{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{p_{NC}}{p}} = \frac{\rho_{a_NC}}{p_{NC}} \cdot p, \quad \text{кг/м}^3. \tag{2.11}$$

Величини приведених швидкостей рідинної ω' та газової фази ω'' згідно формули (1–23), [153]:

$$\omega' = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2}, \ \omega'' = \frac{4 \cdot Q_a(p)}{\pi \cdot D^2}, \qquad \text{м/с}. \tag{2.12}$$

Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda(p)$, що входить до формули (2.8), згідно з методикою с. 143 [153], треба знайти витратну швидкість двофазного потоку (формула (1–27), [153]):

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w} \cdot \omega'', \qquad \text{м/с}. \tag{2.13}$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda(p)$ обчислюється як коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку у випадку рідинної фази, для чого необхідно знайти число Рейнольдса для рідинної фази як функцію тиску:

$$\mathrm{Re}(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{\mathrm{equ}} \cdot \rho_{\mathrm{w}}}{\mu_w}, \tag{2.14}$$

де μ_w – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

Підставивши числові значення змінних та значення функції при типових режимах потоку, отримаємо **[6]**, що число Re < 4000. Цей режим течії, згідно з формулою (2–3) [154], відповідає закону Гагена-Пуазейля; при цьому коефіцієнт гідродинамічного опору цієї течії обчислюється за формулою:

$$\lambda(p) = \frac{64}{\mathrm{Re}(p)}. \tag{2.15}$$

Підставивши у формулу (2.6) значення $\lambda(p)$ – згідно з формулою (2.15), $\rho_{air}(p)$ – згідно з формулою (2.11), ω', ω'' – згідно з формулою (2.12), виконавши спрощення та перетворення, отримаємо **[6]**:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\psi \cdot \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu_{\mathrm{w}} \cdot \rho_{\mathrm{w}}}{D^4}}{(\rho_{\mathrm{w}} + (k_{\mathrm{m}} - 1) \cdot \rho_{\mathrm{a_NC}})^2} \cdot Q_{\mathrm{w}} \cdot$$

$$\cdot (\rho_w + \rho_{\mathrm{a_NC}} + \frac{p_{\mathrm{NC}}{}^2 \cdot \rho_{\mathrm{w}} \cdot (k_{\mathrm{m}} - 1)^2}{p^2} + \quad , \qquad \text{Па/м.} \tag{2.16}$$

$$+ \frac{p_{\mathrm{NC}} \cdot (k_{\mathrm{m}} - 1) \cdot (2 \cdot \rho_{\mathrm{w}} - \rho_{\mathrm{a_NC}} \cdot (k_{\mathrm{m}} - 1))}{p})$$

Вирішуючи це рівняння методом розділення змінних та для зменшення громіздкості виразу, вводячи проміжні змінні *a, b, c, d*, отримаємо **[6]** величину об'ємної витрати рідинної фази Q_w в залежності від вхідного p_2 та вихідного p_1 тиску:

$$
\begin{aligned}
&a = \frac{\psi \cdot \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu_w \cdot \rho_w}{D^4}}{(\rho_w + (k_m - 1) \cdot \rho_{a_NC})^2}, \\
&b = \rho_w + \rho_{a_NC}, c = p_{NC}{}^2 \cdot \rho_w \cdot (k_m - 1)^2, \\
&d = p_{NC} \cdot (k_m - 1) \cdot (2 \cdot \rho_w - \rho_{a_NC} \cdot (k_m - 1)), \quad \text{м}^3/\text{с}. \\
&Q_w = \frac{\frac{1}{a} \cdot \int_{p^1}^{p^2} \frac{1}{(b + \frac{c}{p^2} + \frac{d}{p})} dp}{L}
\end{aligned}
\tag{2.17}
$$

Обчисливши інтеграл у цій формулі та зробивши алгебраїчні перетворення, отримаємо **[6]** величину об'ємної витрати рідинної фази Q_w в залежності від вхідного p_2 та вихідного p_1 тиску в аналітичному вигляді:

$$
\begin{aligned}
Q_w = &\frac{p_2 - p_1}{a \cdot b \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot (d \cdot \ln(\frac{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c}{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}) + \\
&+ \frac{(2 \cdot b \cdot c - d^2) \cdot (p_1 - p_2)}{\sqrt{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c} \cdot \sqrt{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}})
\end{aligned}
\quad , \text{м}^3/\text{с}. \tag{2.18}
$$

де проміжні змінні *a, b, c, d* обчислюються згідно (2.17).

Для обчислення об'ємної витрати газової фази, скориставшись рівнянням (2.7), отримаємо **[6]:**

$$Q_{a_NC} = \frac{k_m - 1}{a \cdot b \cdot c} \cdot (p_2 - p_1) + \frac{k_m - 1}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot (d \cdot \ln(\frac{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c}{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}) + \\ + \frac{(k_m - 1) \cdot (2 \cdot b \cdot c - d^2) \cdot (p_1 - p_2)}{\sqrt{b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c} \cdot \sqrt{b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c}}) \quad , \text{м}^3/\text{с}. \qquad (2.19)$$

Отримано **[6]** алгоритм обчислення об'ємних витрат газової Q_{a_NC} та рідинної фази Q_w газорідинної суміші, що моделює роботу блоку руху піни у шлангу («Pipe») від наступних параметрів:

– p_2 – тиск на вході шланга, Па;
– p_1 – тиск на виході шланга, Па;
– D – внутрішній діаметр шланга, м;
– L – довжина шланга, м;
– k_m – кратність піни;
– μ_w – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

2.1.4. Блок піногенератора (згідно Блок-схеми ММ: «Generator»)

Блок піногенератора обчислює параметри потоку газорідинної суміші та кратність піни, що утворюється на основі прийнятих даних про тиск на вході та виході цього блоку Q установлених параметрів цього блоку.

Вхідними даними блоку піногенератора, де реалізується математична модель проходження газорідинної суміші («Generator») через піногенератор, є:

– p_2 – тиск на вході піногенеруючої вставки, Па;
– p_1 – тиск на виході піногенеруючої вставки, Па;
– ε – порозність пористого тіла;
– D – діаметр піногенеруючої вставки, м;
– L – довжина піногенеруючої вставки, м;
– h_s – товщина піногенеруючих елементів, м;
– b_s – ширина піногенеруючих елементів, м;

Вихідними даними є:

– потік рідинної фази газорідинного потоку Q_w (об’ємна витрата) у передкамеру 8, м^3/с;

– потік газової фази газорідинного потоку Q_a (об’ємна витрата) у передкамеру 8, м^3/с.

Зроблено **[7]** припущення, виходячи з фізики процесів, згідно з яким піногенеруюча вставка розглядається як осесиметричне пористе тіло з одновимірною течією газорідинного потоку. Моделлю газорідинного потоку, згідно зі с. 141 [153], є квазігомогенна модель, що введена Г. Лоренцем. Тоді, згідно з формулою (6–4) [153], величина падіння тиску по довжині каналу піногенеруючої вставки для газорідинної суміші:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \cdot \lambda(p) \cdot \rho_w \cdot \frac{\omega'^2}{d_{equ}} \cdot (1 + (1 - \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w}) \cdot \frac{\omega''}{\omega'}), \quad \text{Па/м}, \qquad (2.20)$$

де ψ – приведений коефіцієнт опору для прийнятих режимів газовмісту, що уточняються експериментальним шляхом;

$\lambda(p)$ – коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку, в нашому випадку рідинної фази, що рухається із приведеною швидкістю рідинної фази;

ρ_w – густина рідинної фази, кг/м^3;

d_{equ} – еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки, м;

$\rho_{air}(p)$ – густина газової фази, що знаходиться під тиском p, кг/м^3;

ω' – приведена швидкість рідинної фази, м/с;

ω'' – приведена швидкість газової фази, м/с;

При визначенні $Q_a(p)$ – об’ємної витрати повітря, яке знаходиться в умовах тиску p, важливо зауважити **[7],** що під час проходження потоку через цей блок має місце дуже активне перемішування та контактування обох фаз, що формують газорідинну суміш. Внаслідок більш значної масової витрати води (за типових значень кратності) встигає відбутися обмін тепла між

окремими фазами, тому зазначений процес вважаємо **[7]** ізотермічним термодинамічним процесом, тому значення цієї величини будемо обчислювати за формулою (2.8).

Для обчислення об'ємного потоку газорідинної суміші Q_f, що знаходиться в умовах тиску p, скористаємося **[7]** формулою (2.9).

Для обчислення масової витрати газу скористаємося **[7]** формулою (2.10).

Знаходимо **[7]** формулу густини газової фази, яка знаходиться в умовах тиску, згідно з формулою (2.11).

Оскільки піногенеруюча вставка має пористу структуру, то для опису фізичних процесів, що мають місце в пористій структурі, згідно з методикою с. 176 [155], необхідно знайти:

- фіктивну швидкість газорідинного потоку;
- дійсну швидкість газорідинного потоку;
- порозність піногенеруючої вставки;
- сумарну площу поверхні елементів піногенеруючої вставки;
- питому поверхню елементів піногенеруючої вставки;
- еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки.

Величини фіктивних приведених швидкостей рідинної ω'_{im} та газової фаз ω''_{im}, віднесених до всієї площі поперекового перерізу піногенеруючої вставки, знаходимо згідно з формулою (1-23) [128]:

$$\omega'_{\text{im}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{w}}}{\pi \cdot D^2},\ \omega''_{\text{im}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{a}}(p)}{\pi \cdot D^2}\ ,\ \text{м/с}, \qquad (2.21)$$

де $Q_a(p)$ – об'ємна витрата газової фази газорідинного потоку, який знаходиться в умовах тиску p та визначається за формулою (2.8), м^3/с;

Q_w – об'ємна витрата рідинної фази газорідинного потоку, м^3/с;

D – внутрішній діаметр порожнини піногенератора, м.

Тоді, згідно з формулою 6–99 [155], отримаємо **[7]** дійсні швидкості рідинної ω' та газової фаз ω" газорідинного потоку:

$$\omega' = \frac{\omega'_{im}}{\varepsilon},\ \omega'' = \frac{\omega''_{im}}{\varepsilon},\ \text{м/с}. \qquad (2.22)$$

Порозність ε, згідно с. 176 [155], визначаємо **[7]** за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V_G \cdot \rho_{Fe} - m}{V_G \cdot \rho_{Fe}}, \qquad (2.23)$$

де m – маса елементів, з яких складається пористе тіло піногенеруючої вставки, кг;

V_G – внутрішній об'єм порожнини піногенератора, м^3;

ρ_{Fe} = 7,8 – густина матеріалу елементів, з яких складається пористе тіло піногенеруючої вставки, кг/м^3.

Об'єм цих елементів обчислюємо **[7]** за формулою:

$$V_{wire} = V_G \cdot (1-\varepsilon), \quad \text{м}^3. \qquad (2.24)$$

Тоді їх сумарну довжину розраховуємо **[7]** за формулою:

$$L_S = \frac{V_{wire}}{h_S \cdot b_S}, \quad \text{м}. \qquad (2.25)$$

Об'єм порожнини піногенератора, в якій поміщаються елементи піногенеруючої вставки, який має у нашому випадку форму циліндра, отримаємо **[7]** за формулою:

$$V_G = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot L, \quad \text{м}^3. \qquad (2.26)$$

Тоді сумарну площу поверхні елементів піногенеруючої вставки з підстановкою значень за формулами: V_{wire} – (2.24), L_{S} – (2.25), V_{g} – (2.26) визначаємо **[7]** за формулою:

$$S_{\text{wire}} = 2 \cdot (h_{\text{S}} + b_{\text{S}}) \cdot L_{\text{S}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(h_{\text{S}} + b_{\text{S}})}{h_{\text{S}} \cdot b_{\text{S}}} \cdot D^2 \cdot L \cdot (1 - \varepsilon), \quad \text{м}^2. \tag{2.27}$$

Питому поверхню елементів піногенеруючої вставки, згідно с. 176 [155], визначаємо **[7]** за формулою:

$$П = \frac{S_{\text{wire}}}{V_{\text{G}}}, \quad \text{м}^2/\text{м}^3. \tag{2.28}$$

Еквівалентний діаметр каналу піногенеруючої вставки, згідно з формулою (6–100) [155], визначаємо **[7]** за формулою:

$$d_{\text{equ}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{П}, \quad \text{м}. \tag{2.29}$$

Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору $\lambda(p)$, що входить до формули (2.6), згідно з методикою с. 143 [153], треба знайти витратну швидкість двофазного потоку (формула (1–27), [153]):

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{\text{air}}(p)}{\rho_w} \cdot \omega'', \quad \text{м/с}. \tag{2.30}$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda(p)$ обчислюється як коефіцієнт гідродинамічного опору однофазного потоку, в нашому випадку рідинної –

фази, для чого необхідно знайти число Рейнольдса для рідинної фази як функцію тиску:

$$\mathrm{Re}(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{\mathrm{equ}} \cdot \rho_{\mathrm{w}}}{\mu_w}, \tag{2.31}$$

де μ_w – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с.

Підставивши числові значення змінних та значення функції при типових режимах піногенерації, отримаємо **[7]**, що число Re < 4000. Цей режим течії, згідно з формулою (2–3) [154] відповідає закону Гагена-Пуазейля. Тоді величина гідродинамічного опору $\lambda(p)$ обчислюється **[7]** за формулою (2.15).

Для обчислення об'ємного газовмісту газорідинного потоку, що розглядається як функція тиску, скористаємося [7] формулою (1–24) [153] та, зробивши підстановки: $Q_a(p)$ – згідно (2.8), $Q_f(p)$ – згідно (2.9), Q_{a_NC} – згідно (2.7) та алгебраїчні перетворення, отримаємо:

$$\varphi(p) = \frac{Q_a(p)}{Q_f(p)} = \frac{Q_{a_NC} \cdot \frac{p_{NC}}{p}}{Q_{a_NC} \cdot \frac{p_{NC}}{p} + Q_w} = \frac{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{p_{NC}}{p}}{(k_m - 1) \cdot Q_w \cdot \frac{p_{NC}}{p} + Q_w} = \frac{(k_m - 1) \cdot p_{NC}}{k_m \cdot p_{NC} + p - p_{NC}}. \tag{2.32}$$

Підставивши у формулу (2.20) результати обчислень величин: $\lambda(p)$ – згідно (2.15), ω' та ω'' – згідно (2.12), d_{equ} – згідно (2.29), $\rho_{air}(p)$ – згідно (2.11) та зробивши алгебраїчні перетворення, отримаємо **[7]** диференційне рівняння для градієнта тиску вздовж осі піногенератора:

$$\frac{dp}{dL}=\frac{128}{\pi}\cdot\frac{\mu_w\cdot Q_w}{D^2}\cdot\frac{\left(\frac{p_{\text{NC}}\cdot(k_{\text{m}}-1)}{p}-\frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}\cdot(k_{\text{m}}-1)+1\right)}{\left(\frac{2\cdot h_{\text{S}}\cdot b_{\text{S}}}{(h_{\text{S}}+b_{\text{S}})}\right)^2\cdot\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}\cdot\left(1+\frac{\rho_{\text{a_NC}}}{\rho_{\text{w}}}\cdot(k_{\text{m}}-1)\right)},\ \text{Па/м.}\quad (2.33)$$

Вирішуючи це рівняння методом розділення змінних, отримаємо **[7]** інтеграл величини об'ємної витрати рідинної фази в залежності від вхідного p_2 та вихідного p_1 тиску:

$$Q_w=\frac{\pi}{128\cdot\mu_{\text{w}}\cdot\psi}\cdot\frac{D^2}{L}\cdot\left(\frac{2\cdot h_{\text{S}}\cdot b_{\text{S}}}{(h_{\text{S}}+b_{\text{S}})}\right)^2\cdot\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}\times$$
$$\times\int_{p_1}^{p_2}\frac{\left(1+\frac{\rho_{\text{a_NC}}}{\rho_{\text{w}}}\cdot(k_{\text{m}}-1)\right)}{\frac{p_{\text{NC}}\cdot(k_{\text{m}}-1)}{p}-\frac{\rho_{\text{a_NC}}}{\rho_{\text{w}}}\cdot(k_{\text{m}}-1)+1},\ \text{м}^3/\text{с}.\quad (2.34)$$

Обчисливши цей інтеграл, зробивши алгебраїчні спрощення та для зменшення громіздкості ввівши допоміжні змінні *a, b*, отримаємо **[7]** сукупність формул для обчислення об'ємної величини витрати рідкої фази:

$$a=\frac{(k_m-1)\cdot\rho_{a_NC}}{\rho_w}-1,$$
$$b=(k_m-1)\cdot p_{NC},$$
$$Q_w=\frac{\pi\cdot\left(1+\frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}\cdot(k_m-1)\right)}{32\cdot\psi\cdot\mu_w}\cdot\left(\frac{h_S\cdot b_S}{(h_S+b_S)}\right)^2\cdot\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}\cdot\frac{D^2}{L}\times\ ,\ \text{м}^3/\text{с}.\quad (2.35)$$
$$\times\frac{b\cdot\ln\left(\frac{b-p_1\cdot a}{b-p_2\cdot a}\right)+p_1\cdot a-p_2\cdot a}{a^2}$$

Використавши рівняння (2.7), отримаємо **[7]** формулу для об'ємної витрати газової фази:

$$Q_{a_NC} = \frac{\pi \cdot \left(1 + \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w} \cdot (k_m - 1)\right)}{32 \cdot \psi \cdot \mu_w} \cdot \left(\frac{h_S \cdot b_S}{(h_S + b_S)}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon^3 \cdot (k_m - 1)}{(1-\varepsilon)^2} \cdot \frac{D^2}{L} \times \times \frac{b \cdot \ln\left(\frac{b - p_1 \cdot a}{b - p_2 \cdot a}\right) + p_1 \cdot a - p_2 \cdot a}{a^2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.36)$$

Отримано **[7]** алгоритм обчислення об'ємних витрат газової Q_a та рідинної фази Q_w газорідинної суміші, що моделює роботу піногенератора (згідно Головної блок-схеми ММ: «Pre Camera & Porous Body») від наступних параметрів:

- p_2 – тиск на вході піногенеруючої вставки, Па;
- p_1 – тиск на виході піногенеруючої вставки, Па;
- ε – порозність пористого тіла;
- D – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- L – довжина піногенеруючої вставки, м;
- h_s – товщина піногенеруючих елементів, м;
- b_s – ширина піногенеруючих елементів, м;
- μ_w – динамічна в'язкість піноутворювача з водою, Па·с;
- k_m – кратність піни.

2.1.5. Розробка системи комунікації між блоками

Основними блоками блок- схеми ММ процесу генерації КП є:

- два блоки, що комунікують паралельно – це блоки «Liquid» та «Air»;
- три блоки, що комунікують послідовно – це блоки «Generator» та «Pipe», «Pistol».

Якщо для симуляції двох блоків з паралельною комунікацією труднощів не виникає, то для забезпечення симуляції блоків, що комунікують послідовно, необхідна розробка системи комунікації між ними. Задача цієї системи полягає в тому, щоб забезпечити під час симуляції та в її результаті вирівнювання величин потоків обох блоків, тим самим забезпечуючи закон збереження маси по всьому тракту Установки.

Принцип побудови такої системи використовує допоміжні елементарні блоки із «Simulink Library», а саме: «Math Operations», «Gain», «Integrator», «Sum» та зображений на рис. 2.2 **[7].**

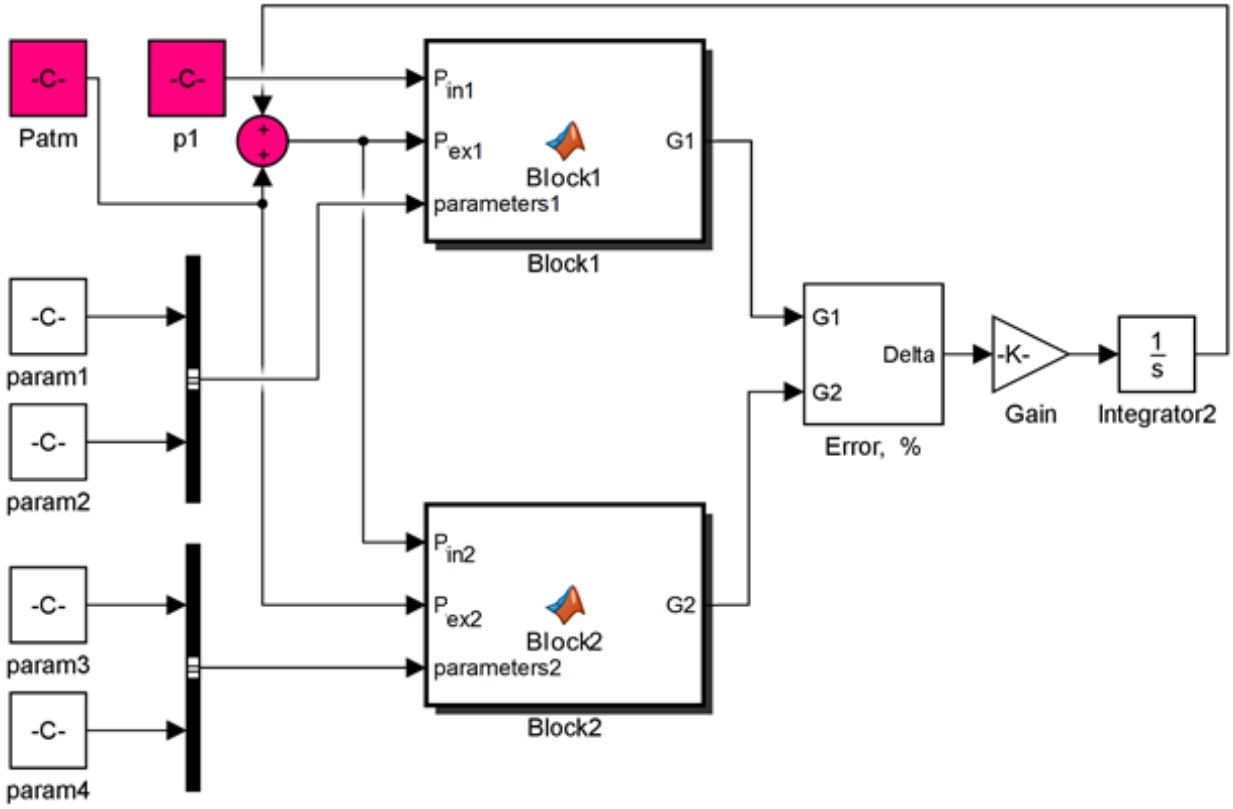


Рис. 2.2. Структура системи комунікації блоків, що мають послідовне сполучення [7]

На цьому рисунку зображено два блоки, що комунікують послідовно: «Block1» та «Block2». Структура обох блоків є ідентичною та відповідає структурі блоків «Generator», «Pipe» та «Pistol» блок-схеми (рис. 2.3):

Вхідні параметри:

- p_{in1} (p_{in2}) – вхідний тиск, Па, – величина, що не змінюється під час симуляції;
- p_{ex1} (p_{ex2}) – вихідний тиск, Па, – величина, що змінюється під час симуляції;
- parameters1 (parameters2) – величини, що не змінюються під час симуляції.

Вихідні параметри:

- G1 (G2) – потік газорідинної суміші, кг/с, – величина, що обчислюється в цьому блоці.

Така структура під час симуляції повинна мінімізувати абсолютну величину різниці між потоками обох блоків. Для підтвердження цього напишемо **[7]** рівняння:

$$\delta(t) = G_1 \cdot \left(p_{in1}, \int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm} \right) - G_2 \cdot \left(\int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt + p_{atm}, p_{atm} \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2.37)$$

де $\delta(t)$ – цільова функція, що обирається для оцінки величини різниці між потоками обох блоків, див. формулу (2.38);

G_1, G_2 – функції, що виражають залежність потоку *i*-го блоку від його вхідних даних, м^3/с;

p_{in1} – вхідний тиск першого блоку «Block1», Па;

$\int_0^T \delta(t) \cdot k \cdot dt$ – вихідний тиск першого блоку «Block1» та згідно зі схемою, див. (2.6), вхідний тиск другого блоку «Block2», Па;

k – стала, що обирається, виходячи з оптимізації машинного часу комп'ютера;

$0 \ldots T$ – часовий інтервал моделювання, що обирається виходячи з оптимізації машинного часу комп'ютера, с;

p_{atm} – атмосферний тиск.

В якості цільової функції $\delta(t)$ обрано **[7]** наступну:

$$\delta(t) = \frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2}) - G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{\frac{G_2(p_{in2}, p_{ex2})}{2} + \frac{G_1(p_{in1}, p_{ex1})}{2}} \quad (2.38)$$

Для забезпечення взаємодії між блоками розроблено систему комунікації, яка під час обчислювального процесу мінімізує різницю між масовими потоками кожного з послідовно з'єднаних блоків, що відповідає стаціонарному режиму роботи установки.

2.1.6 Функціонування блок-схеми ММ процесу генерування КП

Блок-схема ММ процесу генерування КП представлена на рис. 2.3.

Вхідні дані:

- «p_comp» – тиск на виході компресора, Па;
- «d_liq» – критичний діаметр рідинного сопла, м;
- «d_air» – критичний діаметр газового сопла, м ;
- «T» – температура навколишнього середовища, К;
- «D_g» – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- «L_g» – довжина піногенеруючої вставки, м;
- «epsilon» – порозність пористого тіла;
- «h_s» – товщина піногенеруючих елементів, м;
- «b_s» – ширина піногенеруючих елементів, м;
- «D_pipe» – внутрішній діаметр шланга, м;
- «L_Pipe» – довжина шланга, м
- «D_pistol» – внутрішній діаметр каналу пістолета-перемикача, м;
- «L_pistol» – довжина каналу пістолета-перемикача, м;
- «p_atm» – нормальний атмосферний тиск, Па.

Вихідними даними є:

– «Q_liq» – потік рідинної фази газорідинного потоку (об’ємна витрата), $м^3/с$;

– «Q_air» – потік газової фази газорідинного потоку (об’ємна витрата), $м^3/с$;

– «k_m» - кратність піни;

– «Error1», «Error2», «Error3» - відносні помилки розрахунку для трьох блоків: «Generator», «Pipe», «Pistol».

Початкові умови для змінних величин:

– p_{in} = 0,1 МПа, вхідний тиск блоків «Generator», «Pipe», «Pistol»;

– p_{ex} = 0,1 МПа, вихідний тиск блоків «Generator», «Pipe», «Pistol».

В результаті симуляції відбувається асимптотичне наближення вихідних даних («Q_liq», «Q_air», «k_m», «Error1», «Error2», «Error3») та змінних величин вхідних та вихідних тисків («p_{in}», «p_{ex}») блоків: «Generator», «Pipe», «Pistol» до параметрів стаціонарного режиму функціонування математичної моделі генерування КП.

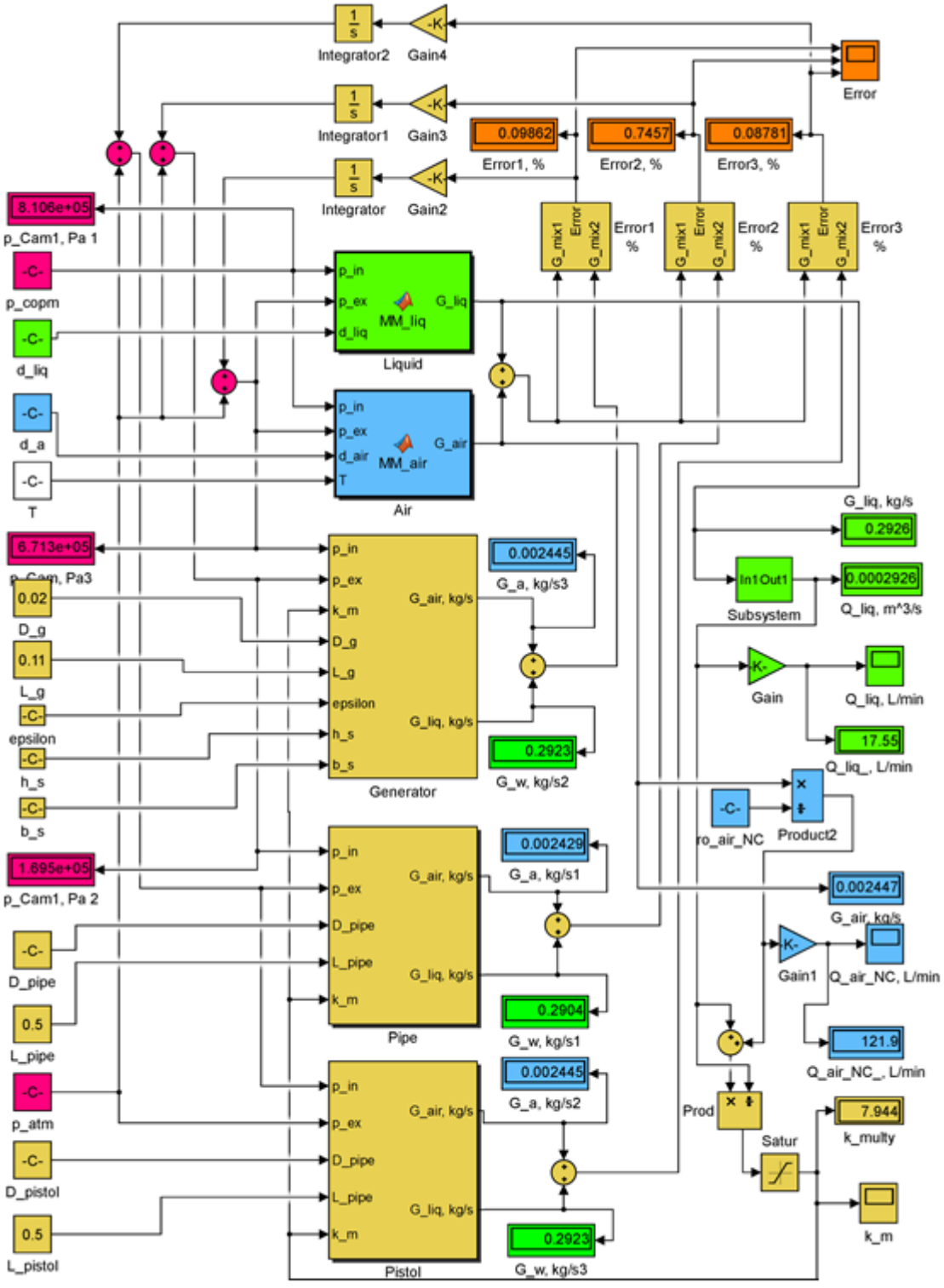


Рис. 2.3. Блок-схема ММ **[7]**

Принцип використання створеної ММ процесу генерування КП полягає у підборі величин вхідних параметрів, що задовольняють заданим вихідним параметрам.

Для потреб проектування системи для подавання компресійної піни за допомогою створеної ММ було проведено **[2]** числове моделювання за різних початкових параметрів системи, результати якого наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати чисельного моделювання роботи ММ процесу генерування КП

P_{comp}, МПа	P_{mix}, МПа	P_{ex}, МПа	d_w, 10^{-3} м	d_a, 10^{-3} м	d_j, 10^{-3} м	k_m	Витрата водного розчину ПУ Q_w, л/с	Витрата повітря, Q_a, л/с	Тривалість спорожнення газового балона 7 л τ_a, хв	Необхідна ємність для водного розчину ПУ V_w, л
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25–D25–L80										
0,8	0,8	2,4	8	9	10	104	0,17	18	1,3	10,2
0,8	0,8	2,4	9	9	10	82	0,2	16	1,5	11,4
0,8	0,8	2,4	12	9	10	47	0,26	12	2	17
0,8	0,8	2,4	15	9	10	30	0,33	10	2,4	18,3
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25–D25–L60										
0,6	0,58	2.3	4.6	5	8	82	0,12	9,95	2,2	7,2
0,6	0,58	2.3	5	5	8	82	0,13	9,1	2,4	7,8
0,8	0,78	2,9	5	5	8	81	0,15	12,4	1,7	9
0,8	0,76	2,9	5	4	8	51	0,19	9,7	2,35	11,4
Піногенеруюча вставка: e_gr=0.25–D25–L120										
0,8	0,8	1,7	20	7	10	11	0,4	4,1	5,7	99.1
0,8	0,8	1,7	15	7	10	19	0,3	5,4	4,3	65
0,8	0,8	1,7	12	7	10	29	0,25	6,7	3,5	52
0,8	0,8	1,8	8	7	10	63	0,16	10	2,4	18.3
0,8	0,8	1,8	6	7	10	111	0,12	13	1,8	11,9
0,8	0,8	1,7	18	6	10	10	0,43	3,9	6	155
0,8	0,8	1.7	12	5	10	15.1	0.34	4.85	4.85	98,9
0,8	0,8	1.7	12	4	10	10	0.43	3.4	6	155
0,8	0,8	1,7	12	6	10	21	0,28	5,7	4	67,2
0,8	0,8	1,8	8	6	10	47	0,19	8,5	2,7	30,8
0,8	0,8	1,8	6	6	10	82	0,14	11	2,1	17,6
0,8	0,8	1,8	5	6	10	117	0,11	13	1,8	11,9

На рис. 2.4, зображено залежність кратності компресійної піни К від зміни діаметрів водяного d_w та повітряного d_a сопел.

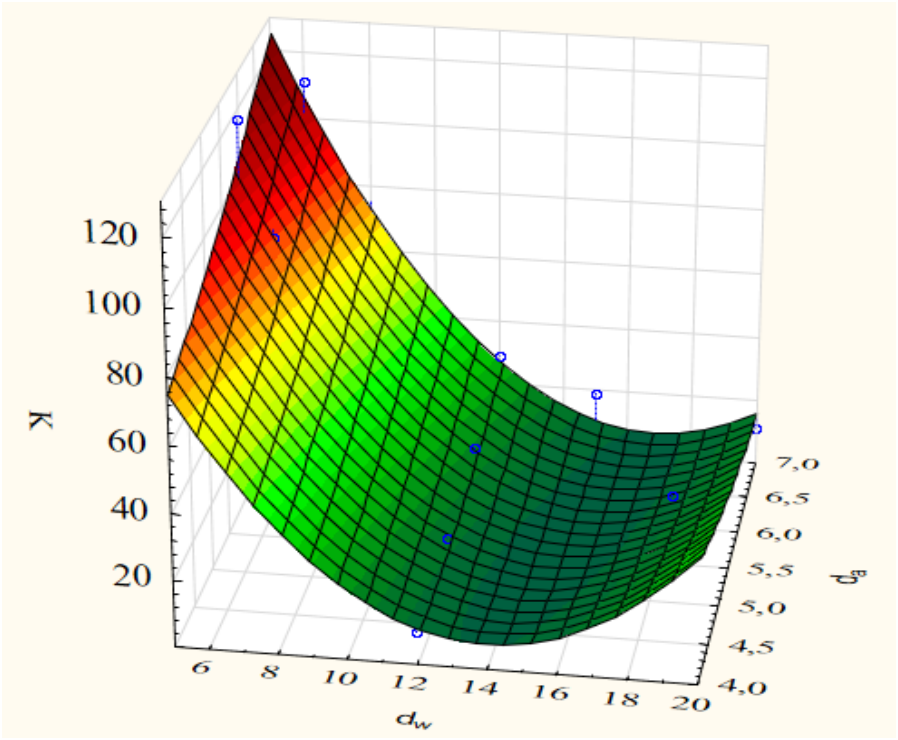


Рис. 2.4. Залежність кратності компресійної піни К від зміни діаметрів водяного d_w та повітряного d_a сопел

$$K = 116{,}3465 - 16{,}994 \cdot d_w + 7{,}3642 \cdot d_a + 0{,}8382 \cdot d_w^2 - 1{,}6088 \cdot d_w \cdot d_a + 1{,}5836 \cdot d_a^2 . \quad (2.39)$$

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 2.4, за сталого діаметра повітряного сопла d_a = 6 мм та зменшення діаметра водяного сопла d_w від 12 мм до 6 мм (на 50 %), спостерігається суттєва зміна кратності К, яка зменшується на 75 %, відповідно з 117 до 21. Це зумовлено сталою пропускною здатністю отвору повітряного сопла d_a та зменшенням пропускної здатності отвору водяного сопла d_w. Також за незмінного діаметра водяного сопла d_w=12 мм і збільшення діаметра повітряного сопла d_a від 4 мм до 6 мм спостерігається збільшення кратності на 47 %, відповідно з 10 до 21. Отже, виходячи з аналізу графіка, встановлено, що на кратність піни К впливає пропускна здатність водяного d_w і повітряного d_a сопел. У

разі збільшення або зменшення водяного сопла d_w відповідно зменьшується або зростає кратність піни К. Зміна кратності К від зміни діаметра повітряного сопла d_a має обернено пропорційний характер відносно водяного сопла d_w, а саме за збільшення або зменшення діаметра повітряного сопла d_a кратність К відповідно зростає або зменшується.

2.2. Розробка експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни

Для створення експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни, окрім отриманих розрахунків технічних параметрів системи, за допомогою математичної моделі процесу генрування компресійної піни необхідно провести аналіз існуючих технологій перемішування повітря і розчину піноутворювача та елементів спінювання, які можуть бути використані в камерах змішування.

Дослідження [139, 156] було спрямоване на пошук оптимальних способів перемішування повітря та розчину піноутворювача в системах для генерування і подавання компресійної піни. Експериментально визначено більш ефективний спосіб [139]. Результати показали, що піна, яка утворена за допомогою коаксіального (співвісного) способу перемішування, володіє більш ефективними вогнегасними властивостями, ніж піна, утворена шляхом вертикального введення повітря, а саме утворюється більш однорідна піна.

З урахуванням аналізу та результатів дослідів [139, 156] розроблено оригінальний пінозмішувач коаксіального типу **[9]**.

Спроектований пінозмішувач складається з циліндричного корпуса, каналу для подавання розчину піноутворювача, каналу для подавання повітря під тиском, камери змішування та камери піноутворення. Новим є те, що камера змішування виготовлена у вигляді знімного реактора з циліндричним каналом для подавання водного розчину піноутворювача всередині та радіально розташованими отворами для подавання повітря під тиском, що мають форму сопел Лаваля, а в камері піноутворення встановлено пакет

сіток. Використання знімного реактора запропонованої конструкції для піноутворення дозволяє інтенсифікувати процес піноутворення, що покращить якість та однорідність компресійної піни, а встановлення пакета сіток у камері піноутворення дозволить отримувати бульбашки в піні необхідного діаметра, що будуть за розміром дорівнювати розміру комірок сіток. Загальний вигляд пінозмішувача наведено на рис. 2.5.

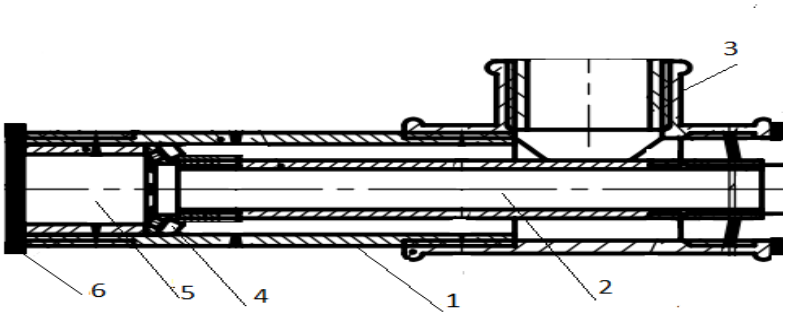


Рис. 2.5. Загальний вигляд розробленого пінозмішувача: 1 – циліндричний корпус; 2 – канал для подавання водного розчину піноутворювача; 3 – канал для подавання повітря під тиском; 4 – знімний реактор; 5 – камера піноутворення; 6 – пакети сіток

На рис. 2.6 наведено оригінальний знімний реактор власної розробки.

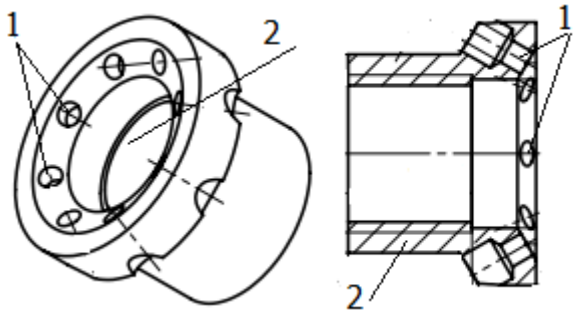


Рис. 2.6. Оригінальний реактор для перемішування власної розробки: 1 – отвори для подавання повітря; 2 – трубопровід для подавання водного розчину піноутворювача

Після проведення аналізу конструкційних елементів, які використовують у статичних змішувачах **[4]**, в якості пористого тіла нами обрано тип нерегулярних насадкових елементів. До основних характеристик пористого тіла слід віднести такі характеристики, як його довжина H_{gr}, середня товщина стінок d_{gr} і порозність ε_{gr}. Вибір зазначених нерегулярних насадкових елементів зумовлений з економічної та конструктивної точок зору. Зі сторони конструктивного виконання вказані елементи є дуже простими у користуванні. Економічність обраного типу зумовлена широким поширенням та низькою вартістю, у порівнянні з іншими елементами, які можуть бути використані як елементи спінювання у статичних змішувачах.

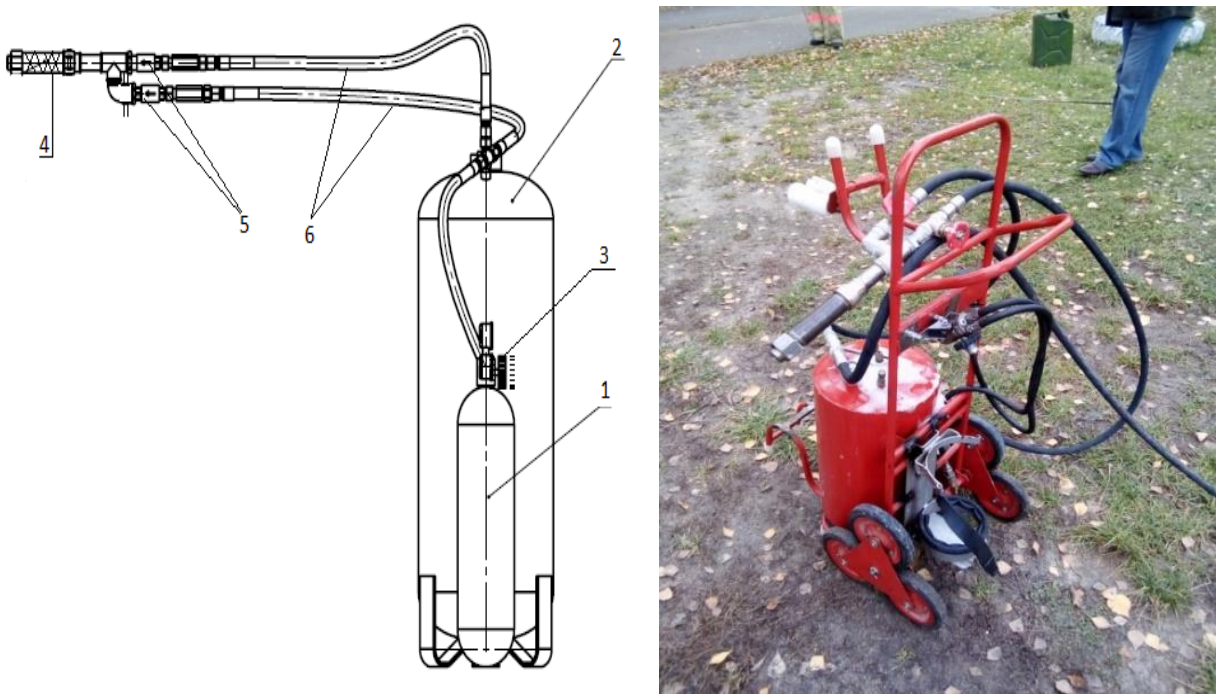
Тип нерегулярних насадкових елементів, застосованих в експериментальному зразку генерування і подавання компресійної піни [**11**], наведено на рис. 2.7.

Рис. 2.7. Нерегулярні насадкові елементи

З урахуванням вищевикладеного та розрахунків, одержаних під час математичного моделювання [**2**], виготовлено експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни. Зразок системи складається з таких основних елементів: компресор (або балон зі стисненим повітрям), ємність для водного розчину ПУ, пінозмішувач оригінальної конструкції для змішування водного розчину ПУ з повітрям та генерування піни. Виготовлена система забезпечує зміну тиску в інтервалі від 1 до 10 бар,

витрати води – до 3,5 л/сек. Максимальний тиск у компресорі 14 – бар, він може регулюватися через редуктор від 1 до 10 бар із похибкою 0,2 бара. Ємність для води – 20 л.

На рис. 2.8 наведено схему (а) та фото (б) розробленого експериментального зразка.



(а) (б)

Рис. 2.8. Схема «а» та фото «б» експериментального зразка системи для генерування і подавання компресійної піни: 1 – ємність для водного розчину піноутворювача; 2 – балон зі стисненим повітрям, або компресор; 3 – редуктор для регулювання тиску та витрат повітря; 4 – оригінальний пінозмішувач; 5 – крани для регулювання витрат водного розчину піноутворювача та повітря; 6 – трубопроводи для подавання водного розчину піноутворювача та стисненого повітря [**11**]

В якості основи для системи був використаний вогнегасник ОП–20. Подавання повітря передбачено як від компресора мод. К–22 УХЛ4.2 (робочий тиск – 16 МПа, об'єм ресивера – 220 м^3), так і від балонів зі стисненим повітрям (робочий тиск – 25 МПа, об'єм – 19 л). Витрати розчину

та повітря регулюються окремо за допомогою кранів. Максимальний тиск повітря, що використовувався, – 10 МПа. Витрати води передбачені до 80 л/хв.

Водний розчин піноутворювача готується окремо, а потім заливається до ємності ОП-20. Для подавання рідини в реактор використовується стиснене повітря, яке подається компресором за регульованого тиску в діапазоні від 0 до 0,6 МПа.

Вигляд компресійної піни, отриманої на розробленому зразку за зміни співвідношення водний розчин піноутворювача–повітря подано на рис. 2.9.

а б в

Рис. 2.9. Загальний вигляд отриманої піни за зміни співвідношення водний розчин піноутворювача–повітря : а – 1 до 5; б – 1 до 12; в – 1 до 20

На рис. 2.10 наведено загальний вигляд компресійної піни, нанесеної на вертикальні поверхні за зміни співвідношення водний розчин піноутворювача – повітря.

а б

Рис. 2.10. Вигляд компресійної піни, нанесеної на вертикальну дерев’яну (а) та пластикову (б) поверхню після 240 секунд витримки. Співвідношення водний розчин піноутворювача–повітря складало від 1 до 12 (а) та 1 до 6 (б)

За результатами проведених досліджень за допомогою розробленого експериментального зразка системи CAFS підтверджено можливість генерування КП із застосуванням піноутворювачів вітчизняного виробництва на прикладі «БАРС-S».

Одержана КП має низку особливостей, а саме:

– низький вміст рідкої фази (практично весь водний розчин ПУ перетворюється на піну);

– одержана піна має рівномірну дисперсність і товщину стінок пінних бульбашок, що уповільнює її руйнування;

– одержана піна має високу адгезію до вертикальних поверхонь.

2.3. Перевірка теоретичних та практичних результатів математичної моделі процесу генерації КП

Перевірка адекватності математичної моделі (2.2), (2.5), (2.35), (2.36), (2.38) здійснювалась експериментально. Експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни проектувався відповідно до вимог, завдяки яким можливе генеруваня компресійної піни, де її кратність К знаходиться в діапазоні від 5 до 25.

Перед початком проектування та прийняття технічних рішень щодо розроблення конструкторської документації у програмному забезпеченні було проведено [**2]** відповідні розрахунки, щодо отримання необхідних діаметрів рідинного d_w та повітряного d_a сопел, завдяки яким забезпечується генерування піни кратністю відповідно від К=5 до К =25.

При цьому незмінними параметрами було взято робочий тиск у системі p_{comp}, довжину піногенеруючої вставки L, порозність пористого тіла ε (2.23) та діаметр вихідного сопла d_j. Діаметри вхідного водяного та повітряного сопел планувалось змінювати завдяки вентелям, встановленим на металевих трубопроводах ствола, де відбувається проходження потоків повітря та рідини перед їх потраплянням до камери змішування та проходження через пористі тіла. Розрахункові дані, отримані за допомогою розробленої ММ (2.2), (2.5), (2.35), (2.36) у програмному забезпеченні, та експериментальні

дані, отримані на розробленому зразку системи для генерування і подавання компресійної піни, щодо відповідності кратності одержаної піни, в залежності від зміни діаметрів рідинного d_w та повітряного d_a сопел, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати перевірки адекватності математичної моделі

№ досліду	d_w, мм	d_{air}, мм	Кратність піни, К		
			Експериментальна		Розрахункова
			К	$\overline{К}$	
1	8	2	5,8	5,3	5
2			5,1		
3			5		похибка 6 %
4	4	6	15,1	15,8	15
5			15,9		
6			16,4		похибка 5 %
7	2	8	24,7	23,3	25
8			22,5		
9			22,7		похибка 7 %

Таким чином, встановлено, що різниця між розрахунковими та експериментальними даними стосовно отриманої кратності піни К не перевищує 7 %.

2.4. Висновки

1. Розроблено математичну модель процесу генерування КП, яка дозволяє розв’язувати такі прикладні та наукові завдання:

– проводити розрахунки параметрів систем генерування і подавання КП залежно від кратності компресійної піни, яку необхідно отримати;

– досліджувати вплив параметрів піногенерувальної вставки на кратність компресійної піни;

– проводити проектування систем генерування і подавання компресійної піни для гасіння пожеж різних класів.

2. Проведено аналіз існуючих способів змішування повітря та розчину піноутворювача у системах для генерування і подавання компресійної піни,а також конструкційні особливості статичних змішувачів, які можуть бути використані для генерування компресійної піни. Розроблено оригінальний пінозмішувач коаксіального типу перемішування, в якому передбачені сопла Лаваля для інтенсифікації процесу піноутворення, а в якості пористого тіла використано нерегулярні насадкові елементи.

3. На основі розрахункових даних, отриманих за допомогою математичної моделі й аналізу існуючих систем генерування і подавання компресійної піни, спроектовано та розроблено експериментальний зразок такої системи, який дозволяє отримувати компресійну піну з діапазоном кратності від 5 до 25.

4. Проведено перевірку адекватності розробленої математичної моделі порівнянням розрахункових та експериментальних даних і встановлено, що розбіжність між отриманими результатами не перевищує 7 %.

5. За допомогою математичної моделі проведено чисельний експеримент, та визначено, що на кратність піни впливає пропускна здатність повітряного та водяного сопел. Зокрема, встановлено, що, за сталого діаметра повітряного сопла d_a = 6 мм та зменшення діаметра водяного сопла від 12 мм до 6 мм (на 50 %), спостерігається суттєва зміна кратності , яка зменшується на 75 %, відповідно з 117 до 21. Також за незмінного діаметра водяного сопла 12 мм і збільшення діаметра повітряного сопла від 4 мм до 6 мм спостерігається збільшення кратності на 47 %, відповідно з 10 до 21.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ТА ЇЇ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Компресійна піна – це піна низької кратності, оскільки співвідношення вода–повітря знаходиться у межах 1/5–1/20, але, на відміну від звичайної повітряно-механічної піни, має дрібнодисперсну однорідну структуру. Вона має особливості, не характерні для звичайної повітряно-механічної піни, а саме: підвищену стійкість, посилену адгезію та високу вогнегасну здатність при одночасному зменшенні витрат води і піноутворювача [97–99]. Це пов'язують зі зменшенням діаметрів бульбашок компресійної піни в порівнянні з повітряно-механічною піною та підвищенням однорідності. Проте на шляху впровадження компресійної піни як ефективного засобу пожежогасіння постає проблема, що полягає в отриманні науково обґрунтованих результатів щодо впливу кратності піни та концентрації водного розчину піноутворювача, з якого її генерують, на властивості та вогнегасну ефективність піни.

Технологія систем для генерування і подавання компресійної піни дозволяє регулювати співвідношеня кількості повітря та рідини, тобто кратність у отриманої піни. Також у системах CAFS відбувається регулювання концентрації піноутворювача.

Першим етапом дослідження стало [**12, 13]** визначення впливу кратності та концентрації піноутворювача у компресійній піні на наступні властивості піни: стійкість, дисперсність та однорідність.

Другим етапом дослідження, з урахуванням отриманих на першому етапі експериментальних даних, стало вивчення впливу кратності та концентрації піноутворювача у водному розчині на вогнегасну ефективність. У [**14, 15**] експериментальним шляхом досліджено, яка кратність та концентрація піноутворювача відповідають найбільшій вогнегасній ефективності для компресійної піни під час гасіння нестандартизованих

(лабораторних) модельних вогнищ пожежі класу А за оцінкою двох показників вогнегасної ефективності.

Третій етап дослідження полягав **[17]** у порівнянні між собою води, компресійної піни та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандартнизованих модельних вогнищ пожежі класу А, та визначенні найбільш ефективного вогнегасного засобу для твердих горючих речовин.

3.1. Експериментальні дослідження впливу компресійної піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування, на властивості піни

1. Вивчення впливу кратності піни К і концентрації водного розчину піноутворювача Р на стійкість S і діаметр бульбашки D.
2. Визначення впливу кратності компресійної піни К на її однорідність Ф.

1. Для проведення дослідів використовувався **[12]** піноутворювач загального призначення «Барс S–1» із забезпечення концентрації водного розчину від 4 % до 6 %. Під час дослідів підтримувався сталий тиск в установці 0,6 МПа. Для змінювання кратності піни К змінювалися такі вхідні параметри, як витрата розчину піноутворювача та витрата повітря. Концентрація піноутворювача Р у водному розчині змінювали шляхом змішування піноутворювача та води у певних пропорціях.

Стійкість компресійної піни S вимірювали згідно з [92]. Дисперсність піни визначали візуально за допомогою мікроскопа МБС–9 (рис 3.1), з ціною поділки 10 мкм [157]. Далі для визначення реальних розмірів бульбашок компресійної піни проводили калібрування мікроскопа в залежності від кратності збільшення. Для калібрування використовували об’єкт – мікрометр, який являє собою прозоре скло, на якому нанесена шкала 1 мм (1000 мкм), з ціною поділки 0,01 мм.

Для уточнення розміру бульбашки проводили уточнювальні досліди згідно з рекомендаціями методики визначення розмірів краплин води, викладеної в [158].

Рис. 3.1. Мікроскоп МБС–9

Згідно [159] на 1-му етапі проведення досліджень для реалізації мети був спланований ПФЕ типу 2^k з допустимою точністю моделі 5 %, в якому в якості чинників було обрано кратність компресійної піни К (x_1) і концентрація піноутворювача у водному розчині Р (x_2), а в якості функції відгуку –діаметр бульбашки D (z) компресійної піни.

На основі аналізу інформації було здійснено вибирання експериментальної області чинникового простору. Згідно [160] в якості нульового рівня чинника був обраний центр інтервалу, в якому проводили дослідження. Так само було вибрано інтервал варіювання, значення верхнього та нижнього рівнів чинників у натуральному і кодованому вираженні. Значення рівнів чинників та інтервали варіювання наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Значення рівнів чинників та інтервали варіювання

Найменування чинника	Рівень та значення чинника у досліді			Інтервал варіювання
	+1	0	–1	
Кратність компресійної піни, К	20	12,5	5	7,5
Концентрація піноутворювача у водному розчині, Р %	6	5	4	1

Під час складання плану-матриці ПФЕ типу 2^k використовувався ортогональний план першого порядку [160], із введенням стовпця x_1x_2, який дозволяє оцінювати коефіцієнт регресії під час взаємодії факторів. ПФЕ в кодованому вираженні факторів наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

План ПФЕ в кодованому виразі

№ досліду	x_0	x_1	x_2	x_1 x_2	z
1	+	-	-	+	z1
2	+	+	-	-	z2
3	+	-	+	-	z3
4	+	+	+	+	z4

Далі на підставі плану ПФЕ було складено робочу матрицю і проведено експеримент з визначення діаметрів бульбашок D піни різної кратності. Робоча матриця планування і результати експерименту, виконані у двократній повторності, представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Робоча матриця планування та результати дослідження

№ дос - ліду	К	Р %	Діаметр бульбашки D, мм			
	x_1	x_2	m_1	m_2	m_3	Середнє значення, z
			z_1	z_2	z_3	$\bar{z}$
1	5	4	0,118	0,124	0,121	0,121
2	20	4	0,114	0,112	0,107	0,111
3	5	6	0,11	0,119	0,116	0,115
4	20	6	0,098	0,105	0,097	0,100

Після проведення дослідів статистичне оброблення результатів виконували згідно методики [160, 161].

Перевірку відтворюваності дослідів проводили за критерієм Кохрена:

$$G = \frac{s^2_{umax}}{\sum_{u=1}^{n} s^2_u} \le G_{(0,05;f_b;f_u)}, \qquad (3.1)$$

де $s^2_u = \frac{\sum_{p=1}^{m}(y_{up} - y_u^-)^2}{m-1}$ – дисперсія, яка характеризує розсіювання результатів дослідів на u-му рівні чинників;

– p=1,2…, m – кількість паралельних дослідів;

– s^2_{umax} – найбільша з дисперсій в рядках плану;

– G – табличне значення критерію Кохрена при 5% - му рівні значення;

– $f_n = n$ – кількість незалежних оцінок дисперсії;

– $f_u = m–1$ – кількість ступенів свободи кожної оцінки.

Дані для перевірки відтворюваності дослідів наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Дані для перевірки відтворюваності дослідів

N досліду	N паралельного досліду	Відхилення результату досліду від середнього	Квадрат відхилення результату досліду від середнього	Дисперсія кожного досліду в кожній точці плану
		$\left(z_{up} - \overline{z_u}\right)$	$\left(z_{up} - \overline{z_u}\right)^2$	S_z^2
1	1 2 3	–0,003 0,003 0	0,000009 0,000009 0	0,000009
2	1 2 3	0,003 0,001 –0,004	0,000009 0,000001 0,000016	0,000013

Продовженя табл.3.4

3	1 2 3	–0,005 0,004 0,001	0,000025 0,000016 0,000001	0,000021
4	1 2 3	–0,002 0,005 –0,003	0,000004 0,000025 0,000009	0,000019

Перевірка процесу відтворення за рівнянням (3.1), згідно критерію Кохрена:

$$G_z = 0{,}146 < G_{(0{,}05;4;2)} = 0{,}7679 \quad . \tag{3.2}$$

Дисперсію відтворення розраховували згідно з формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n} s_u^2}{n}. \tag{3.3}$$

$S_z^2 = 0{,}00003575.$

В якості моделі об’єкта дослідження на 1-му етапі, згідно [153], було використано поліном 1-го ступеня:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 . \tag{3.4}$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводився за наступними формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{n} \bar{y}_u}{n}, \tag{3.5}$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{n} x_{i_u} \overline{y_u}}{n}, \tag{3.6}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{n} x_{i_u} x_{iu} \overline{y_u}}{n}, \tag{3.7}$$

де i – номер стовпця в матриці планування;

– x_{iu} – елементи i-го стовпця;

– y_u – результат експерименту за відповідних параметрів.

Отримано такі значення:

$$b_{z0} = 0,11175;$$
$$b_{z1} = -0,00625;$$
$$b_{z2} = -0,00425;$$
$$b_{z12} = -0,005.$$

Виконавши розрахунок коефіцієнтів регресії, оцінили їх значущість за критерієм Стьюдента. Коефіцієнт вважається значущим, якщо виконується нерівність:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{N}}, \qquad (3.8)$$

де $t_{(0,05;f_y)}$ – 5 % -ва точка розподілу Стьюдента з f_y ступенями свободи.

Дисперсії коефіцієнтів регресії для стійкості піни S і діаметра бульбашки D:

$$\Delta b_z = 0,004.$$

Всі отримані за розрахунком коефіцієнти регресії, крім $b_{z12} = -0,005$, є значущими. Рівняння функцій відгуку набуває такого вигляду:

$$D = 0,11175 - 0,00625 \cdot K - 0,00425 \cdot P. \qquad (3.9)$$

За рівнянням (3.12) були розраховано значення діаметра бульбашки $D_{розр}$. Порівняння отриманих розрахункових та експериментальних даних наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Порівняння розрахункових та експериментальних даних стійкості компресійної піни S та діаметра бульбашки D

№ досліду	$D_{експ.}$, мм	$D_{розр.}$, мм	Відмінність між результатами, %
	$\overline{z}_{експ.}$	$Z_{розр.}$	% z
1	0,121	0,122	1%
2	0,111	0,109	2%
3	0,115	0,113	2%
4	0,100	0,101	1%

Для перевірки на адекватність отриманих рівнянь було розраховано дисперсію адекватності:

$$s^2_{ад} = \frac{\sum_{u=1}^{m}(y^-_u - y_u)^2}{n-k-1}, \qquad (3.10)$$

де y_u – розрахункове значення відгуку в u-му досліді;

$F_{(0,05;f_{ад};f_y)}$ – критерій Фішера за 5 % -го рівня значимості;

$f_{ад}=n–k–1$ – число ступенів свободи дисперсії адекватності;

f_y – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

$$\sum_{u=1}^{m}(z^-_u - z_u)^2 = 0{,}000004.$$

Розрахунок дисперсії адекватності за формулою (3.10):

$$s^2_{ад}z = 0{,}000004$$

Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s^2_{ад}}{s^2_y} \le F_{(0,05;f_{ад};f_y)}; \quad (3.11)$$

$$F_z = 0,111 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7 . \quad (3.12)$$

Отримане розрахункове значення критерію Фішера (рівняння (3.12)) менше табличного, отже модель адекватно описує процес, але, згідно [161], оцінка адекватності за критерієм Фішера не завжди ефективна, виходячи з цього для достовірності адекватності моделі було використано підхід Закгейма [162].

Адекватність моделі визначається допустимим відхиленням Якщо у всіх точках плану відхилення розрахункового значення від експериментального не перевищує допустимого, то вважають, що модель адекватно описує процес.

Було задано допустиму точність моделі 5 %. Аналізуючи результати табл. 3.5 для регресійної моделі діаметра бульбашки D, можна побачити, що відхилення не перевищують заданих значень, тобто модель є адекватною.

Графічне зображення залежності середнього діаметра бульбашки D в компресійній піни від її кратності К та концентрації піноутворювача у водному розчині Р наведено на рис. 3.2.

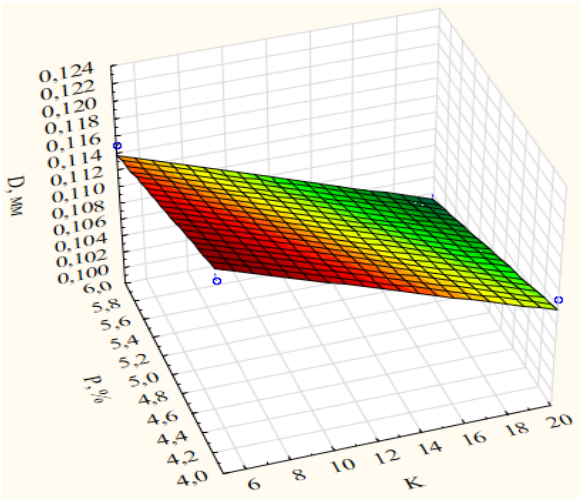


Рис. 3.2. Залежність діаметра бульбашки D від кратності компресійної піни К та концентрації піноутворювача у водному розчині Р

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 3.2, зрозуміло, що підвищення кратності піни К від 5 до 20 супроводжується зменшенням діаметра бульбашки D піни на 14 %. Зменшення розміру бульбашки D в піні має позитивний вплив на її ефективність в цілому: вона буде більш стійкою, тобто, ймовірно матиме більшу вогнегасну ефективність за рахунок бульбашок малого розміру, з яких вона складається. Також позитивний вплив на отримання бульбашок малого розміру справляє збільшення концентрації піноутворювача у водному розчині Р. Підвищення концентрації піноутворювача Р від 4 % до 6 % супроводжується зменшенням середнього розміру бульбашки D на 10 %. Отже, використання піноутворювача Р з концентрацією 6 % (згідно рекомендаціями виробника) та збільшення кратності компресійної піни К призводить до отримання високодисперсної піни, що теоретично добре впливає на її вогнегасну ефективність.

На рис. 3.3 наведено залежність зміни діаметра бульбашки D від кратності піни К з концентрацією піноутворювача у водному розчині 6 %.

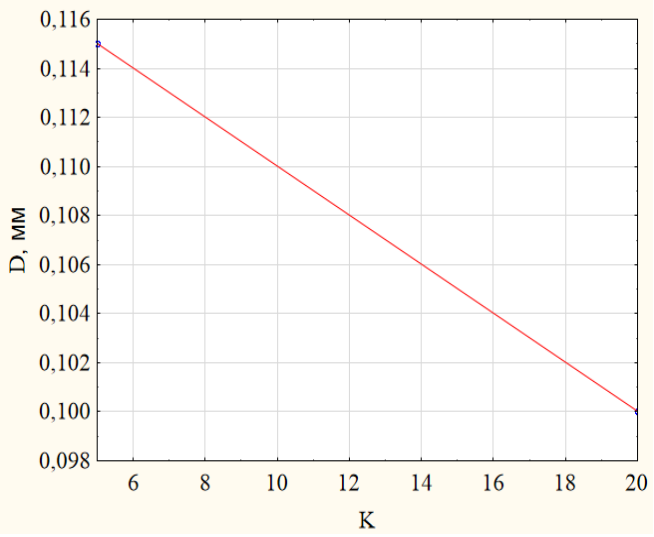


Рис. 3.3. Залежність діаметра бульбашки D від кратності компресійної піни К

Аналізуючи графік на рис. 3.3, встановлено, що залежність діаметра бульбашки D від кратності піни К має лінійний характер. Підвищення кратності піни К від 5 до 20 приводить до зменшення діаметру бульбашки D на 15 %, що добре впливає на вогнегасну ефективність піни.

На рис. 3.4 наведено залежність діаметра бульбашки D від зміни концентрації піноутворювача Р при кратності піни К= 20.

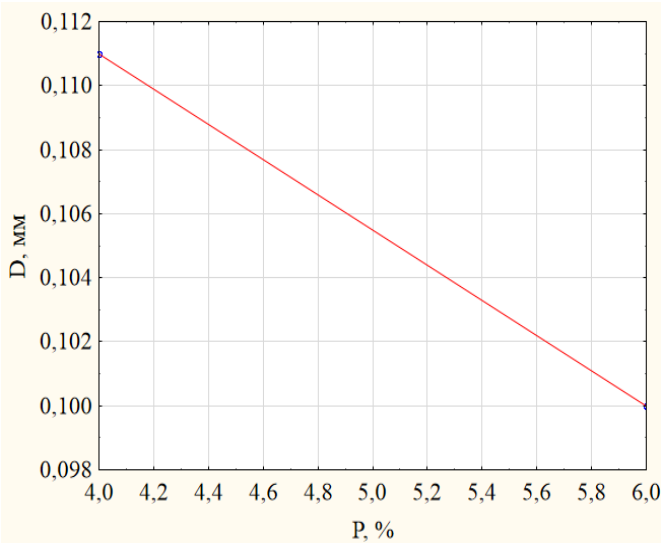


Рис. 3.4. Залежність діаметра бульбашки D від концентрації піноутворювача Р

Аналізуючи графік на рис. 3.4, встановлено, що підвищення концентрації піноутворювача Р від 4 % до 6 % супроводжується зменшенням розміру бульбашки на 10 %. Це підкреслює, що слід дотримуватись рекомендацій концентрації виробника щодо застосування піноутворювачів загального призначення.

Отримано наступні рівняння регресії з довірчим інтервалом ймовірності 0,95, які описують залежність зміни діаметра бульбашки D від концентрації водного розчину піноутворювача Р при кратності піни К = 20 (рівняння 3.13) та від зміни кратності компресійної піни К при концентрації піноутворювача Р 6% (рівняння 3.14):

$$D = 0{,}133 – 0{,}0055 \cdot P \; ; \tag{3.13}$$

$$D = 0{,}12 – 0{,}001 \cdot K \; . \tag{3.14}$$

Так само за допомогою програмного забезпечення було отримано математичну модель для опису залежності зміни діаметра бульбашки D від кратності піни K і концентрації піноутворювача P:

$$D = 0{,}1434 – 0{,}0008 \cdot K – 0{,}0042 \cdot P. \tag{3.15}$$

Згідно методики [152] також було проведено планування експерименту з визначення впливу кратності K та концентрації піноутворювача P на стійкість піни S. Було отримано наступне лінійне рівняння:

$$S = 12{,}58 + 6{,}915 \cdot K + 1{,}75 \cdot P \, . \tag{3.16}$$

Розрахункове значення критерію Фішера для рівняння 3.16 менше за табличне, тобто модель адекватно описує процес, але згідно з [161], оцінку адекватності також було перевірено завядки використанню підходу Закгейма [162]. Результати перевірки показали, що для отриманого лінійного рівняння спостерігалися відхилення експериментальних значень від розрахункових у двох точках плану, що свідчить про те, що лінійне рівняння (3.16) неадекватно описує процес.

Згідно з [161], якщо математична модель, отримана за допомогою плану першого порядку, є неадекватною, то необхідно переходити до планів другого порядку. До таких планів відносяться ортогональні [163] і рототабельні плани [164].

Для побудови полінома другого порядку нами було використано метод, запропонований Г.Е.П. Боксом і К.Б. Вільсоном [165], згідно з яким використовували ортогональні плани першого порядку в якості ядра, на якому потім добудовували конструкцію плану другого порядку.

Користуючись табличними даними [160], було побудовано ортогональний план другого порядку для двох факторів, відображений у табл. 3.6. Як ядро було використано ортогональний план першого порядку, наведений в табл. 3.2.

Таблиця 3.6

Ортогональний план другого порядку для двох чинників

Дослід	x_o	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	y
Планування типу 2^k	+1 +1 +1 +1	–1 +1 –1 +1	–1 –1 +1 +1	1/3 1/3 1/3 1/3	1/3 1/3 1/3 1/3	+1 –1 –1 +1	y_1 y_2 y_3 y_4
Зоряні точки	+1 +1 +1 +1	–1 +1 0 0	0 0 –1 +1	1/3 1/3 –2/3 –2/3	–2/3 –2/3 1/3 1/3	0 0 0 0	y_5 y_6 y_7 y_8
Нульова точка	+1	0	0	–2/3	–2/3	0	y_9

Робоча матриця планування і результати експерименту, виконані у триразовій повторності, наведені в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Робоча матриця планування та результати досліджень

N досліду	К	Р, %	S, хв			$\bar{s}$, хв
	x_1	x_2	Паралельний дослід 1	Паралельний дослід 2	Паралельний дослід 3	$\bar{y}$
			y_1	y_2	y_3	
1	5	4	4,5	3,5	5,5	4,5
2	20	4	17	18,5	16	17,16
3	5	6	6	7,5	7	6,83
4	20	6	20,5	23	22	21,83
5	5	5	7	5	6	6
6	20	5	19,5	18	20	19,16
7	12,5	4	12	14	13,5	13,16
8	12,5	6	16,5	16,5	15,5	16,16
9	12,5	5	15,5	14,5	15	15

Розрахунок коефіцієнтів регресії проводили за наступною формулою:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^{n} x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^{n} x_{iu}^2} \quad . \tag{3.17}$$

Значення $\sum_{u=1}^{n} x_{iu}^2$ для типу ядра 2^2: x_o=9, x_i=6, x_{ij}=4, $x_i^{2-\varphi} = 2$:

$b_0 = 13{,}311;$ $b_1 = 6{,}803$; $b_2 = 1{,}666;$

$b_1^2 = -2{,}193;$ $b_2^2 = -0{,}139$; $b_{12} = 0{,}585.$

В результаті проведення експерименту **[4]** і обробки експериментальних даних було отримано математичну модель для опису залежності стійкості піни S від її кратності K і концентрації піноутворювача P:

$$S = 13{,}311 + 6{,}803 \cdot K + 1{,}666 \cdot P - 2{,}193 \cdot K^2 - 0{,}139 \cdot P^2 + 0{,}585 \cdot K \cdot P. \tag{3.18}$$

Перевіримо адекватність отриманої моделі (3.18), для цього розрахуємо дисперсію адекватності за формулою:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{m} (\bar{y_u} - y_u)^2}{n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}} \quad ; \tag{3.19}$$

$$s_{ад}^2 = 0{,}095 \; .$$

Перевірку адекватності здійснювали за критеріэм Фишера:

$$F = 0{,}08 < F_{(0.05;3;4)} = 6{,}59 \quad . \tag{3.20}$$

Таким чином, модель є адекватною експериментальним даним за

критерієм Фішера (рівняння (3.20)). Результати перевірки адекватності відповідно до підходу Закгейма наведені в табл. 3.8. Виходячи з результатів, видно, що в жодній з точок плану відхилення не перевищують заданих значень за допустимою точністю моделі 5 % і рівняння (3.18) адекватно описує процес.

Таблиця 3.8

Порівняння розрахункових та експериментальних даних стійкості піни S

N досліду	К	Р,%	$S_{експ., хв}$	$S_{розр., хв}$	Похибка, %
	x_1	x_2	$\overline{y}$	$y_{розр}$	
1	5	4	4,5	4,65	4
2	20	4	17,16	17,08	0,2
3	5	6	6,83	6,81	0,2
4	20	6	21,83	21,58	1,1
5	5	5	6	5,86	2,5
6	20	5	19,16	19,47	1,5
7	12,5	4	13,16	13,06	0,7
8	12,5	6	16,16	16,39	1,5
9	12,5	5	15	14,86	1

За допомогою програмного забезпечення було отримано наступну математична модель для опису залежності стійкості піни S від її кратності К і концентрації піноутворювача Р:

$$S= -8,8743+1,4919 \cdot К+1,825 \cdot Р -0,039 \cdot К^2+0,078 \cdot К \cdot Р- 0,1133 \cdot Р^2 . \quad (3.21)$$

Поверхню відгуку залежності стійкості компресійної піни S від її кратності К і концентрації піноутворювача Р наведена на рис. 3.5.

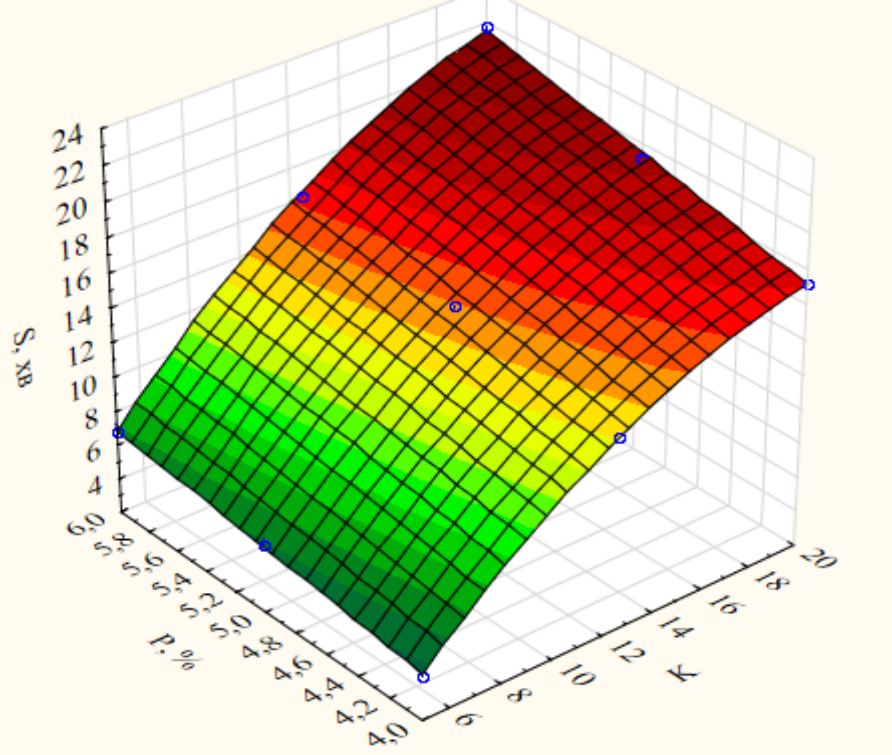


Рис. 3.5. Залежність стійкості піни S від її кратності К та концентрації піноутворювача Р

Аналізуючи поверхню відгуку на рис. 3.5, зрозуміло, що підвищення кратності піни К та збільшення концентрації піноутворювача Р суттєво підвищують стійкість піни S. Найменша стійкість піни S спостерігається при кратності піни К=5 та концентрації піноутворювача Р=4 % й дорівнює S=4,5 хв. Подальше збільшення кратності піни К до 12,5 та підвищення концентрації піноутворювача Р до 5 % супроводжується збільшенням стійкості S на у 2,9 рази та становить 13,2 хв. Під час збільшення кратності К від 5 на 75 % та підвищення концентрації піноутворювача до паспортної рекомендації виробника, яка дорівнює Р=6 %, має місце найбільша стійкість піни S, яка дорівнює 21,8 хв., що збільшилая від найменшого значення S=4,5 хв., тобто в 4,8 рази. Отже збільшення кратності дозволяє отримати більш стійку піну, яка, ймовірно, має більшу вогнегасноу ефективність, за рахунок стійкості бульбашок.

На рис. 3.6 наведено залежність стійкості компресійної S піни від її кратності К з концентрацією піноутворювача Р= 6 %.

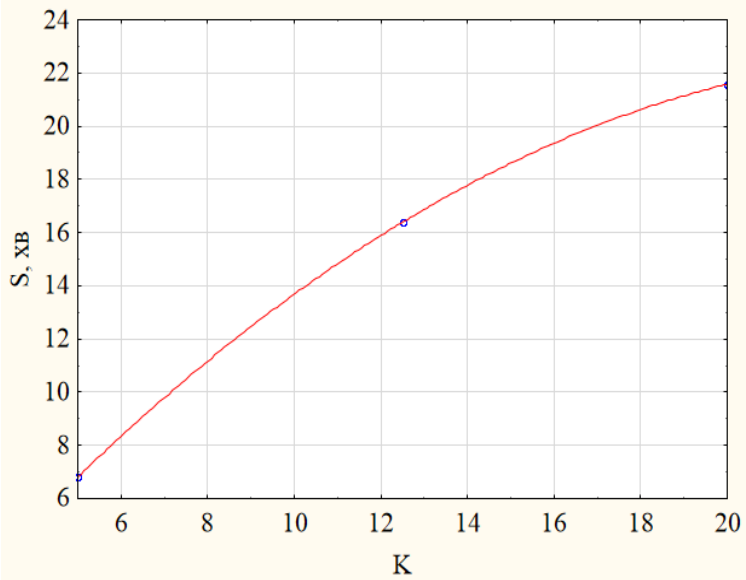


Рис. 3.6. Залежність стійкості компресійної піни S від її кратності К з концентрацією піноутворювача 6 %

Проаналізувавши залежність стійкості піни S від її кратності К на рис. 3.6 встановлено, що з підвищенням кратності піни К від 5 до 20, за концентрації водного розчину піноутворювача Р=6 %, відбувається збільшення стійкості піни S від 6,83 хв., до 21,83 хв., тобто в 3,2 рази.

На рис. 3.7 наведено залежність стійкості піни S від концентрації піноутворювача Р для кратності піни К= 20.

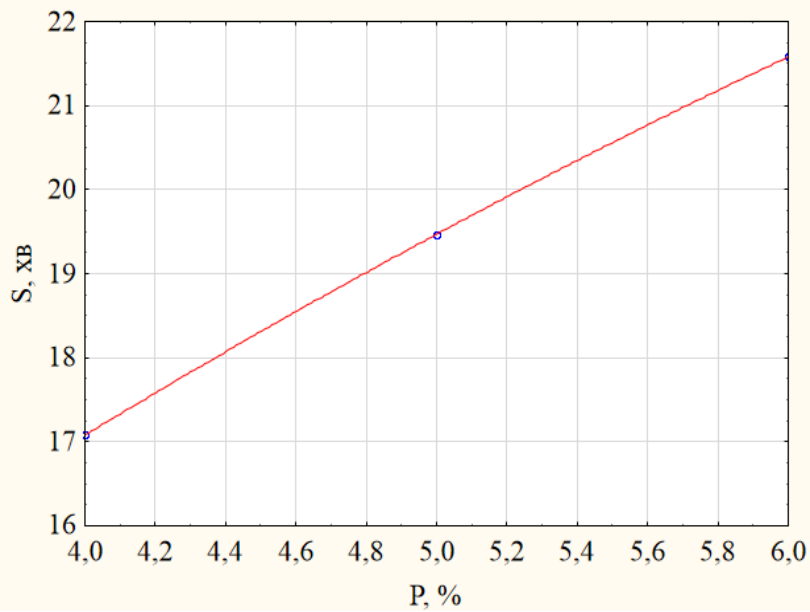


Рис. 3.7. Залежність стійкості компресійної піни S від концентрації піноутворювача Р із кратністю піни К=20

Аналізуючи графік на рис. 3.7, зрозуміло, що зі збільшенням концентрації піноутворювача Р підвищується її стійкість S; у цьому разі залежність має поліноміальний характер. Найнижча стійкість піни S спостерігається у піни з концентрацією водного розчину піноутворювача Р=4 % і дорівнює S=17,2 хв. Подальше підвищення концентрації піноутворювача Р до 6 % супроводжується збільшенням стійкості піни S до 21,8 хв, тобто на 26 %.

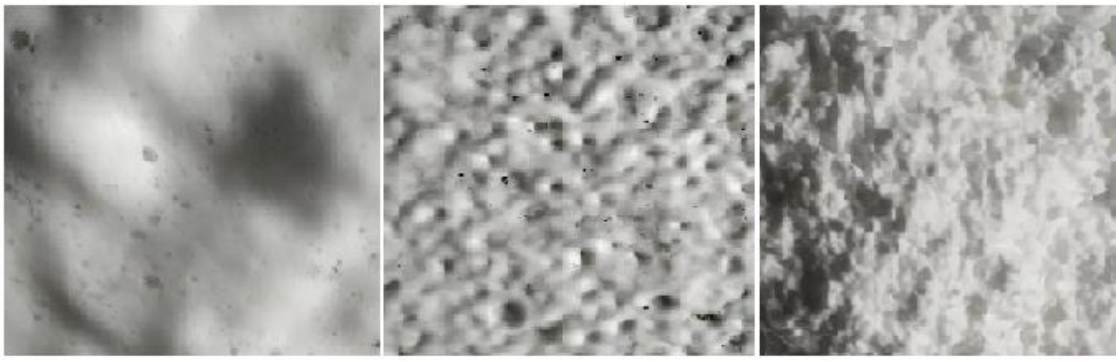
Отримано наступні рівняння регресії за довірчої ймовірності 0,95, які описують залежність стійкості піни S від концентрації піноутворювача Р при кратності піни К = 20 (рівняння 3.22) і від зміни кратності піни К за концентрації піноутворювача Р=6 % (рівняння 3.23):

$$S = 4{,}72+3{,}65\cdot P - 0{,}14\cdot P^2 ; \qquad (3.22)$$

$$S = -2{,}0333+1{,}9647\cdot K - 0{,}0392\cdot K^2 . \qquad (3.23)$$

2. Однорідність піни Ф, тобто малий розкид розмірів бульбашок, що її утворюють, є важливою властивістю піни, що забезпечує її високу вогнегасну ефективність. Відповідно до рівняння Юнга–Лапласа [94] величина тиску повітря всередині бульбашки є обернено пропорційною до її діаметра, тому при контакті бульбашок різного розміру має місце перетікання повітря з малої бульбашки у більшу з утворенням нової збільшеної бульбашки, яка, внаслідок збільшення діаметра має меншу стійкість. Отже, підвищення стійкості пов'язане з особливістю фізичних процесів самої технології генерування піни і в основному пояснюється двома причинами: зміною розмірів бульбашок та їх однорідністю. Дослідники [166] стверджують, що «піна доброї якості є однорідною, складається з дуже маленьких бульбашок, які, наприклад, мають середній еквівалентний діаметр в інтервалі від 0,5 до 1 мм».

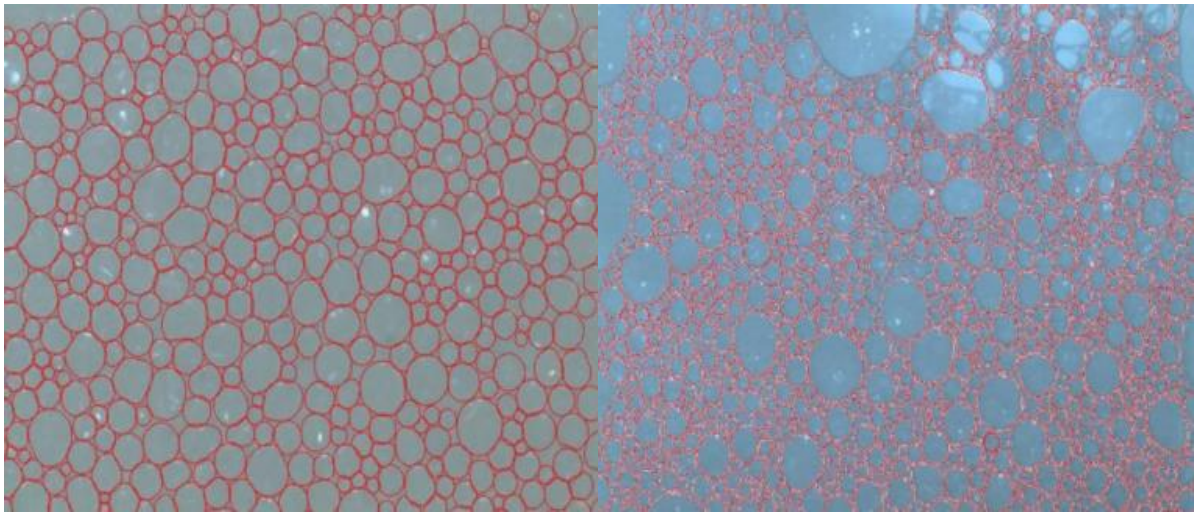
Методика досліджень впливу кратності піни К на однорідність Ф полягала у наступному [**13**]. В якості змінного параметра використовували кратність піни К. Було проведено три серії дослідів для пін різної кратності: серія №1 – кратність піни К= 20, серія №2 – кратність піни К=12,5, серія № 3 – кратність піни К=5. Після отримання піни, її частиною заповнювали чашку Петрі та поміщали під мікроскоп МСБ–9. Використовуючи координатну сітку мікроскопа, проводили підрахунок кількості бульбашок, які перетнули координатну вісь у будь-якому напрямку на відстані 1 мм. Фотографії отриманих пін різної кратності подано на рис. 3.8.



кратність 5 кратність 12,5 кратність 20

Рис. 3.8. Фотографії піни різної кратності

На рис. 3.9 наведено реальні фотографії бульбашок компресійної (а) та повітряно-механічної піни (б) кратністю К=20. З фотографій зрозуміло, що розкид розмірів бульбашок, з яких утворена компресійна піна, нижче, ніж розкид між бульбашками повітряно-механічної піни. Тобто компресійна піна є більш однорідною.



(а) (б)

Рис. 3.9. Фото бульбашок компресійної (а) та повітряно-механічної (б) піни кратністю К=20

Результати виміріювання розмірів бульбашок наведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9

Результати вимірюваня розмірів бульбашок компресійної піни

№	Серія № 1			Серія № 2			Серія № 3		
	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці	Діапазон діаметрів, мм		Кількість у вибірці
	min	max		min	max		Min	max	
1	0,089	0,091	3	0,09	0,094	5	0,045	0,06	1
2	0,091	0,093	1	0,094	0,099	4	0,06	0,075	5
3	0,093	0,095	9	0,099	0,103	12	0,075	0,09	13

Продовження табл. 3.9

4	0,095	0,097	11	0,103	0,108	15	0,09	0,105	24
5	0,097	0,1	23	0,108	0,112	29	0,105	0,12	26
6	0,1	0,102	20	0,112	0,116	15	0,12	0,135	13
7	0,102	0,104	21	0,116	0,121	7	0,135	0,15	9
8	0,104	0,106	7	0,121	0,125	10	0,15	0,165	11
9	0,106	0,108	10	0,125	0,13	4	0,165	0,18	5
10	0,108	0,111	2	0,13	0,134	1	0,18	0,196	1
Всього бульбашок у мм^2 для серії №1			110	Всього бульбашок у мм^2 для серії №2		102	Всього бульбашок у мм^2 для серії №3		108

Результати обробки даних табл. 3.9 щодо розподілу бульбашок за діаметрами у піні різної кратності подано на рис. 3.10.

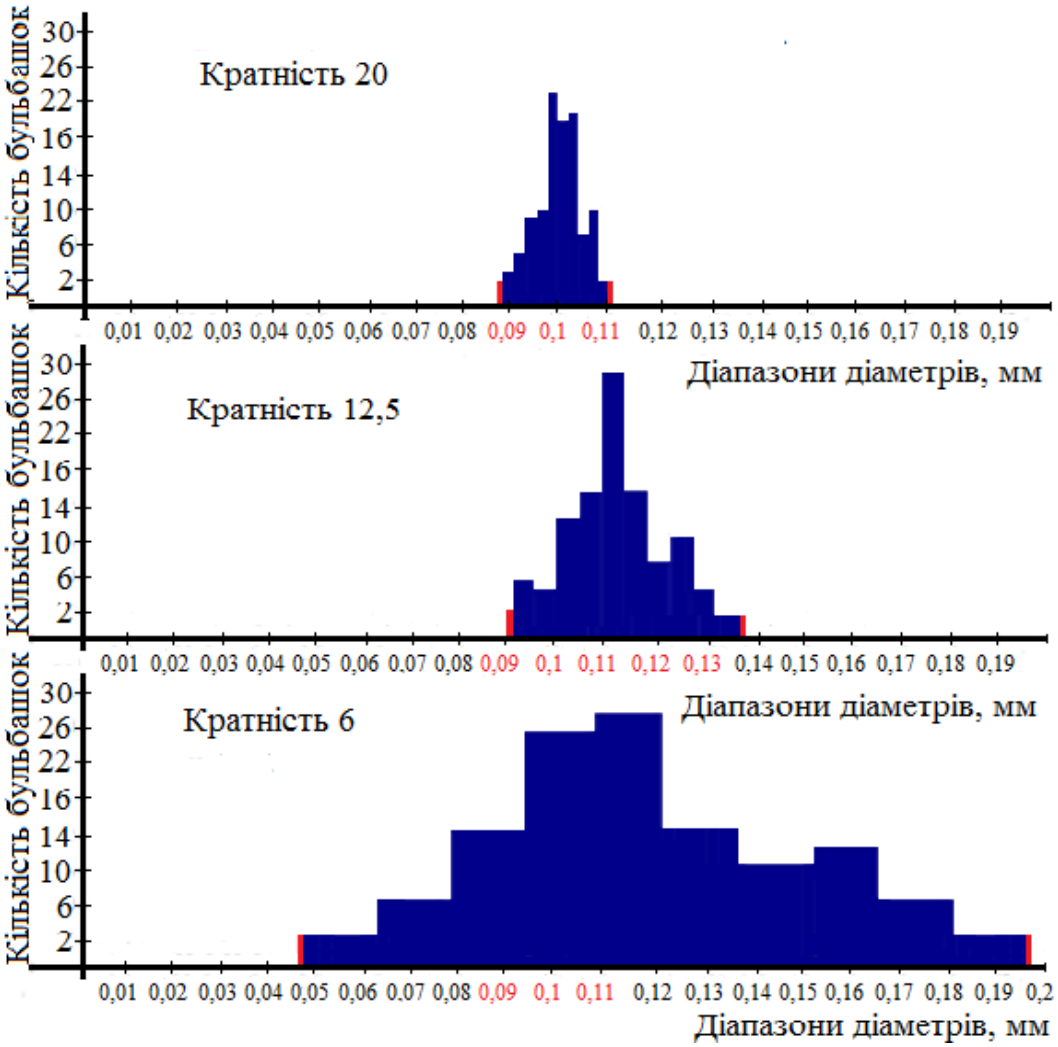


Рис. 3.10. Гістограми розподілу бульбашок за діаметрами під час генерування компресійної піни різної кратності

Аналізуючи дані табл. 3.9 та гістограми на рис. 3.10, видно, що загалом діапазон діамтреів бульбашок відповідає нормальному закону розподілення. Водночас, найбільша кількість різних розмірів бульбашок спостерігалась при кратності піни К=5, де діапазон діаметрів склав від 0,05 мм до 0,19 мм. Під час визначення діапазону розмірів бульбашок для піни кратністю К=12,5 діаметри бульбашок знаходилися в межах від 0,09 мм до 0,13 мм, що на 66 % менше, у порівнянні з діапазоном діаметрів для піни кратністю К=5. Найбільша однорідність бульбашок спостерігалась для піни кратністю К=20, де діапазон діаметрів перебував у межах від 0,09 мм до 0,11 мм. У зівставленні з розбіжністю розмірів бульбашок піни кратністю К=5 зменшення відбулося на 80 %. Виходячи з аналізу даних, зрозуміло, що з підвищенням кратності компресійної піни відбувається зменшення розбіжностей розмірів бульбашок. Це свідчить про те, що зі збільшенням кратності піни її однорідність зростає.

3.2. Експериментальні дослідження впливу кратності та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для генерування компресійної піни, на її вогнегасну ефективність під час гасіння нестандартизованих вогнищ пожеж класу А

Під час гасіння піною твердих горючих речовин головним механізмом припинення процесу горіння є охолодження. У цьому разі шар піни, нанесений на поверхню матеріалу, екранує зовнішній променистий тепловий потік, який падає від непогашених ділянок, сусідніх поверхонь, що горять і тощо. Поступово руйнуючись, піна виділяє розчин піноутворювача, який просочується у горючий матеріал і знижує його температуру. Оскільки розчин піноутворювача має нижчий поверхневий натяг, ніж вода, він має більшу просочувальну здатність [23].

З експериментальних досліджень **[12–13]** встановлено, що від кратності піни та концентрації піноутворювача у водному розчині, використовуваному

для її генерування залежать такі властивості піни: стійкість S, дисперсність D і однорідність Ф. Отже від вищеперерахованих параметрів залежить і її вогнегасна ефективність. Технологія генерування компресійної піни дозволяє чітко регулювати її кратність та концентрацію піноутворювача. З проведеного аналізу **[1]** з'ясовано, що кожен з відомих світових виробників систем пожежогасіння компресійною піною пропонує різні співвідношення рідкої та повітряної фаз і концентрацію піноутворювача. На шляху ефективного застосування компресійної піни постає проблема, що полягає у відсутності теоретичного підходу та практичних досліджень, які науково обґрунтовують вплив зміни кратності К і концентрації піноутворювача Р на її вогнегасну ефективність. Це зумовлює необхідність в проведенні експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення впливу цих параметрів на її вогнегасну ефективність та визначення, за якої кратності та концентрації піноутворювача компресійна піна має найбільшу вогнегасну здатність під час гасіння твердих горючих речовин.

Аналіз дозволив встановити, що для визначення вогнегасної ефективності речовин використовують наступні показники:

1) показник вогнегасної здатності $П_{в.з.}$ [167, 168]. Під час гасіння твердих горючих речовин цей показник визначається масою вогнегасної речовини m, що припадає на одиницю площі модельного вогнища пожежі S, достатньої для впевненого гасіння в ньому в умовах стандартного експерименту. Підвищенню ефективності пожежогасіння відповідає зменшення чисельного значення показника вогнегасної здатності.

2) Показник ефективності гасіння $П_{е.г}$ [20, 23].

Показник ефективності гасіння розраховується за формулою:

$$П_{е.г} = \frac{S_{п}}{G_{в.р}\tau}, \qquad (3.24)$$

де $S_п$ – площа пожежі; $G_{в.р}$ – сумарна кількість вогнегасної речовини, використаної за час τ.

Кількість вогнегасної речовини визначається через інтенсивність подавання та проміжок часу за формулою:

$$G_{в.р} = IS_п\tau \ . \tag{3.25}$$

Підставивши вираз (3.25) у формулу (3.24), отримуємо більш зручний для аналізу і розрахунків вираз:

$$П_{е.г} = \frac{1}{I\tau^2} \ . \tag{3.26}$$

Виходячи з [20], одним з параметрів, що характеризують процес гасіння піною, є інтенсивність її подавання $I_п$ – об'єм водного розчину піноутворювача або піни, який подається на одиницю площі пожежі в секунду.

$$I_П = \frac{V_п}{S_п\tau} , \tag{3.27}$$

де $V_п$ – об'єм піни; $S_п$ – площа пожежі; τ – тривалість гасіння.

Використовуючи формулу (3.27) і підставивши її у формулу (3.26), отримуємо вираз для проведення розрахунків показника ефективності гасіння:

$$П_{е.г} = \frac{S_п}{V_п\tau} \ . \tag{3.28}$$

У зв’язку з тим, що така величина як об’єм піни $V_п$ не є стійкою і змінюється з часом, вирішено перетворити **[14]** формулу (3.28), для розрахунків, використовуючи такий параметр як кратність піни К. Зазначений параметр дослідник може задавати самостійно, в залежності від типу піни, яку необхідно отримати. Кратність піни визначається за формулою (1.1).

Використовуючи формулу (1.1), перетворивши її й підставивши у формулу (3.28), отримуємо остаточний вираз для проведення експериментальних розрахунків показника ефективності гасіння $П_{е.г}$:

$$П_{е.г} = \frac{S_п}{К_п V_р \tau}, \qquad (3.29)$$

де $S_п$ – площа пожежі; $К_п$ – кратність піни; $V_р$ – об’єм рідини, з кого отимана піна; τ – час, використаний на гасіння вогнища.

Гасіння нестандартизованого (лабораторного) модельного вогнища пожежі класу А. Як лабораторне вогнище пожежі класу А був обраний [**14**] штабель з 32 брусків розміром (20× 20× 150) мм, покладених у 8 шарів по 4 бруски в кожному. Відстань між брусками в ряду 20 мм. Загальна площа брусків складає 0,41 м^2. Відкрита поверхня горіння вогнища (після віднімання площ перекриття брусків) становить 0,32 м^2. Це лабораторне вогнище пожежі класу А широко використовується при лабораторних визначеннях показника вогнегасної здатності різних вогнегасних засобів [169–171]. Як горючий матеріал було обрано деревину. На рис. 3.11 наведено фото лабораторного вогнища та процес його розпалювання.

а) б)

Рис. 3.11. Лабораторне модельне вогнище пожежі: а) загальний вигляд лабораторного модельного вогнища; б) горіння лабораторного модельного вогнища

Процедура розпалювання лабораторного модельного вогнища пожежі полягала у наступному. На металеву підставку встановили та закріпили лабораторне модельне вогнище пожежі. Після чого під підставку встановили деко діаметром 12 см, в яке на шар води наливали 30 мл бензину А–92. Бензин підпалювали. Після його повного вигоряння (~ 3 хвилини) ємність із бензином прибирали з-під вогнища. Тривалість вільного горіння штабеля було обрано так, щоб зниження маси штабеля за рахунок горіння становив нормативне значення – 45 % [172]. Загальний проміжок часу вільного горіння модельного вогнища становив ~ 7 хв. На рис 3.12 наведено фото лабораторного модельного вогнища після 5 хвилин вільного горіння.

Рис. 3.12. Вигляд лабораторного вогнища після 7 хвилин вільного горіння

Згідно [160] для реалізації мети був спланований ПФЕ типу 2^k з допустимою точністю моделі 5 відсотків, в якому в якості чинників були обрані кратність компресійної піни К (x_1) і концентрація піноутворювача Р (x_2) у водному розчині.

Метою експерименту було вивчення впливу кратності піни К і концентрації піноутворювача Р в водному розчині, на вогнегасну ефективність компресійної піни, яка оцінювалася за двома показниками:

– показником вогнегасної здатності $П_{в.з}$;

– показником ефективності гасіння $П_{е.г}$.

В якості функції відгуку для розрахунку показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$, було взято масу водного розчину піноутворювача $m_р$, витрачену на гасіння вогнища.

Як відгуки функцій для показника ефективності гасіння було взято:

– об’єм водного розчину піноутворювача $V_р$, витраченого на гасіння;

– тривалість гасіння τ компресійною піною.

Оскільки густина води та водного розчину піноутворювача у піни відрізняються не суттєво, а масою повітря в піні можна знехтувати, у плані прийнято рішення використовувати в якості функції відгуку $m_р$ також і для показника ефективності гасіння.

Для проведення дослідів використовували експериментальний зразок системи для генерування і подавання компресійної піни [**11**]. Масу розчину піноутворювача визначали шляхом зважування ємності, заповненої до початку гасіння вогнища і після повного припинення горіння. Проміжок часу фіксували за допомогою секундоміра. Кратність піни регулювали за допомогою вентиля подавання повітря на стволі.

Проведений аналіз **[1**–**2**] дозволив встановити, що компресійна піна є піною низької кратності. У роботах [**12, 13**] встановлено, що з підвищенням кратності піни К відбувається збільшення її однорідності Ф і стійкості S. Найменьша стійкість та однорідність піни спостерігались для піни кратністю К=10, тому, з урахуванням отриманих у розділі 3.1 результатів, перед проведенням експерименту положення вентиля ствола регулювали для отримання робочої кратності піни К = (15; 20; 25).

Був використаний піноутворювач загального призначення «БАРС – S». Робочий діапазон концентрації піноутворювача Р у воді становив від 4 % до 6 %. Змішування піноутворювача і води в певній пропорції відбувалося у робочому балоні системи для генерування і подавання компресійної піни заздалегідь перед гасінням. Далі за допомогою відрегульованого ствола здійснювали гасіння вогнища пожежі. Струмінь компресійної піні спочатку спрямовували на фронтальну поверхню лабораторного вогнища. Далі, згідно порядку проведення випробувань [172], продовжували гасіння, спрямовуючи струмінь на верхню, нижню й бічну поверхні (за винятком тильної поверхні).

На рис. 3.13 представлено фото процесу гасіння лабораторного вогнища пожежі.

Рис. 3.13. Процес гасіння модельного вогнища пожежі компресійною піною

На рис. 3.14 подано фото лабораторного модельного вогнища пожежі після гасіння компресійною піною.

Рис 3.14. Лабораторне модельне вогнище пожежі, погашене компресійною піною кратністю 20

Згідно [172] вичікували 10 хвилин після ліквідації полум'я у лабораторному модельному вогнищі пожежі, і вважали його погашеним, якщо протягом цього часу видиме полум'я у ньому відсутнє. Поява короткочасних спалахів протягом зазначеного часу після закінчення гасіння не бралась до уваги.

На основі аналізу апріорної інформації був зроблений вибір експериментальної області чинникового простору. Згідно [160], як нульовий рівень чинників був обраний центр інтервалу, в якому планувалося проводити дослідження. Так само було обрано інтервали варіювання, значення верхнього і нижнього рівнів чинників у натуральному і кодованому вираженні. Значення рівнів чинників та інтервали варіювання наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10

Значення рівнів чинників та інтервали варіювання

Найменування чинника	Рівень та значення чинника у досліді			Інтервал варіювання
	+1	0	–1	
Кратність компресійної піни К	25	20	15	5
Концентрація піноутворювача у розчині Р, %	6	5	4	1

У випадку складання плану-матриці ПФЕ типу 2^k використовувався ортогональний план першого порядку [160]. До плану було введено стовпець x_1x_2, який дозволяв оцінити коефіцієнт регресії під час взаємодії чинників К та Р.

Після проведення дослідів було виконано статистичну обробку результатів згідно методики [160]. Відтворюваність процесу перевіряли за критерієм Кохрена за формулою (3.1). Дисперсію відтворюваності (помилку досліду) визначали за формулою (3.3). Під час реалізації експерименту було

виконано три визначення величин y та z. Тому значення оцінок дисперсії в кожній точці плану розраховували за формулою (3.1).

Це дозволило отримати наступні моделі:

$$m_p = 0{,}795 - 0{,}105 \cdot K - 0{,}0675 \cdot P \,, \tag{3.30}$$

$$\tau = 11{,}7775 - 2{,}875 \cdot K \,. \tag{3.31}$$

Перевірка адекватності лінійних моделей виконувалась за отриманим рівнянням регресії (3.30) та (3.31) за допомогою критерію Фішера, за нерівністю (3.11). За критерієм Фішера лінійна модель є адекватною.

Але під час оцінки значущості коефіцієнтів рівнянь за критерієм Стьюдента у моделі, яка описує вплив чинників К та Р на тривалість гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, коефіцієнт чинника Р та коефіцієнт взаємодії чинників К та Р вважаються незначущими. Також у лінійному рівнянні, яке описує вплив чинників К та Р на масу водного розчину піноутворювача, необхідного для гасіння лабораторного вогнища, коефіцієнт взаємодії чинніків К та Р так само вважається незначущим. Згідно [160] незначущий коефіцієнт при чиннику означає, що зазначений чинник не впливає (або впливає у незначній мірі). Однак на величину коефіцієнта регресії впливає не тільки роль даного чинника, але також обраний інтервал варіювання. З цього статистичний сигнал про незначущисть чинника повинен бути перевірений або хоча б обговорений з технологічної точки зору. Відомо з експериментальних досліджень і апріорної інформації [130], що концентрація піноутворювача та її збільшення в розчині в певному робочому діапазоні справляє позитивний ефект на властивості компресійної піни, такі як її стійкість і дисперсність. Також у дослідженні [130] експериментально підтверджено, що від концентрації піноутворювача у водному розчині залежить кратність компресійної піни. Згідно ідеї крокового пошуку було прийнято рішення **[14]** продовжити експеримент, з

метою подання функції відгуку у вигляді квадратичного рівняння з урахуванням усіх коефіцієнтів чинників як значущих. Виходячи з цього, дотримуючись ідеї крокової процедури, необхідно побудувати план другого порядку. В нашому випадку був використаний ортогональний план другого порядку. Раніше отримані результати дослідів було використано в якості ядра планування. Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі наведено в табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі

Дослід	x_o	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	Y	z
Планування типу 2^k	+1	–1	–1	1/3	1/3	+1	y_1	z_1
	+1	+1	–1	1/3	1/3	–1	y_2	z_2
	+1	–1	+1	1/3	1/3	–1	y_3	z_3
	+1	+1	+1	1/3	1/3	+1	y_4	z_4
Зоряні точки	+1	–1	0	1/3	–2/3	0	y_5	z_5
	+1	+1	0	1/3	–2/3	0	y_6	z_6
	+1	0	–1	–2/3	1/3	0	y_7	z_7
	+1	0	+1	–2/3	1/3	0	y_8	z_8
Нульова точка	+1	0	0	–2/3	–2/3	0	y_9	z_9

Далі було продовжено експеримент з виміру маси розчину піноутворювача компресійної піни m_p і тривалості гасіння τ компресійною піною для побудови полінома другого порядку. Робоча матриця планування та отримані результати експерименту наведені в табл. 3.12.

Таблиця 3.12

Робоча матриця планування та отримані результати експерименту

N	K	P,	Маса розчину m_p, кг				Тривалість гасіння τ, с			
	x_1	x_2	1	2	3	$\overline{m}$	1	2	3	$\overline{\tau}$
			m_1	m_2	m_3		τ_1	τ_2	τ_3	
1	15	4	1,03	0,96	0,98	0,99	15,2	14,7	15,1	15
2	25	4	0,73	0,68	0,75	0,72	8,8	9,35	9,2	9,15
3	15	6	0,8	0,76	0,825	0,795	14,9	13,9	14,1	14,3
4	25	6	0,625	0,675	0,635	0,645	8,3	8,8	8,8	8,66
5	15	5	0,83	0,885	0,895	0,87	15,2	13,4	14,9	14,5

Продовження табл. 3.11

6	25	5	0,745	0,65	0,69	0,695	8,7	9,45	9	9,05
7	20	4	0,935	0,87	0,88	0,895	9,87	10,9	9,83	10,2
8	20	6	0,805	0,74	0,75	0,765	8,8	10,1	8,94	9,28
9	20	5	0,865	0,81	0,83	0,835	10,4	8,18	10,7	9,76

Розрахунок коефіцієнтів регресії за результатами експерименту проводили за формулою (3.27). Результати розрахунків коефіцієнтів регресії наведені в табл. 3.13.

Таблиця 3.13

Отримані коефіцієнти регресії для моделей

Залежність маси водного розчину піноутворювача, необхідної для гасіння лабораторного вогнища, від кратності піни і концентрації ПУ	Залежність проміжку часу, необхідного для гасіння лабораторного вогнища, від кратності КП і концентрації ПУ
$b_0 = 0,801$	$b_0 = 11,1$
$b_1 = -0,09916$	$b_1 = -2,82$
$b_2 = -0,0666$	$b_2 = -0,3516$
$b_1^2 = -0,045$	$b_1^2 = 2,028$
$b_2^2 = 0,001$	$b_2^2 = -0,005$
$b_{1,2} = 0,03$	$b_{1,2} = 0,0525$

Отримані наступні рівняння регресії:

1) Поліном другого ступеня, який описує залежність маси водного розчину піноутворювача m_p, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі від її кратності К і концентрації піноутворювача Р:

$$m_{p.} = 0,801 - 0,09916 \cdot К - 0,0666 \cdot Р - 0,045 \cdot К^2 + 0,001 \cdot Р^2 + 0,03 \cdot К \cdot Р . \quad (3.32)$$

2) Квадратичне рівняння залежності проміжку часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі компресійною піною, від її кратності К та концентрації піноутворювача Р:

$$\tau = 11{,}1 - 2{,}82 \cdot К - 0{,}3516 \cdot Р + 2{,}028 \cdot К^2 - 0{,}005 \cdot Р^2 + 0{,}0525 \cdot К \cdot Р \,. \qquad (3.33)$$

Перевірка адекватності квадратичної моделі за рівняннями (3.32) та (3.33) наведена в табл. 3.14.

Таблиця 3.14

Перевірка адекватності квадратичної моделі

Номер досліду N	$\overline{m}$	$m_{роз.}$	$\overline{\tau}$	$\tau_{роз.}$	$\left(\overline{m} - m_{роз}\right)^2$	$\left(\overline{\tau} - \tau_{роз}\right)^2$
1	0,99	0,982	15	14,99	0,000064	0,001
2	0,72	0,723	9,15	9,2	0,000009	0,0025
3	0,795	0,788	14,3	14,19	0,000049	0,0121
4	0,645	0,650	8,66	8,65	0,000025	0,001
5	0,87	0,884	14,5	14,4	0,000196	0.01
6	0,695	0,686	9,05	9,15	0,000081	0,01
7	0,895	0,897	10,2	10,15	0,000004	0,0025
8	0,765	0,764	9,28	9,31	0,000001	0,0009
9	0,835	0,830	9,76	9,86	0,000025	0,01

Дисперсії адекватності розраховували за формулою (3.19):

для рівняння (3.32): $s^2_{ад}y = 0{,}00037$;

для рівняння (3.33): $s^2_{ад}z = 0{,}016$.

Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F_y = 0{,}01 < F_{(0{,}05;3;4)} = 6{,}59 \,, \qquad (3.34)$$

$$F_z = 0{,}256 < F_{(0{,}05;3;4)} = 6{,}59 . \qquad (3.35)$$

Розрахункове значення критерію Фішера менше, ніж табличне, як можна бачити з рівнянь (3.34) та (3.35), тому отримані квадратичні моделі адекватно описують процес. За результатами досліджень на основі отриманих даних побудовані графіки залежностей маси водного розчину піноутворювача m_p і тривалості гасіння τ лабораторного вогнища від впливу кратності піни К та концентрації піноутворювача у водному розчині Р для діапазону параметрів наведених у табл. 3.10.

На рис. 3.15 наведено поверхність відгуку залежності маси розчину піноутворювача m_p компресійної піни, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності піни К та концентрації ПУ у розчині Р.

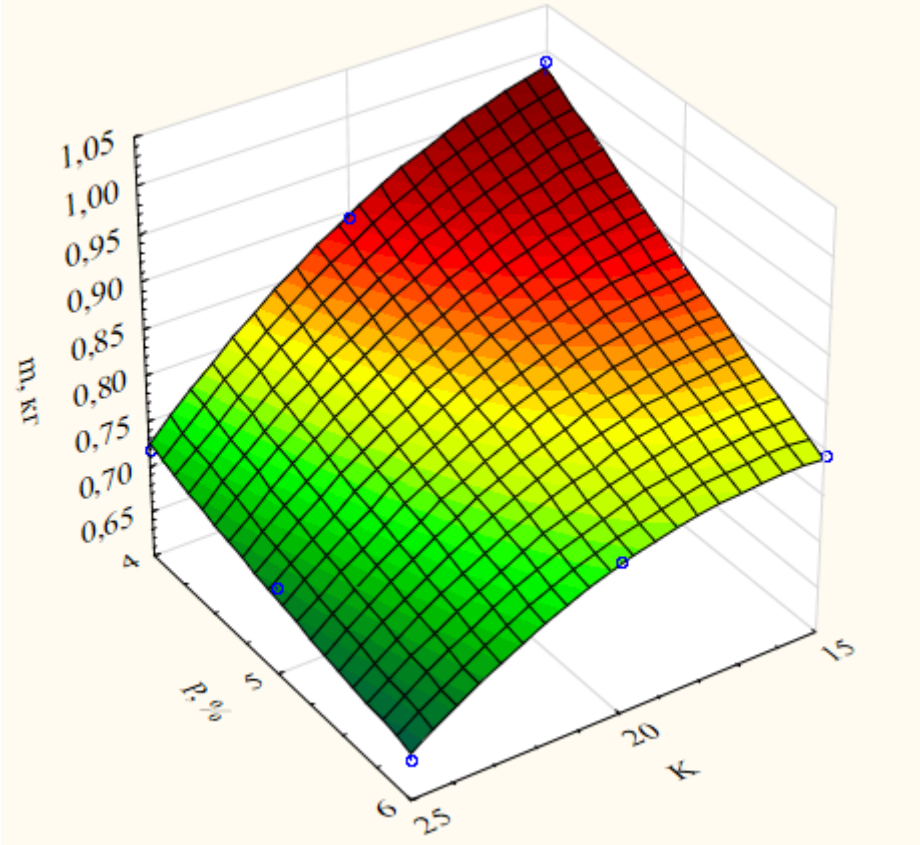
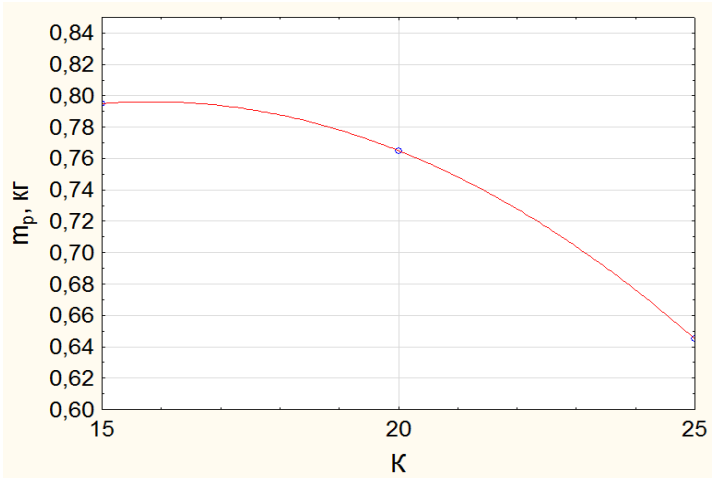


Рис. 3.15. Залежність маси розчину піноутворювача m_p компресійної піни, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності піни К та концентрації ПУ в розчині Р

Отримана поверхня відгуку залежності маси розчину піноутворювача $m_р$ від зміни кратності піни К та концентрації піноутворювача у розчині Р зображує, що мінімальна маса водного розчину піноутворювача спостерігається при верхніх рівнях чинників. За мінімальних значень кратності піни 15 і концентрації піноутворювача 4 % маса водного розчину піноутворювача, якою було погашено лабораторне модельне вогнище, склала 0,99 кг. За підвищення значення чинників до верхнього рівня (табл. 3.10) спостерігалося зниження маси на 35 % від значення, отриманого на нижньому рівні факторів, і склало 0,645 кг. За допомогою програмного забезпечення отримано наступне квадратичне рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_р = 1{,}4689+0{,}0235\cdot К–0{,}2033\cdot Р–0{,}0018\cdot К^2+0{,}006\cdot К\cdot Р+0{,}0017\cdot Р^2 . \quad (3.36)$$

На рис. 3.16 зображено графік залежності маси водного розчину піноутворювача $m_р$, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності компресійної піни К з концентрацією піноутворювача Р=6 %.



.

Рис. 3.16. Залежність маси водного розчину піноутворювача $m_р$, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності компресійної піни К з концентрацією піноутворювача Р=6 %

Як видно з графіка на рис. 3.16, за підвищення кратності компресійної піни К маса водного розчину піноутворювача $m_р$, необхідна для гасіння вогнища, зменшується. Це свідчить про те, що в робочому діапазоні кратності компресійної піни від 15 до 25 збільшення кратності дозволяє знизити масу розчину піноутворювача, необхідну для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі. Це надає позитивний ефект з економічної точки зору на раціональну витрату вогнегасної речовини. У програмному забезпеченні отримано рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_р = 0{,}345+0{,}057\cdot К–0{,}0018\cdot К^2 . \qquad (3.37)$$

На рис. 3.17 зображено графік залежності маси водного розчину піноутворювача $m_р$, кратністю К=25, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від концентрації ПУ у розчині Р.

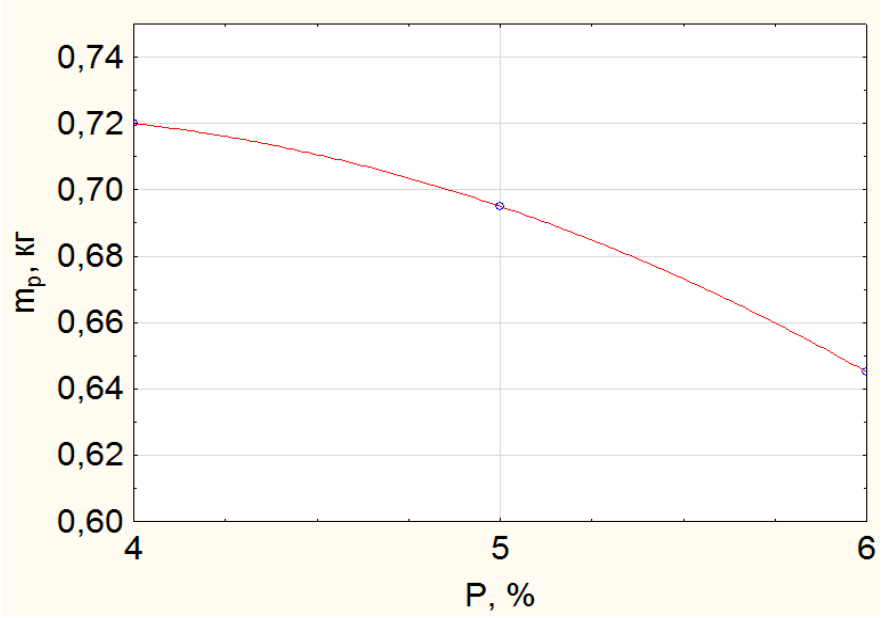


Рис. 3.17. Залежність маси водного розчину піноутворювача m_p, кратністю піни 25, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від концентрації ПУ в розчині Р

Аналізуючи графік на рис. 3.17, зрозуміло, що зміна концентрації піноутворювача Р у водному розчині має незначний вплив на зміну маси розчину піноутворювача m_p, необхідної для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі. Збільшення концентрації піноутворювача Р від 4 % до 5 % призводить до зниження маси розчину піноутворювача m_p на 5 %, а при 6 %-й концентрації піноутворювача Р маса знижується на 10 %. Це означає, що для генерування компресійної піни оптимальною є та сама концентрація піноутворювача у водному розчині, яку виробник рекомендує для генерування повітряно-механічної піни з використанням ежекційних генераторів піни низької та середньої краонтсті (у цьому випадку це 6 %). Отримано рівняння, яке описує дану залежність:

$$m_p = 0{,}57+0{,}0875\cdot P-0{,}0125\cdot P^2 . \qquad (3.38)$$

На рис. 3.18 наведено поверхню відгуку, яка відображає залежність проміжку τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища поежежі, від кратності піни К та концентрації ПУ у водному розчині Р.

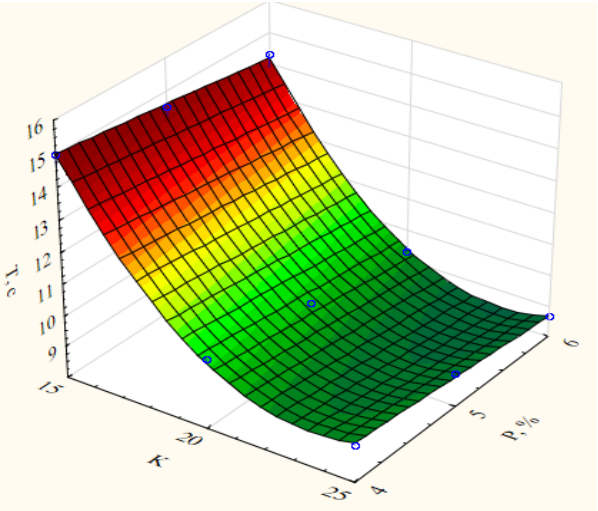


Рис. 3.18. Залежність часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності піни К та концентрації ПУ у водному розчині Р

Виконавши аналіз поверхні відгуку зміни тривалості гасіння лабораторного модельного вогнища τ від кратності піни К і концентрації піноутворювача у водному розчині Р (рис. 3.18), відзначимо, що тривалість гасіння зменшується за збільшення кратності піни К і збільшення концентрації піноутворювача у водному розчині Р. При цьому збільшення кратності К від 15 до 20 суттєво впливає на тривалість гасіння і знижує його на 20 %. Мінімальна тривалість гасіння для верхніх рівнів факторів (табл. 3.10) становить 8,6 секунди. Під час аналізу зміни концентрації піноутворювача Р у водному розчині встановлено, що змінювання концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 %, незначною мірою впливає на тривалість гасіння модельного вогнища і знижує її загалом на 10 % Залежність описана поліноміальною моделлю:

$$\tau = 56{,}2067 - 3{,}8652 \cdot К - 0{,}5117 \cdot Р + 0{,}0812 \cdot К^2 + 0{,}0105 \cdot К \cdot Р - 0{,}005 \cdot Р^2 . \quad (3.39)$$

На рис. 3.19 зображено графік проміжок часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності компресійної піни К з концентрацією ПУ Р=6 %.

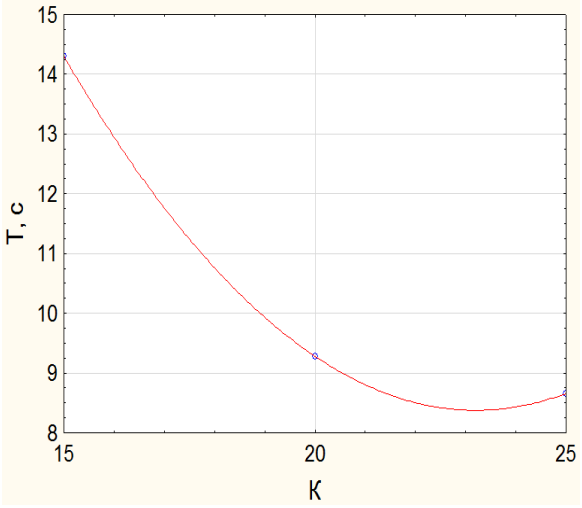


Рис. 3.19. Залежність проміжку часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від кратності К компресійної піни за концентрації Р ПУ у водному розчині 6 %

Проаналізувавши графік залежності тривалості гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі τ, який зображено на рис. 3.19, від впливу кратності піни К при 6 %-й концентрації піноутворювача Р у водному розчині, встановлено, що найбільша тривалість гасіння, а саме 14,3 секунди, спостерігається при робочій кратності піни К=15. Підвищення кратності піни від 15 до 20 суттєво впливає на тривалість гасіння, яка складає 9,23с, що на 20 % менше від тривалості гасіння піною кратністю 15. Суттєві зміни за підвищення кратності від 20 до 25 не спостерігались та становлять лише 2 %. Регресійна модель, яка описує цю залежність:

$$\tau = 55{,}76 - 4{,}084 \cdot K + 0{,}088 \cdot K^2 \quad . \qquad (3.40)$$

На рис. 3.20 наведено графік залежності проміжку часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від концентрації піноутворювача Р у водному розчині, при кратності піни К=25.

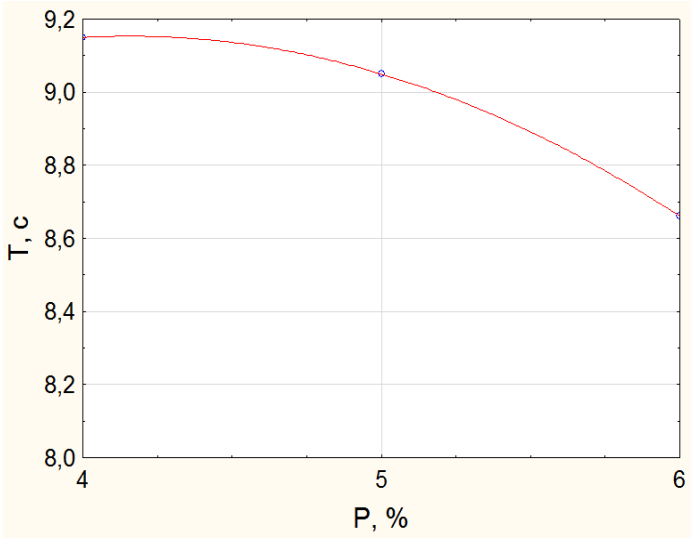


Рис. 3.20. Залежність проміжку часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі, від концентрації піноутворювача Р у водному розчині, при кратності піни К=25

Залежність тривалості гасіння τ від концентрації піноутворювача Р у водному розчині наведено на рис. 3.20. Із графіка зрозуміло, що суттєвого впливу зміна концентрації піноутворювача Р на тривалість гасіння τ не справляє. Але найбільша вогнегасна ефективність, яка визначалась проміжком часу, спостерігається під час робочої концентрації піноутворювача 6 %. Це, у свою чергу, підкреслює, що цей піноутворювач слід використовувати згідно з паспортними рекомендаціями у співвідношенні 6/94. Поліноміальна модель залежності тривалості гасіння τ від концентрації піноутворювача Р описується такою формулою:

$$\tau = 6{,}65+1{,}205\cdot P-0{,}145\cdot P^2 \quad . \qquad (3.41)$$

Результати проведених досліджень, щодо визначення впливу складу компресійної піни на її вогнегасну ефективність, свідчать, що підвищення кратності К супроводжується суттєвим зменшенням витрати маси розчину піноутворювача $m_р$ та проміжку часу τ, необхідного для гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі.

3.3. Визначення показників ефективності гасіння та вогнегасної здатності

Згідно плану проведення дослідів наступним кроком було розраховано показник ефективності гасіння $П_{е.г}$ за формулою (3.32). Для вираження чисельного результату показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ було взято відношення маси вогнегасної речовини, використаної для гасіння, до площі модельного вогнища ($m_р/S_п$), використаної на гасіння [167–168]. Результати

розрахунків показника ефективності гасіння та показника вогнегасної здатності наведені в табл. 3.15.

Таблиця 3.15

Результати розрахунків показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ та показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$

N досліду	К, кратність	Р, %	m_p, кг	τ, с	$П_{е.г}$, 10^{-3}, $\frac{м^2}{кг \times с}$	$П_{в.з}$, г/м^2
1	15	4	0,99	15	1,44	3094
2	25	4	0,72	9,15	1,94	2250
3	15	6	0,795	14,3	1,86	2484
4	25	6	0,645	8,66	2,29	2016
5	15	5	0,87	14,5	1,69	2719
6	25	5	0,695	9,05	2,04	2172
7	20	4	0,895	10,2	1,75	2797
8	20	6	0,765	9,28	2,25	2391
9	20	5	0,835	9,76	1,96	2609

На рис. 3.21 наведено поверхню відгуку, яка відображає залежність зміни показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності компресійної піни К та концентрації піноутворювача Р у водному розчині.

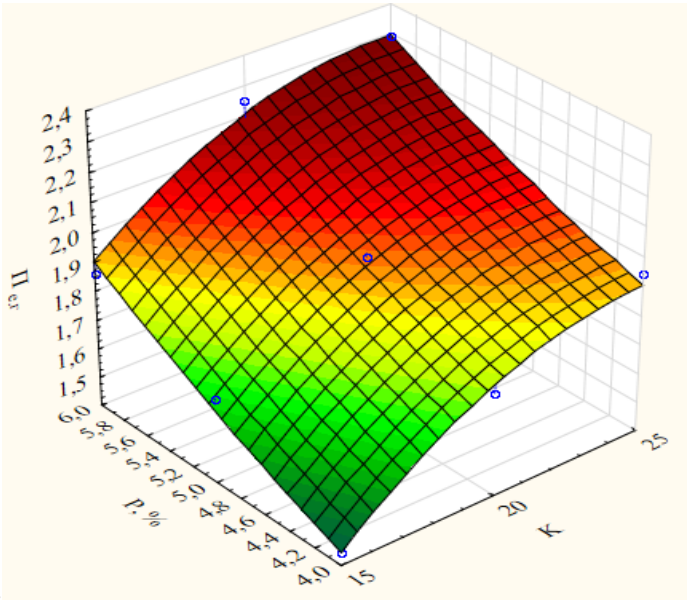


Рис. 3.21. Поверхня відгуку залежності зміни показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності компресійної піни К та концентрації піноутворювача Р у водному розчині.

Аналізуючи поверхню відгуку залежності зміни показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності піни К і концентрації піноутворювача у водному розчині Р на рис. 3.20, можна дійти висновку, що на верхніх рівнях значення чинників (табл. 3.10) показник ефективності $П_{е.г}$ має найвище значення, тобто піна кратністю 25, отримана з 6 % водного розчину піноутворювача, має вогнегасну ефективність у 1,5 разу вищу, ніж піна з кратністю 15, одержана з 4 % водного розчину піноутворювача за таких умов експерименту. Також це вказує на те, що ПУ необхідно використовувати відповідно до рекомендацій виробника у співвідношенні 6/94. Отримані результати добре корелюють з результатами попередніх досліджень отриманими у розділі 3.1. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано формулою:

$$П_{е.г.} = -1{,}4267+0{,}2362\cdot К+0{,}0317\cdot Р-0{,}0044\cdot К^2-0{,}0035\cdot К\cdot Р+0{,}025\cdot Р^2 \ . \qquad (3.42)$$

На рисунку 3.22 зображено залежність зміни показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності компресійної піни К з концентрацією піноутворювача Р=5 %.

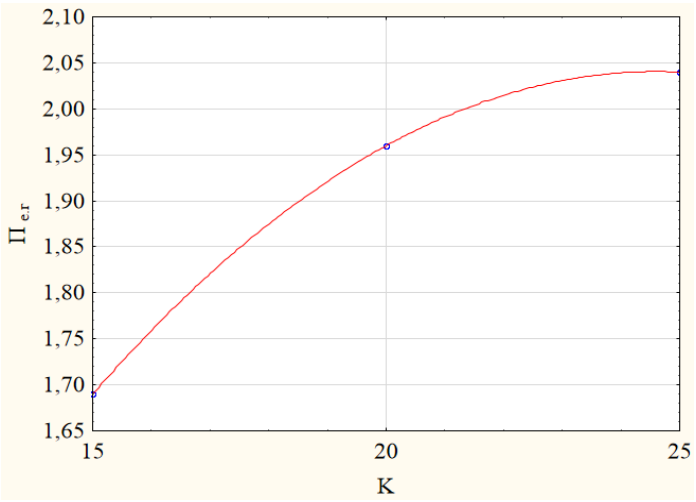


Рис. 3.22. Залежність показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності компресійної піни К з концентрацією водного розчину піноутворювача Р=5 %

Виходячи з аналізу графіка на рис. 3.22, показник ефективності гасіння $П_{е.г}$ зростає зі збільшення кратності піни К. При зміні кратності від 15 до 25 спостерігається підвищення показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ на 21 % тому застосування піни з кратністю К=25 є найбільш доцільним для гасіння твердих горючих речовин. Модель опису цієї залежності представлена формулою:

$$П_{е.г} = -0,26+0,187 \cdot К-0,0038 \cdot К^2 . \quad (3.43)$$

На рис. 3.23 зображено графік залежності зміни показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від концентрації піноутворювача Р із кратністю піни К= 25.

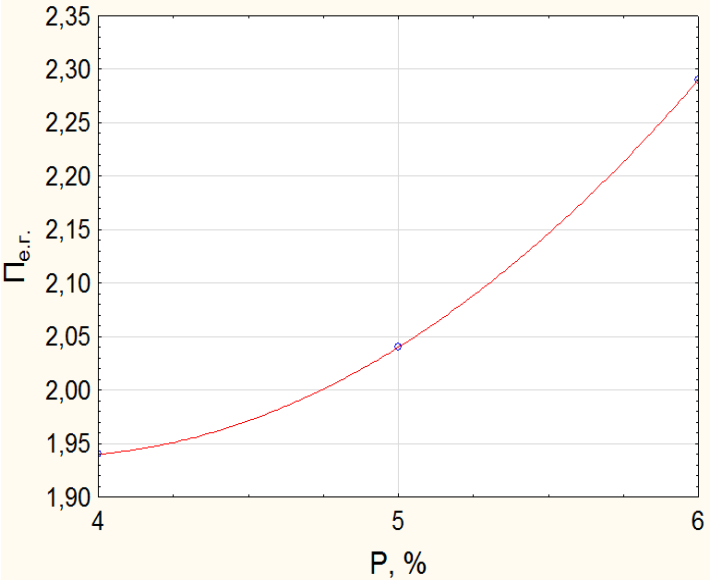


Рис. 3.23. Залежність показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ від концентрації піноутворювача Р із кратністю піни К= 25

Як зрозуміло з графіка на рис. 3.22 умови, за яких відбувається збільшення концентрації піноутворювача Р у водному розчині, мають позитивний наслідок та підвищують значення показника ефективності гасіння $П_{е.г}$. Найвище значення показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ спостерігається за робочої концентрації піноутворювача Р=6 %. Це вказує

на те, що слід дотримуватися вимог та рекомендацій виробника піноутворювача. На формулі 3.44 наведено рівняння, яке описує вплив концентрації піноутворювача Р на показник ефективності гасіння $П_{е.г}$:

$$П_{е.г} = 3{,}04 – 0{,}575 \cdot Р + 0{,}075 \cdot Р^2 \quad . \qquad (3.44)$$

На рис. 3.34 наведено поверхню відгуку залежності зміни показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від кратності компресійної піни К та концентрації піноутворювача Р.

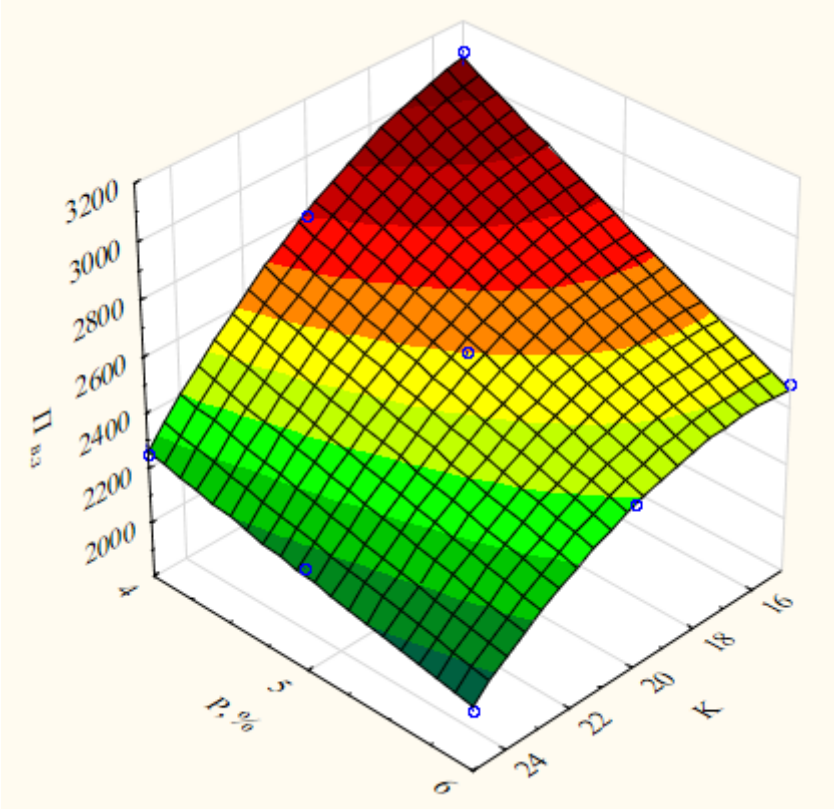


Рис. 3.24. Залежність зміни показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від кратності компресійної піни К та концентрації піноутворювача Р

Поверхня відгуку, зображена на рис. 3.24, описує залежність зміни показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від двох чинників, таких як кратність піни К та концентрація піноутворювача Р. Аналізуючи графік, можна

побачити, що найвища вогнегасна ефективність, за показником вогнегасної здатності, спостерігається за умови використання піни з кратністю К=25 і концентрації піноутворювача в водному розчині Р=6 %. За зниження до нижнього рівня чинників (таблиця 3.10) вогнегасна ефективністі піни зменшується практично в 1,5 рази, що свідчить про негативний вплив низької концентрації піноутворювача Р та низької кратності піни К на вогнегасну ефективність у цілому. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано нижче:

$$П_{в.з} = 4599{,}1111+73{,}1\cdot К–637{,}6667\cdot Р–5{,}7267\cdot К^2 +18{,}8\cdot К\cdot Р+5{,}3333\cdot Р^2 . \quad (3.45)$$

На рис. 3.25 наведено графік залежності показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від кратності компресійної піни К з концентрацією водного розчину піноутворювача Р=6 %.

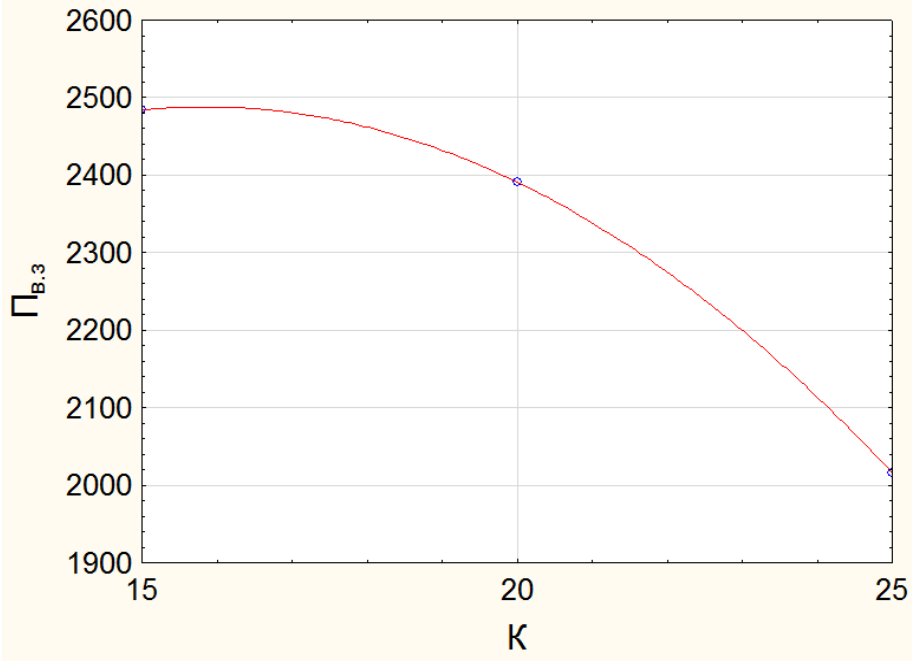


Рис. 3.25. Залежність показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від кратності компресійної піни К з концентрацією піноутворювача Р=6 %

На рисунку 3.25 зображено залежність показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від кратності компресійної піни К. Виходячи з розрахунків експериментальних даних та їх подальшої інтерпретації у графічному середовищі, встановлено, що у разі зростання кратності від 15 до 20 зростає вогнегасна ефективність піни, яка оцінюється за показником вогнегасної здатності $П_{в.з}$ на 5 %. Надалі за збільшення кратності піни від 20 до 25 суттєві зміни у підвищенні ефективності не спостерігаються і становлять близько 10 %. Рівняння регресії залежності наведено на нижче:

$$П_{в.з} = 1071+178,8 \cdot К–5,64 \cdot К^2 . \quad (3.46)$$

На рис. 3.26 зображено графік залежності показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від концентрації піноутворювача Р із кратністю піни К=20.

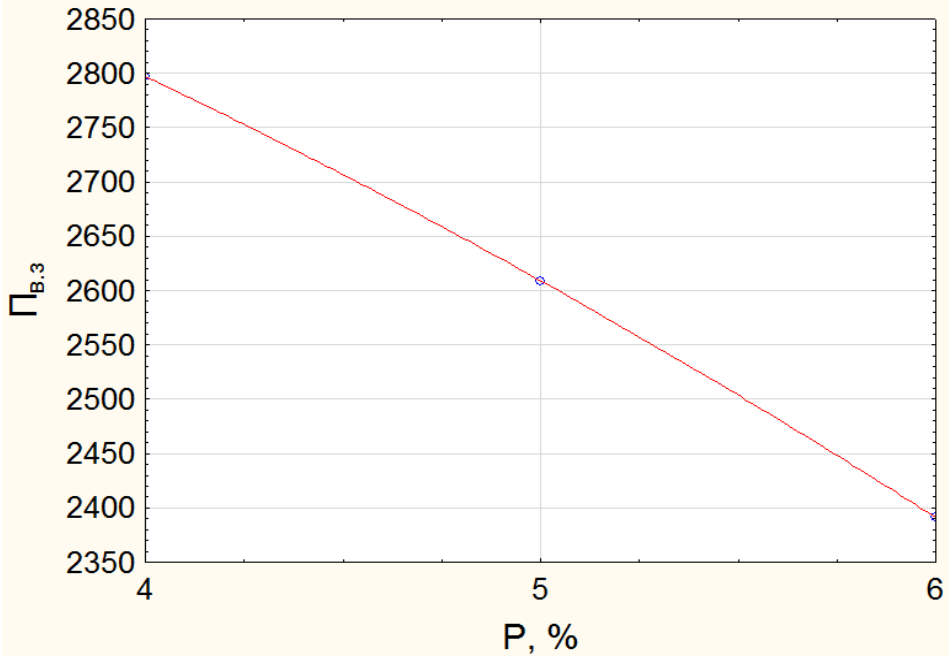


Рис. 3.26. Залежність показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від концентрації піноутворювача Р з кратністю піни К=20

Графічна залежність вогнегасної ефективності за показником вогнегасної здатності $П_{в.з}$ від концентрації піноутворювача у водному розчині Р наведена на рис. 3.25. Збільшення концентрації піноутворювача Р у водному розчині приводить до збільшення вогнегасної ефективності компресійної піни, яка оцінювалась за показником вогнегасної здатності $П_{в.з}$. З графіка зрозуміло, що за концентрації водного розчину піноутворювача Р=6 % вогнегасна ефективність піни більша на 15 %, ніж за концентрації водного розчину Р=4 %, за однакової кратності піни К=20. Рівняння 3.55 описує залежність концентрації піноутворювача Р на показник вогнегасної здатності $П_{в.з}$.

$$П_{в.з} = 3249 – 53 \cdot Р – 15 \cdot Р^2 . \qquad (3.47)$$

Використання рівння 3.47 дозволяє визначити ефективність вогнегасної піни за показником вогнегасної здатності, в залежності від концентрації піноутворювача в розчині.

3.4. Порівняння двох показників вогнегасної ефективності компресійної піни між собою

Під час розрахунку показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ враховується лише маса вогнегасної речовини m та площа умовної пожежі S. Показник ефективності гасіння $П_{е.г.}$ окрім площі умовної пожежі S та маси вогнегасної речовини $m_р$, також враховує проміжок часу τ, необхідний для гасіння вогнища, тому, з нашої точки зору, використання значень розрахунків $П_{е.г.}$ є більш доцільним для оцінки вогнегасної ефективності компресійної піни.

Вогнегасну ефективність компресійної піни чисельно виражено через показник ефективності гасіння $П_{е.г}$ та показник вогнегасної здатності $П_{в.з}$ Компресійна піна, одержана при концентрації піноутворювача Р = 6 %, з кратністю піни К = 25, має найбільшу ефективність гасіння; при цьому чисельне значення показника ефективності гасіння дорівнює $П_{е.г} = 2{,}29 \frac{м^2}{кг \times с}$.

Найнижча вогнегасна здатність піни за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$ спостерігається за умов, коли концентрація піноутворювача у розчині дорівнює Р=4 % та при кратності піни К =15. У цьому випадку числове значення показника ефективності гасіння дорівнює $П_{е..г}$= 1,44 $\frac{м^2}{кг \times с}$.

З вищевикладених результатів зрозуміло, що підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни, виражене як показник ефективності гасіння, полягає у числовому збільшенны розрахункового значення показника $П_{е.г.}$

Для показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ встановлено протилежну залежність від показника ефективності гасіння $П_{е.г}$,. Підвищення вогнегасної ефективності піни у виразі у вигляді вогнегасної здатності $П_{в.з}$ полягає в його чисельному зменшенні. Найнижча вогнегасна ефективність за оцінкою показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$ спостерігається при кратності К = 15 та концентрації піноутворювача у розчині Р = 4 % та становить $П_{в.з}$ = 3094 г/м^2. У свою чергу найвищу вогнегасну ефективність має піна кратністю К = 25 при концентрації піноутворювача Р = 6 %. Чисельне значення показника вогнегасної здатності становить $П_{в.з}$ = 2016 г/м^2.

З метою порівняння цих двох показників між собою та встановлення залежності збільшення або зменшення вогнегасної ефективності компресійної піни від зміни кратності К та концентрації піноутворювача Р було прийнято рішення **[16]** перевести числові розрахункові значення показників у відсоткові. За 100 % було взято найнижче розрахункове значення показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ та найвище значення показника вогнегасної здатності $П_{в.з}$.

Серії дослідів розподілено на 6 випадків: випадки, у яких відбувається змінення вогнегасної ефективності піни за однакової концентрації піноутворювача Р за рахунок зміни кратності К , та випадки, коли кратність К є сталою величиною і на вогнегасну ефективність впливає зміна концентрації піноутворювача Р. Далі було розраховано збільшення або зменшення значень показників у відсотках від 100 % значення для кожної із

серії дослідів за сталої концентрації Р, для визначення впливу кратності К, та з незмінною кратністю К для визначення впливу концентрації Р. Розрахункові дані наведено в табл. 3.16.

Таблиця 3.16

Відсоткові розрахунки зміни вогнегасної ефективності компресійної піни за оцінками показника ефективності гасіння та показника вогнегасної здатності

Розподіл дослідів, N	К, кратність	Р, %	$П_{е.г}$ х 10^{-3}, $\frac{м^2}{кг \times с}$	$П_{в.з}$, г/м^2	$П_{е.г}$, %	$П_{в.з}$, %
Вплив зміни кратності К на вогнегасну ефективність піни						
1	15	4	1,44	3094	100 %	100 %
	20	4	1,75	2794	121 %	110 %
	25	4	1,94	2250	134 %	128 %
2	15	5	1,69	2719	100 %	100 %
	20	5	1,96	2609	116 %	105 %
	25	5	2,04	2172	120 %	121 %
3	15	6	1,86	2484	100 %	100 %
	20	6	2,25	2391	121 %	104 %
	25	6	2,29	2016	123 %	119 %
Вплив зміни концентрації піноутворювача Р не вогнегасну ефективність						
4	15	4	1,44	3094	100 %	100 %
	15	5	1,69	2719	117 %	113 %
	15	6	1,86	2484	129 %	120 %
5	20	4	1,75	2794	100 %	100 %
	20	5	1,96	2609	112 %	107 %
	20	6	2,25	2391	128 %	115 %
6	25	4	1,94	2250	100 %	100 %
	25	5	2,04	2172	105 %	104 %
	25	6	2,29	2016	118 %	111 %

На основі числових даних, переведених у відсотки, побудовано залежності вогнегасної ефективності від кратності піни К та концентрації піноутворювача Р. Графічна залежність показників за розрахунковими даними наведена рис. 3.27 та 3.28.

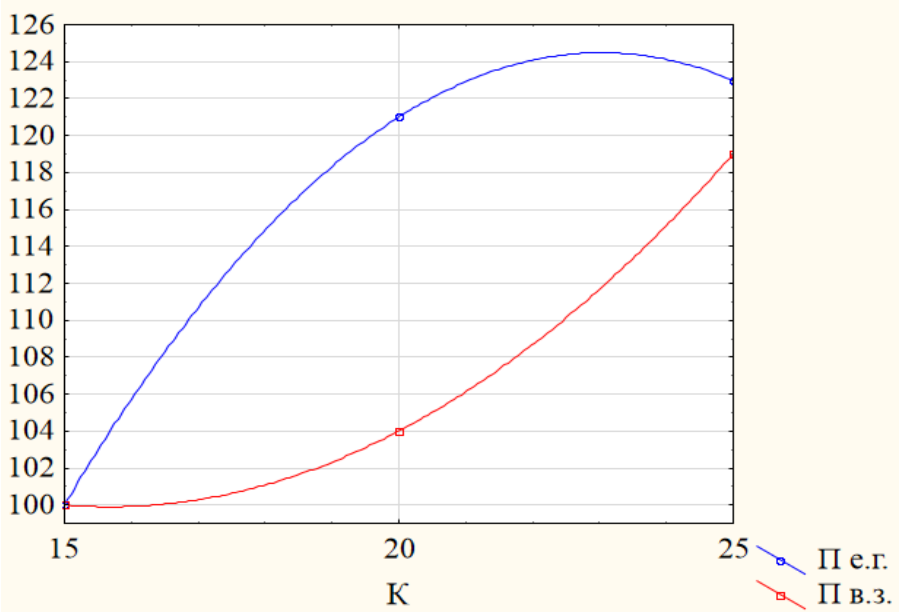


Рис. 3.27. Залежність показників вогнегасної здатності $П_{в.з}$ та ефективності гасіння $П_{е.г}$ від кратності піни К за концентрації піноутворювача Р= 6 %

Аналізуючи графік на рис. 3.26, зрозуміло, що з підвищенням кратності піни К за сталої концентрації піноутворювача Р = 6 % відбувається підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни. Так, для кривої $П_{е.г}$ спостерігається збільшення вогнегасної ефективності піни на 21 % за збільшення кратності від 15 до 20. Рівняння для опису кривих $П_{е.г}$ та $П_{в.з}$ наведено нижче:

$$П_{е.г} = –77+17,5·К–0,38·К^2 ; \quad (3.48)$$

$$П_{в.з} = 154–6,9·К+0,22·К^2 . \quad (3.49)$$

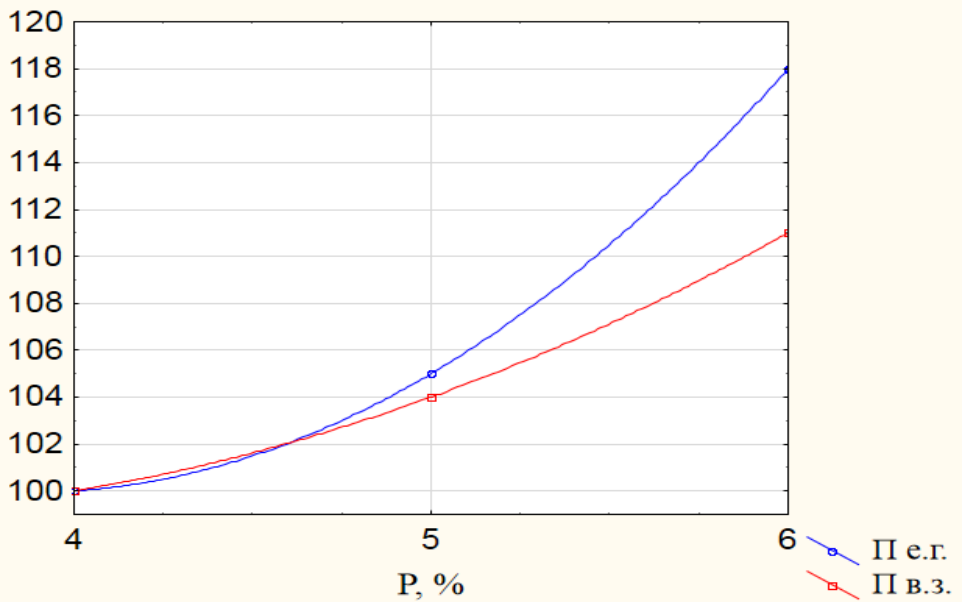


Рис. 3.28. Залежність показників вогнегасної здатності $П_{в.з}$ та ефективності гасіння $П_{е.г}$ від концентрації піноутворювача Р в розчині при кратності піни К=25

Проаналізувавши графік (рис. 3.26) впливу концентрації піноутворювача Р на вогнегасну ефективність компресійної піни за сталої кратності К=25, можна зрозуміти, що за вищій вогнегасної ефективності має відповідає більша концентрація піноутворювача Р. З підвищенням концентрації піноутворювача Р від 4 % до 5 % збільшення вогнегасних властивостей піни за показником $П_{е.г}$ становить 5 %. Подальше збільшення концентрації Р до 6 % приводить до підвищення ефективності на 18 %. Це підкреслює необхідність використання піноутворювача згідно з вимогами виробника. За показником $П_{в.з}$ має місце підвищення вогнегасної ефективності піні на 4 % та 7 % відповідно, у разі зміни її кратності К від 15 до 20, та з 20 до 25. Рівняння регресії, які описують дані залежності, наведена нижче:

$$П_{е.г} = 160–31\cdot P+4\cdot P^2 ; \quad (3.50)$$

$$П_{в.з}= 114–9{,}5\cdot P+1{,}5\cdot P^2 \ . \quad (3.51)$$

Проведено порівняння показників вогнегасної ефективності компресійної піни. Встановлено різницю зміни показників залежено від кратності піни та вмісту піноутворювача у водному розчині, використовуваному для її генерування.

3.5. Експериментальні дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни, води та гелеутворюючих систем, під час гасіння стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А

Проведений аналіз у розділі 1 дозволив встановити найбільш поширені вогнегасні речовини, які можуть бути використані для гасіння пожеж, пов'язаних з горінням твердих горючих речовин.

Вода є основною вогнегасною речовиною для гасіння пожеж класу А, але має ряд недоліків, основними з яких є низький коефіцієнт її використання та значний вторинний збиток.

Одним із сучасних способів, які можуть бути використані для більш ефективного гасіння твердих горючих речовин є використання гелеутворюючих систем, які мають ряд переваг у порівнянні з водою [173,174].

У розділі 3.2 проведено експериментальні дослідження з визначення вогнегасної ефективності компресійної піни різної кратності з різними концентраціями піноутворювача та підтверджено її вогнегасну ефективність.

Також, згідно встановлених задач дисертаційного дослідження, однією з них є порівняння вогнегасної ефективності води, гелеутворюючих систем та компресійної піни під час гасіння твердих горючих речовин.

Порівняння будь-яких засобів пожежогасіння оцінюється за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$, згідно [20, 23]. Для цього визначається кількість вогнегасної речовини, що використана на гасіння за певний проміжок часу під час гасіння визначеної площі пожежі. Розрахунок показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ здійснювали за формулою (3.28).

Кірєєвим О.О. та Савченком О.В. було проведено експериментальні дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності гелеутворюючих систем під час гасіння стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А [175] за показником вогнегасної здатності $П_{в.з.}$. Встановлено найбільш ефективний гелеутворюючий склад для гасіння твердих горючих речовин. Це ГУС $CaCl_2$ (11,4 %) – $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2$ (3,8 %) – H_2O (84,8%). Для подальшого порівняння гелеутворюючої системи із водою та компресійною піною за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$ були використані результати дослідників, які отримані в роботі [175] .Тому нами не здійснювалося гасіння стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А гелеутворюючими системами.

Дослідження щодо визначення вогнегасної ефективності компресійної піни за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$ у розділі 3.2 проводились на лабораторних вогнищах малого розміру. Компресійна піна, утворена за концентрації піноутворювача Р=6 % та кратності К =25 має найбільшу ефективність гасіння; при цьому чисельне значення показника ефективності гасіння дорівнює $П_{е.г} = 2{,}29 \times 10^{-3}$ $\frac{м^2}{кг \times с}$, у зв'язку з чим для проведення дослідів використовували піну кратністю 25.

Як модельні вогнища для моделювання реальних пожеж невеликої площі використовують стандартні модельні вогнища пожеж різного рангу [172]. Стандартні модельні вогнища 1А мають площу поверхні, в ~ 15 разів більшу, ніж лабораторні вогнища, які використовували для визначення вогнегасної ефективності компресійної піни у розділі 3.2. Ці два види модельних вогнищ підібрані з урахуванням їх геометричної подоби.

Так, для проведення уточнення вогнегасної ефективності компресійної піни та порівняння її з водою обрано модельне вогнище пожежі класу 1А, що являє собою дерев'яний штабель зі звичайної сосни з 72 брусків перерізом (40×40) мм та довжиною 500 мм, які укладені у шість рядів.

Вологість брусів соснової деревини становить 10 %. Загальна і відкрита площі поверхонь такого вогнища становлять 5,99 м^2 і 4,7 м^2 відповідно.

Умови проведення досліду відповідали стандарту [172]. Випробування проводились **[17]** на відкритому просторі за швидкості вітру 1÷2 м/с, температура повітря дорівнювала 10 ^{0}С. У визначеному місці проведення дослідів було встановлено виносну платфору. Як опори використовувались металеві стійки зі сталевих кутків. Далі на стійках збирався штабель. Відстань від платформи до основи штабеля становила (400±10) мм. Після цього під штабель було встановлено металеве деко розміром 400 мм×400 мм×100 мм. Деко розміщалося горизонтально, дно покривалося шаром води товщиною 30 мм, до нього заливалось 1,1 л бензину А–92.

На рис. 3.29 зображено фото модельного вогнища на початку горіння та після певного проміжку часу вільного горіння. Пальне у деко підпалювалось, після його вигоряння (120–160 с) деко забиралось з-під штабеля. Загальна тривалість вільного горіння модельного вогнища складала ~7 хвилин.

а) б)

Рис. 3.29. Фото модельного вогнища вогнища пожежі: а) стан модельного вогнища на початку горіння; б) стан модельного вогнища після 7 хвилин вільного горіння

На рис. 3.30–3.31 зображено процес гасіння модельного вогнища з експериментальної системи для генеруванн і подавання компресійної піни: водою; компресійною піною. Під час гасіння вогнища дотримувалися вимог ДСТУ 3675–98. Після вигоряння (45 ± 2 %) маси штабелю, (400–440 с вільного горіння), здійснювали гасіння.

Рис. 3.30. Фото процесу гасіння модельного вогнища пожежі водою

Рис. 3.31. Фото процесу гасіння модельного вогнища пожежі компресійною піною

Згідно ДСТУ 3675–98 після гасіння протягом 10 хвилин здійснювали спостереження за модельним вогнищем щодо появу повторного займання. Якщо його не виникало, модельне вогнище вважалось погашеним. На рисунку 3.32–3.33 наведені модельні вогнища після гасіння: водою; компресійною піною

Рис. 3.32. Фото модельного вогнища після гасіння водою (через 5 хвилин спостерігалося повторне займання)

Рис. 3.33. Фото модельного вогнища після гасіння компресійною піною

Маса вогнегасної речовини визначалась шляхом зважування ємності з вогнегасною речовиною до початку гасіння і після повної ліквідації полум'я на модельному вогнище. Фіксували проміжок часу від початку спрямування вогнегасного струменя в осередок пожежі, до моменту повного гасіння. Було проведено 2 досліди, по 3 серії в кожному. Далі було розраховано середнє значення маси вогнегасної речовини та проміжок часу, який було витрачено на гасіння. Узагальнені результати експерименту наведені в табл. 3.21.

Таблиця 3.21

Результати гасіння модельного вогнища 1А водою та компресійною піною

Вогнегасна речовина	Маса m_p, кг				Тривалість гасіння τ, с				S, м^2
	1	2	3	$\overline{m}$	1	2	3	$\overline{\tau}$	4,7
	m_1	m_2	m_3		τ_1	τ_2	τ_3		
Вода	10,3	13,2	11	11,5	105	97	95	99	
КП	5,8	6,5	6	6,1	63	52	50	55	
ГУС	6,53				60				

На основі отриманих даних експерименту та результатів роботи [175] було розраховано значення показників ефективності гасіння $П_{е.г}$ для води, компресійної піни та гелів. Після гасіння модельного вогнища водою, через 5 хвилин спостерігалося повторне займання.

Результати розрахунків наведені в табл. 3.22.

Таблиця 3.22

Розрахункові дані $П_{е.г}$ для різних вогнегасних речовин.

Вогнегасна речовина	$П_{е.г}$ х 10^{-3}, $\frac{м^2}{кг \times с}$
Вода	4,12
ГУС	11,9
КП	14

На рис. 3.34 зображено графік залежності маси вогнегасної речовин m_p, необхідної для гасіння модельного вогнища класу А, від типу вогнегасних речлвин, які використовувались в експерименті.

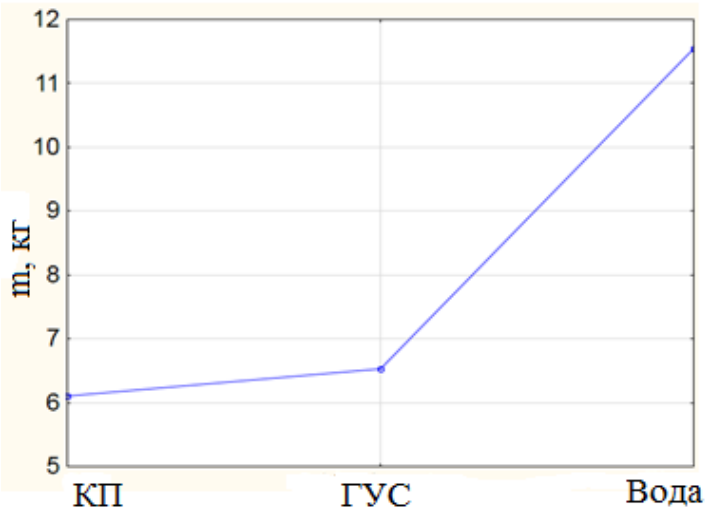


Рис. 3.34. Кількість необхідної маси води, гелеутворюючих систем та компресійної піни, необхідної для гасіння модельного вогнища класу 1А

Виходячи з графіка на рис. 3.34, маса розчину піноутворювача КП, використана на гасіння становить m_p= 6,1 кг, що на 47 % менше, ніж маса води, що була використана на гасіння модельного вогнища. У випадку гелеутворюючих систем, маса, необхідна для гасіння, становила m_a= 6,53 кг. Це на 45 % менше, ніж маса води, та на 2 % більше, ніж маса водного розчину піноутворювача, використовуваного для генерування компресійної піни.

На рис. 3.35 зображено графік залежності проміжку часу τ, необхідного для гасіння модельного вогнища класу 1А, в заледності від вогнегасних речовин, які застососували в експерименті.

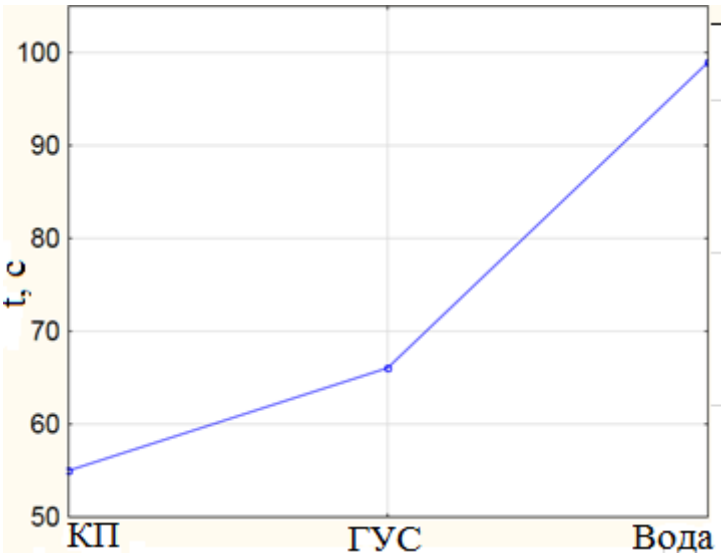


Рис. 3.35. Проміжок часу τ, необхідного для гасіння модельного вогнища класу 1А водою, гелеутворюючими системами та компресійною піною

Виходячи з даних графіка на рис 3.35, найбільше часу для гасіння модельного вогнища витрачається у випадку застосування води. Так, проміжок часу, потрібний для гасіння водою склав τ = 99 секунд (за середньої витраті 6,97 л/хв). Це значення на 39 % більше, ніж проміжок часу, який був потрібен для гасіння гелеутворюючими системами, та склав τ = 60 секунд. Найменший проміжок часу, необхідний для гасіння модельного вогнища, спостерігається у випадку застосування компресійної піни, та становить τ = 55 секунд. Це на 45 % менше, ніж проміжок часу, необхідний для гасіння водою, та на 10 % нижче ніж проміжок часу, який був зафіксований у випадку гасіння модельного вогнища гелеутворючими системами.

На рис. 3.36 графічно зображене порівняння показника ефективності $П_{е.г}$ гасіння для води, компресійної піни та гелеутворюючих систем.

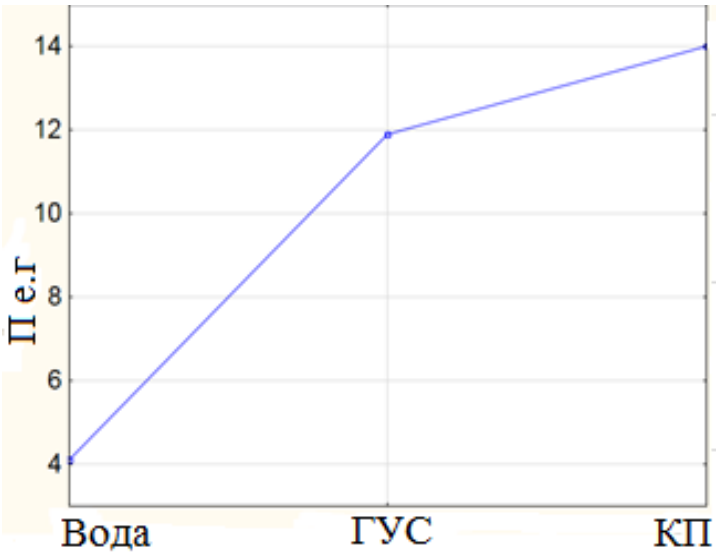


Рис. 3.36. Графічне зображення показника ефективності гасіння $П_{е.г}$ для води, гелеутворюючих систем та компресійної піни

Аналізуючи графік на рисунку 3.36, можна дійти висновку, що найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння $П_{е.г}$ спостерігається у випадку застосування компресійної піни, чисельне значення становить $П_{е.г} = 14 \times 10^{-3} \frac{м^2}{кг \times с}$. Виходячи з даних на графіку, вогнегасна ефективність компресійної піни більше ніж у води на 80 %; щодо гелеутворючийх систем, то у порівнянні з ними вогнегасна ефективність піни більше на 15 %.

Отже, проведені експериментальні дослідження дозволили встановити найбільш ефективну вогнегасну речовину для гасіння твердих горючих матеріалів. За показником ефективності гасіння $П_{е.г}$ компресійна піни має найбільшу вогнегасну здатність, у порівнянні з водою та гелеутворюючими системами.

3.6. Висновки

1. Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити вплив концентрації водного розчину піноутворювача і кратності компресійної піні, одержаної з нього, на її дисперсність і стійкість, а також дослідити зміну середнього розміру пінних бульбашок., зокрема встановлено раніше невідомі залежності для компресійної піни, які мають принципові відмінності від аналогічних залежностей для піни, утвореної повітряно-механічним способом:

– для компресійної піни більшої кратності має місце і більша її стійкість, а саме під час збільшення кратності від 5 до 12,5 відбувається збільшення стікості піни у 2,9 рази . Відповідно у разі збільшення кратності під від 5 до 20, відубвається збільшення її стійкості у 4,8 рази, а саме для піни з кратностю 5 стікість дорівнює 4,5 хв., для піни з кратністю 20 вона дорівнює 21,8 хв. Збільшення концентрації водно розчину піноутворювача (на прикладі піноутворювача «БАРС-S») від 4% до 6% (концентрації рекомендованої виробником) супроводжується збільшенням стійкості піни на 22 %;

– зі збільшенням кратності відбувається зменшення розміру пінної бульбашки, що призводить до збільшення тривалості її існування, наслідком чого є утворення високодисперсної стійкої піни, зокрема, зі збільшенням кратності піни від 5 до 20 відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 14 %. Також виляено (на прикладі піноутворювача «БАРС –S»), що при збільшення концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 % (концентрації, рекомендованої виробником), відбувається зменшення розміру бульбашки на 10 %;

– зі збільшенням кратності піни збільшується однорідність її бульбашок, зокрема, при збільшенні кратності від 5 до 12,5 відбувається зменшення діапазону діаметрів бульбашок на 66%. Подальше збільшення кратності до 20 супроводжується зменешнням діапазону діамтреів бульбашок майже на 80%.

2. Оцінено вогнегасну ефективності КП під час гасіння лабораторних (нестандартизованих) вогнищ класу А, за показниками вогнегасної здатності та ефективності гасіння, залежно від її кратності та концентраціїї водного розчину піноутворювача, з якого одержано піну. Визначено, що кратність піни істотно впливає на її вогнегасну ефективність. Залежно від концентрації та із збільшенням кратності піни від 15 до 25 відбувається зростання вогнегасної ефективності на 60 %. Встановлено, що найбільша вогнегасна здатність компресійної піни спостерігається за кратності піни 25 та концентрації піноутворювача 6 % (на прикладі піноутворювача закагального призначення «БАРС-S»). Це вказує на те, що ПУ необхідно використовувати відповідно до рекомендацій виробника щодо його використання для генерування піни за допомогою ежекційних стволів-генераторів (у співвідношенні 6/94).

3. Проведено експериментальні дослідження щодо гасіння стандартизованого модельного вогнища 1А водою (без функціональних добавок) та компресійною піною. Порівняно вогнегасну ефективність гелеутворюючих систем, компресійної піни та води. Оцінку вогнегасної ефективності проведено за показником ефективності гасіння $П_{е.г.}$ Під час гасіння модельного вогнища водою значення показника ефективності гасіння склало $П_{е.г} = 4{,}12 \times 10^{-3}$, $\frac{м^2}{кг \times с}$, але після гасіння модельного вогнища, через 5 хвилин спостерігалося повторне займання. Значення показника для ГУС склало $П_{е.г} = 11{,}9 \times 10^{-3}$, $\frac{м^2}{кг \times с}$, що на 65 % більше, ніж вогнегасна ефективність води. Найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння спостерігається для компресійної піни та становить $П_{е.г} = 14 \times 10^{-3}$, $\frac{м^2}{кг \times с}$, що на 80 % більше, ніж у води, та на 15 % більше ніж у ГУС.

4. Визначено концентрацію водного розчину та кратність компресійної

піни, за яких досягається її найбільша вогнегаксна ефективність під час гасіння твердих горючих речовин. Рекомендовано використання компресійної піни кратністю 25. На прикладі піноутворювача загального призначення “Барс-S” встановлено, що найбільша вогнегасна ефективність компресійної піни досягається за концентрації водного розчину піноутворювача загального призначення, рекомендованої виробником для генерування повітряно-механічної піни у звичайний спосіб.

РОЗДІЛ 4

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ І ПОЖАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ДЛЯ ПІДРОЗДІЛІВ ДСНС

4.1. Рекомендації застосування компресійної піни в підрозділах ДСНС

Традиційно у переважній кількості в Україні застосовуються водяні пожежні стволи. Протягом багатьох років технології пожежогасіння із застосуванням води розвивалися в напрямку збільшення номінальної витрати води і дальності її подавання [105].

Ефективність такого методу виправдана лише під час гасіння великомасштабних пожеж. Але у випадках пожеж у спорудах житлового сектору, частка яких становить 76 % від загальної кількості пожеж по Україні, використання такої техніки не є ефективним, адже надлишок води (до 90%), що застосовується для цілей пожежогасіння, не бере участі у гасінні пожежі, заливає нижні поверхи, призводячи до суттєвих вторинних збитків. Використання КП, значно зменшує розмір вторинних збитків. Розвинуті держави використовують нову технологію на основі КП навіть під час гасіння великих лісових пожеж.

За період з 2016 року по 2019 рік в Україні майже удвічі збільшилась тривалість ліквідації пожеж з 28–30 хв. до 53–55 хв. Однією з вагомих причин є значне зниження пропускної здатності міських вулиць, особливо під час пікових навантажень, у зв’язку зі значним збільшенням кількості автомобілів. Перевагу в такій ситуації мають більш маневрені малогабаритні автомобілі, але вони не мають можливості доставляти великі об’єми стандартної вогнегасної речовини. У випадку застосування КП [99–101] такі автомобілі скорочують тривалість гасіння у 5–7 разів. За результатами опрацювання витрати води у 5–15 разів менше і стають еквівалентними витратам, забезпечуваним пожежними автомобілями.

На основі експериментальних даних з гасіння модельних вогнищ пожежі класу А, а також виходячи з результатів експериментальних досліджень з вивчення вогнегасних властивостей компресійної піни, було розроблено рекомендації щодо її застосування під час гасіння твердих горючих речовин і матеріалів.

Вогнегасна ефективність компресійної піни визначається її кратністю, вмістом та властивостями піноутворювача для кожного з класів пожеж. Рекомендується така кратність компресійної піни, генерованої з водних розчинів піноутворювача загального призначення (на прикладі піноутворювача загального призначення «БАРС-S») для гасіння твердих горючих речовин і матеріалів:

– кратність – 25;

– концентрація піноутворювача – 6 % (відповідає концентрації, рекомендованій виробником для гасіння пожеж повітряно-механічною піною, генеровано. З використанням ежекційних стволів-генераторів);

– кількість води – 94 %.

Використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А є можливим як за допомогою штатної протипожежної техніки, так і за допомогою переносних технічних заосбів пожежогасіння. Але на сьогодні на території України і на озброєнні ДСНС відсутні будь-які зразки систем для генерування і подавання компресійної піни. Модернізація існуючої пожежної техніки або закупівля пожежних автомобілів, оснащених такою системою, тягне за собою суттєві економічні затрати, тому для розгляду пропонуються переносні технічні засоби пожежогасіння.

Переносні технічні засоби призначені для гасіння пожеж пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС в певних умовах, а саме:

– в багатоквартирних житлових будинках, задля суттєвого зменшення розмірів побічного збитку внаслідок затоплення суміжних приміщень (є характерним для багатоповерхових будинків і будівель підвищеної поверховості);

– в умовах недостатності вогнегасних речовин (є характерним для сільської місцевості, лісових масивів тощо);

– в умовах, коли насосне обладнання пожежної техніки не в змозі забезпечити оптимальні робочі характеристики пожежних стволів щодо тиску й витрати води (є характерним для будівель підвищеної поверховості та висотних будинків);

– в умовах, коли подавання вогнегасної речовини на певну висоту не можливе із застосуванням насосного обладнання систем протипожежного захисту будівель (є характерним для висотних будівель).

Спираючись на результати проведеного аналізу, враховуючи особливості парку протипожежної техніки оперативно-рятувальної служби ЦЗ України, нами запропоновано дві розробки [**3**]:

1) неавтономні переносні технічні засоби пожежогасіння;
2) автономні переносні технічні засоби пожежогасіння.

1. Неавтономний переносний модуль для генерування компресійної піни, що використовується разом з автоцистернами, як вставка в рукавну лінію. Пропонується використання модуля за схемою, наведеною на рис. 4.1.

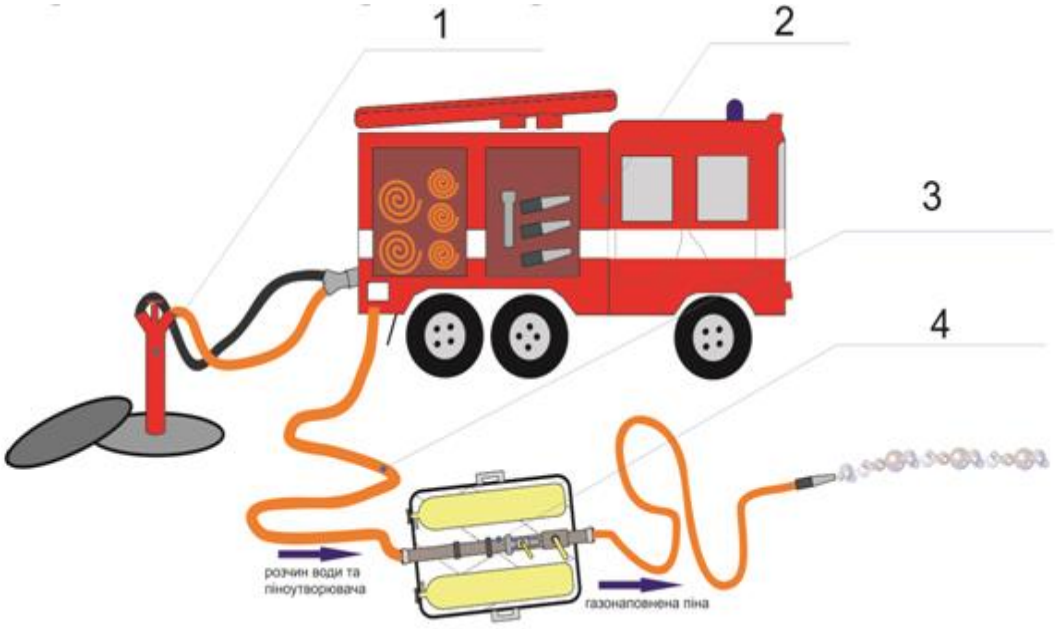


Рис. 4.1. Принципова схема використання неавтономного переносного модуля для генерування компресійної піни

Схема неавтономного переносного модуля для генерування компресійної піни наведена на рис. 4.2.

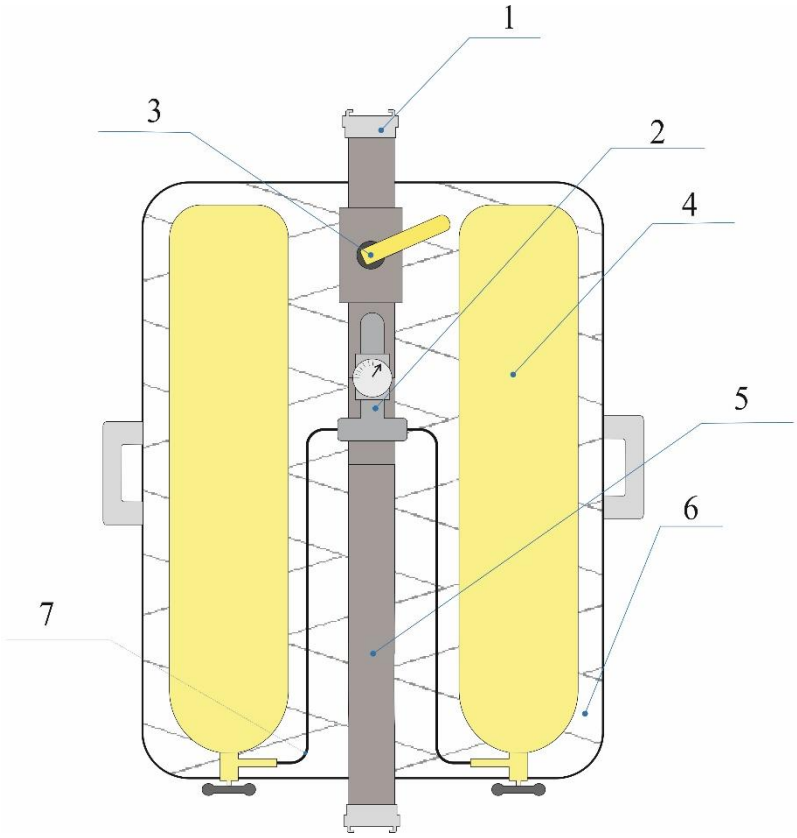


Рис. 4.2. Схема неавтономного переносного модулю для генерування компресійної піни.

Склад неавтономного модуля для генерації компресійної піни:

– з’єднувальні головки (рис. 4.3, а);

– редуктор з манометром (рис. 4.3,б);

– кран для подавання водного розчину піноутворювача (рис. 4.3, в);

– балони зі стисненим повітрям (рис. 4.3, г);

– основний трубопровід (рис. 4.3, ґ);

– каркас модуля (рис. 4.3, д);

– з'єднувальні трубопроводи для стисненого повітря (рис. 4.3, е).

а

З’єднувальні головки

б

Редуктор із манометром

в

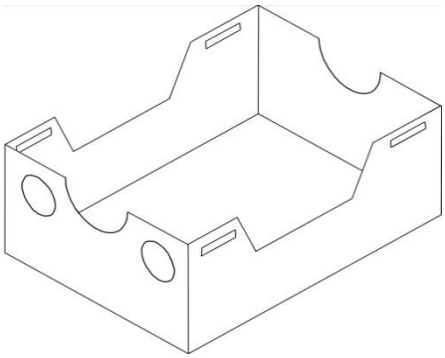
Кран для подачі розчину води та піноутворювача

г

Балони зі стисненим повітрям

ґ

Основний трубопровід



д

Каркас модуля

е

З'єднувальні трубопроводи для стисненого повітря

Рис. 4.3. Складові елементи неавтономного модуля для генерування комперсійної піни

2. Автономна переносна система генерування і подавання компресійної піни має закриту схему та може бути реалізована у вигляді ранцевої системи пожежогасіння, вогнегасника, модуля для автомобілів першої допомоги або у вигляді причепа.

Принципову схему такої системи наведено на рис. 4.4.

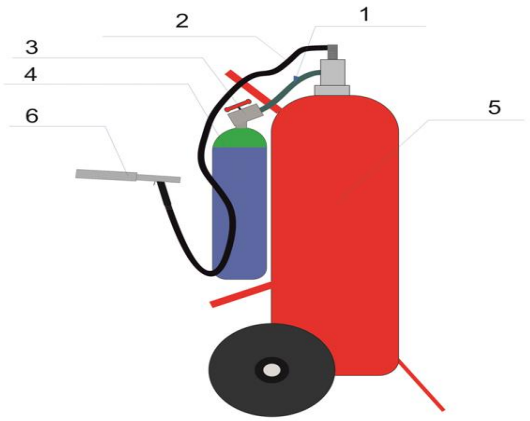


Рис. 4.4. Автономна переносна система для генерування і подавання компресійної піни.

Склад автономного модуля для генерування і подавання компресійної піни:

– трубопровід для подачі стисненого повітря (рис. 4.5, а)

– трубопровід для подачі компресійної піни (рис. 4.5, б)

– кран для перекриття подачі стисненого повітря (рис. 4.5, в)

– балон зі стисненим повітрям (рис. 4.5, г)

– балон із водою і піноутворювачем (рис. 4.5, ґ)

– ствол (рис. 4.5, д)

а

Трубопровід для подачі стисненого повітря

б

Трубопровід для для подачі компресійної піни

в

Кран для перекриття подачі стисненого повітря

г

Балон зі стисненим повітрям

ґ

Балон із розчином води і піноутворювачем

д

Ствол

Рис. 4.5. Складові елементи автономного модуля для ненерації компресійної піни

Основні параметри переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни мають відповідати наведеним технічним вимогам та основним технічним характеристикам (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Основні технічні характеристики переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни

Параметри	Неавтономний переносний модуль для генерування і подавання компресійної піни	Переносна автономна система для генерування і подавання компресійної піни
Продуктивність за піною, л/хв	1080	до 1600
Кратність піни	10–25	10–25
Кількість повітря для генерування компресійної піни	2 балони зі стисненим повітрям, об’єм – 6 літрів, тиск – 300 бар	1 балон зі стисненим повітрям, об’єм – 5 літрів, тиск –150 бар
Робочий тиск, бар	до 10	до 8
Концентрація піноутворювача у розчині, %	6	6
Габарити в межах, мм	750 х 450 х 450	
Вага, кг	до 50	до 100
Орієнтовна вартість розробки, грн.	до 30 000	
Вартість аналогів, грн.	Уточнюється	від 200 000

Переваги застосування переносних технічних засобів для генеруванн і подавання компресійної піни (ПТЗКП):

– економічна та сучасна технологія пожежогасіння (проста в обслуговуванні та експлуатації);

– незалежний від параметрів роботи пожежного автомобіля автономний модуль, який легко за своїми габаритними розмірами вміщується у відсік автомобіля;

– ефективне гасіння горючих речовин і матеріалів, таких як пластик, гума, олива тощо (добра проникна здатність за рахунок збільшення тривалості спінювання);

– добра адгезія, завдяки однорідній структурі піни;

– низька вітрова вразливість, яка веде до високої точності влучення в осередок пожежі; подавання вогнегасної речовини на значні висоту й довжину;

– підвищення маневреності працюючого зі стволом за рахунок меншої ваги і більшої ергономічності використання високонапірного рукава.

Напрямки застосування ПТЗКП загального призначення (що утворюють мокру піну):

1. На поверхах та горищах житлових будинків:

– в умовах, коли подавання вогнегасної речовини на певну висоту неможливе із застосуванням стаціонарного насосного обладнання систем протипожежного захисту будівель та штатної пересувної пожежної техніки (є характерним для багатоповерхових будівель і будівель підвищеної поверховості), а також у будівлях та спорудах різного призначення;

– основною метою застосування переносних технічних засобів для генерування і подавання компресійної піни в багатоквартирних будівлях є зменшення побічного збитку від дії вогнегасних засобів і затоплення нижніх поверхів, а також економія вогнегасних речовин. Можливе попереднє розміщення подібних систем пожежогасіння на поверхах або між ними на

сходових клітках, що значно зменшить тривалість вільного розвитку пожежі та оперативне розгортання.

2. Для гасіння пожеж на об’єктах транспорту (АЗС, парки техніки, пожежі автомобілів):

– у разі виникнення пожеж на об’єктах транспорту використання ПТЗКП веде до зменшення тривалості гасіння, витрати вогнегасних речовин та зменшення збитків від пожежі;

– під час гасіння розлитих ЛЗР та ГР пінні струмені подають безпосередньо на поверхню рідини, що горить, до повного покриття їх піною;

– під час гасіння пожеж на транспорті пінні струмені спрямовують безпосередньо на елементи, що горять; при цьому мають місце два механізми припинення горіння – охолодження та ізоляція;

– доцільним є забезпечувати місця стоянки техніки та АЗС ПТЗКП для зменшення тривалості вільного розвитку пожежі.

3. В сільській місцевості та екосистемах:

– застосування ПТЗКП буде ефективним та економічним під час гасіння пожеж у сільській місцевості та невеликих пожеж в екосистемах (лісових пожеж на початковій стадій, для прокладання вогнезахисних смуг у лісах);

– за умови недостатньої кількості вогнегасних речовин ПТЗКП можуть використовуватись для гасіння окремо розташованих будівель та «оперативного» покриття поверхонь піною для запобігання їх запалюванню.

Напрямки застосування ПТЗКП спеціального призначення (що створюють «суху» піну):

1. На підприємствах енергетичного комплексу для гасіння пожеж електрообладнання під напругою:

– низький вміст рідкої фази у складі «сухої» КП дозволяє застосовувати ПТЗКП для гасіння електрообладнання під напругою, за умови застосування запобіжних заходів і використання індивідуальних засобів

захисту пожежного. При цьому дальність подачі струменя та гранична напруга, за якої допустиме використання повинні бути визначені дослідним шляхом з подальшою сертифікацією ПТЗКП.

2. Використання ПТЗКП спеціального призначення із «сухою» піною, для захисту від теплового випромінювання і запалювання суміжних приміщень, стін та перекриттів, за рахунок здатності піни затримуватися на вертикальних поверхнях.

Доцільним освоєння цієї нової технології та поступова модернізація існуючої власної протипожежної техніки, що забезпечить технологію отримання КП для використання підрозділами ДСНС України.

Доступні інформаційні джерела вказують на наявність різноманітних засобів пожежогасіння, які є в розпорядженні пожежно-рятувальних підрозділів інших країн світу. Зазначені засоби відрізняються один від одного за масогабаритними розмірами (від 50 до 300 кг) та способами доставки на місце події (причеп або пожежно-рятувальний автомобіль), і, як правило мають такі складові частини: насос високого тиску, паливний бак, трубопровід високого тиску, спеціальний ствол, а також додатково можуть бути обладнані ємністю для зберігання вогнегасної речовини. Перевагами використання таких засобів є: швидка доставка до місця пожежі та їх розгортання, гасіння осередків пожеж у важкодоступних місцях, висока вогнегасна ефективність за малої витрати води тощо. Тому ми приділяли велику увагу саме технології отримання КП за допомогою малогабаритних установок пожежогасіння.

4.2. Переваги застосування КП у порівнянні з водою та гелеутворюючими сполука

Застосування компресійної піни передбачається для гасіння твердих горючих речовин, які широко поширені в житлових будинках та побуті. З цієї причини порівняння вибраних вогнегасних засобів оцінювали в умовах житлового сектору.

Розглянемо можливі причини збитків від кожного з вогнегасних засобів:

Вода – найбільших збитків завдає під час її застосування у спорудах житлового сектора, а саме через низький коефіцієнт її використання безпосередньо під час гасіння пожежі, а також під час “проливання” конструкцій.

Гелеутворюючі системи – надмірний пролив вогнегасної речовини, який може призвести до значних збитків та затоплення суміжних та розташованих нижче конструкцій та поверхів, не спостерігається.

КП – за рахунок низького вмісту рідкої фази затоплення не характерне.

Щодо складності подавання засобів пожежогасіння:

Вода – є простою у застосуванні, не потребує додаткового протипожежного чи іншого обладнання для її подавання.

Гелеутворюючі системи – складність застосування полягає у необхідності використання двух ємностей з різними складовими та двох рукавів, для транспортування цих сумішей, з їх подальшим змішування між собою, з метою отримання ВР, яку можна застосовувати для гасіння пожежі. Застосування ГУС потребує суттєвої модернізації існуючої протипожежної техніки, наявної у підрозділах ОРС ЦЗ.

КП – відсутня необхідність використання додаткових ємностей, як у випадку з гелеутчорюючими сполуками. Також транспортування готової КП відбувається по одному рукаву, що не є можливим для ГУС. Можливе використання протипожежного обладнання та пожежних автомобілів, які не потребують суттєвих конструктивних змін для їх подальшого використання з метою генерування і подавання КП, на відміну від ГУС.

4.3. Висновки

1. З урахуванням особливостей парку протипожежної техніки опретивно-рятувальної служби ЦЗ України обгрунтовано необхідність

розроблення неавтономного переносного модуля пожежогасіння та автономної переносної системи для генерування та подавання компресійної піни. Наведено основні конструкційні елементи, основні технічні характеристики, та орієнтовану вартість таких технічних засобів пожежогасіння.

2. Визначено основні переваги застосування переносних технічних засобів генерування і подавання компресійної піни, а також основні напрями застосування ПТЗКП, залежно від типу піни, яку вони генерують.

3. Визначено основні переваги КП над водою та гелями сполуками, за можливими причинами збитків та складності подавання під час гасіння пожеж в умовах житлового сектора.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено результати розв’язання актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А за рахунок варіювання її кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, використовуваного для її генерування. При цьому отримано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу методів гасіння пожеж класу А встановлено, що в теперішній час для гасіння таких пожеж у більшості випадків найбільш доцільно використовувати воду, яке яка є екологічно та фізіологічно безпечною речовиною, має невисоку вартість та характеризується високими показниками питомої теплоємності і питомої теплоти пароутворення, що дає змогу ефективно відводити теплоту від осередку пожежі. Водночас, основним недоліком води як вогнегасної речовини є низький коефіцієнт її використання (близько 5 %) , а решта води залишається надмірно пролитою. У світовій практиці поширення набула компресійна піна, яка має ряд суттєвих переваг у порівнянні з водою та повітряно-механічною піною, зокрема, характеризується високою адгезією до твердих поверхонь, що суттєво збільшує коефіцієнт використання водного розчину піноутворювача, з якого її одержано. Проте, незважаючи на значну кількість відомих пристроїв для подавання і генерування компресійної піни, відсутнє наукове обґрунтування щодо кратності і концентрації водного розчину піноутворювача, за якого забезпечується найвища вогнегасна ефективність під час гасіння твердих горючих речовин.

2. Розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни. Модель дає змогу проводити технічний розрахунок параметрів системи для подачі компресійної піни в залежності від кратності піни, яку необхідно отримати, та дозволяє досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни. Математична модель враховує такі

вхідні параметри для подальшого розрахунку, як тиск у системі, діаметри повітряного та рідинного сопел, темературу навколишнього середовища, діаметр та довжина камери змішування, діаметр та довжина рукава, яким рухається вже сгенерована піна, діметр та довжина ствола для її подавання.

3. Спроектовано та розроблено експериментальний зразок системи для подачі компресійної піни на основі розрахункових даних, отриманих за допомогою математичної моделі й аналізу існуючих систем для подачі компресійної піни, який дозволяє отримувати компресійну піну з робочим діапазоном кратності від 5 до 30. В системі використаний оригінальний запатентований пінозмішувач коаксіального типу перемішування.

4. Проведено експериментальні дослідження впливу кратності та концентрації водного розчину піноутворювача «БАРС-S» у компресійній піні на її властивості та встановлено, що, на відміну від повітряно-механічної піни, компресійна піна більшої кратності має більшу стійкість. Зокрема, зі збільшенням кратності піни від 5 до 20 її стійкість підвищується з 4,5 хв до 21,8 хв, тобто майже уп’ятеро. Збільшення концентрації водного розчину піноутворювача “БАРС-S” від 4 % до 6 % супроводжується збільшенням стійкості компресійної піни, генерованої з нього, на 22 %, а зі змінюванням кратності піни в тих самих межах відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 14 %, що зумовлює збільшення тривалості її існування. Також виявлено (на прикладі піноутворювача “БАРС-S”), що у разі збільшення концентрації водного розчину піноутворювача від 4 % до 6 % (концентрації, рекомендованої його виробником) відбувається зменшення розміру пінної бульбашки на 10 %, наслідком чого є утворення високодисперсної і більш стійкої піни. Встановлено, що за збільшення кратності піни її однорідність зростає, а саме при збільшенні кратності від 5 до 12,5 відбувається зменшення діапазону діаметрів бульбашок на 66%. Щодо подальшого більшення кратності до 20, відбувається зменешння діапазону діамтреів бульбашок майже на 80%.

5. Експериментальним шляхом досліджено вплив концентрації водного

розчину піноутворювача і кртаності компресійної піни на її вогнегасну ефективність під час гасіння лабораторних (нестандартизованих) вогнищ класу А. Виявлено, що збільшення кратності піни з 15 до 25 зумовлює до підвищення ефективності гасіння лабораторного вогнища на велечину до 60 %, в залежності від концентрації піноутворювача. Встановлено, що компресійна піна з найвищою вогнегасною ефективністю утворюється з водного розчину піноутворювача, концентрація якого дорівнює концентрації, рекомендованій для генерування повітряно-механічної піни з використанням штатних ежекційних стволів-генераторів. Це означає, що піноутворювачі загального призначення можна застосовувати для гасіння пожеж компресійною піною в тому самому порядку, в якому вони застосовуються для гасіння пожеж існуючою пересувною протипожежною технікою.

6. Проведено експериментальні дослідження щодо гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі 1А водою (без функціональних добавок) та компресійною піною. Порівняно вогнегасну ефективність гелеутворюючих систем, компресійної піни та води. Встановлено, що найбільша вогнегасна ефективність за показником ефективності гасіння спостерігається для компресійної піни, вона становить 14 х 10^{-3}, $\frac{м^2}{кг \times с}$, що на 80 % більше, ніж у води, та на 15 % більше, ніж у гелеутворюючих систем.

7. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано та розроблено рекомендації щодо застосування систем генерування і подавання компресійної піни, які впроваджено в діяльність підрозділів ДСНС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шахов С.М., Виноградов С.А., Ларін О.М. Аналіз світових зразків систем пожежогасіння газонаповненою піною. *Надзвичайні ситуації. Попередження та ліквідація*. 2017. Вип 1. С. 50–58.

2. Shakhov S.M., Balaka N.I. Innovative technologies in firefighting: compressed air foam. *Technologie Informacyjne i innowacyjne w XXI wieku*: mat. Miedzynarodowa konferencja naukova. Poland : Katowice, 2019. P. 395–406.

3. Шахов С.М., Виноградов С.А., Присяжнюк В.В. Розробка системи пожежогасіння газонаповненою піною. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. Вип 42. С. 12–21.

4. Шахов С.М. Використання статичних змішувачів у системах подачі компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. IX Міжнар. наук.–практ. конф., 18–19 трав. 2018 р. Черкаси : ЧІПБ, 2018. С. 144–145.

5. Шахов С.М, Нікулін О.Ф. Функціонально-фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація* : матеріали наук.–практ. сем, 21 лют. 2019 р. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 285–287.

6. Шахов С.М., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А. Математичне забезпечення для проектування систем генерування компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020, т. 30, № 3. С. 111-115.

7. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54). P. 29-35.

8. Шахов С.М., Кодрик А.И., Виноградов С.А., Титенко О.М. Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и*

ликвидация : сб. материалов докл. VIII Междунар. науч.–практ. конф. Минск : НИИПБЧС , 2019. С 107–119.

9. Шахов С.М., Виноградов С.А., Тітенко О.М., Кодрик А.І. Пінозмішувач для утворення компресійної піни: пат. 142507 Україна: МПК A62C 31/12, A62C 5/02, B05B 7/00. № u 2019 11826; заявл. 11.12.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11/2020.

10. Шахов С.М., Виноградов С.А. Пеносмеситель для генерации компрессионной пены. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы* : сб. материалов докл. XI Междунар. науч.–практ. конф. (8–9 апр., 2020 г.) Минск : УГЗ, 2020. С 291–292.

11. Шахов С.М. Розробка експериментальної установки для проведення досліджень властивостей компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 185.

12. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Вплив кратності компресійної піни на дисперсність і стійкість. *Проблеми пожежної безпеки.* 2019. Вип. 45. С. 27–33.

13. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Стилик І.Г. Визначення залежності характеристик компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2019. № 5. С. 103–106.

14. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею твердих горючих речовин. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. Вип. 46. С. 199–205.

15. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення показника вогнегасної здатності компресійної піни. *Проблеми пожежної безпеки.* 2020. Вип. 47. С. 199–205.

16. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Порівняння вогнегасних показників компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. XI

Міжнар. наук.– практ. конф., 09–10 квіт. 2020 р. Черкаси : ЧІПБ, 2020. С.86–88.

17. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. The efficiency of the compressed air foam, water and gel extinguishing agent on the standard model fire class A. *Safety & Fire Technology*. 2020. Issue 1(56). P. 154–160.

18. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення найбільш ефективної вогнегасної речовини під час гасіння стандартних модельних вогнищ класу А. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки:* зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти. Рівне: НУВГП, 21–22 травня 2020. С 178–180.

19. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж. [Чинний від 2006-01-01] Держстандарт України. 7 с. (Інформація та документація).

20. Бобков С. А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособие. М.: АГПС МЧС РФ, 2014. 210 с.

21. Процессы горения / Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1984. 268 с.

22. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб.пособие. М.: ВИПТШ, 1980. 255 с.

23. Рашоян И.И. Физико-химические основы развития и тушения пожара : учеб.пособие. Тольятти: ТГУ 2013. 107 с.

24. Шрайбер Г. Огнетушащие средства. Химико–физические процессы при горении и тушении. М.: Стройиздат, 1975. 240 с.

25. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное изд.: в 2 книгах; кн. 1. М.: Химия, 1990. 496 с.

26. Баратов А. Н., Иванов Е. Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1971. 365 с.

27. Иванов Ю. И., Сараев С. П., Михайлов Ю. П., Ракитянская С. В. Пожарная безопасность. Кемерово: Кемеров. технол. ин-т пищевой пром-сти, 2004. 190 с.

28. Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. Пены и пенообразователи для тушения пожаров. Состав, свойства, применение. М.: Пожнаука, 2005. 335 с.

29. Розенфельд Л.М. Физико-химия стойких воздушно - механических пен, применяемых в пожаротушении. М. 1941. 73 с.

30. Абрамов Ю.А., Гвоздь В.М., Тищенко А.М. Оценка влияния инерционных свойств систем автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой на время их тушения. *Проблемы пожарной безопасности.* 2013. Вып. 33. С. 3–8.

31. Абрамов Ю.А., Тищенко Е.А. Частотные характеристики объекта управления системы тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблеми пожежної безпеки* : зб. матеріалів доп. міжнародної науково-практичної конференції : Харків, 2016. С. 199–200.

32. Абрамов Ю.А., Тищенко Е.А. Моделирование процессов тушения пожаров класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности.* 2015. Вып. 37. С. 3–8.

33. Абрамов Ю.А., Садковой В.П. Теоретические основы автоматического тушения пожаров класса В распыленной водой. Харків, 2010. 267 с.

34. Абрамов Ю.А., Бесараб С.Н., Садковой В.П. Условия и временные характеристики тушения пожара класса В распыленной водой. *Проблемы пожарной безопасности.* 2011. Вып. 30. С. 3–7.

35. Абдурагимов И.М. Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 2. С. 69–74.

36. Абдурагимов И.М. К Проблеме тушения крупных пожаров твердых горючих материалов в зданиях в черте города. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 2. С. 75–78.

37. Абдурагимов И.М. Несостоятельность идеи применения тонкораспыленной и «термоактивированной» (перегретой) воды для пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность.* 2011. Вып. 6. С. 53–58.

38. Корольченко Д.А., Громовой В.Ю., Ворогушин О.О. Применение тонкораспыленной воды для тушения пожаров в высотных зданиях. *Вестник МГСУ*. 2011. Вып. 1. С. 331–335.

39. Корольченко Д.А. Изменение характеристик горючей жидкости при тушении тонкораспыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып. 5. С. 79–80.

40. Корольченко Д.А. Условие тушения горючих жидкостей распыленой водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2012. Вып 6. С 74–75.

41. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости. *Пожаровзрывобезопасность.* 2013. Вып. 12. С. 69–73.

42. Шароварников А.Ф., Корольченко Д.А. Тушение горючих жидкостей распыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Вып. 11. С. 70–74.

43. Битуев Б.Ж., Воевода, А.Ф., Шароварников С.А. О влиянии жесткости воды на эффективность тушения пожаров смесевых топлив. *Технологии техносферной безопасности*. 2012. Вып 5. С. 1–75.

44. Ross R.H., Honkonen D.L., Salaymeb S.R. Water film thieckness effect from automatic fire sprinklers. *Trans. Amer. Nucl. Socm*. 1991. V. 63. P. 18– 220.

45. Smith D.P. Water mist fire suppression system. *Fire Safety Eng*. 1995. V.2. № 2. P. 10–15.

46. Стась С.В., Яхно О.М., Гнатів Р.М. Врахування стисливості рідини за неусталеної течії в напірних трубопроводах систем пожежогасіння. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. № 3/7(75), 2015. С. 38–42.

47. Стась С.В. Анализ гидродинамических характеристик протока жидкости в специальных пожарных стволах и насадках целевого типа. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2009. Вип. 57. С 139–142.

48. Стась С.В. Аналіз системи генерування струминних потоків, що застосовуються в пожежогасінні. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. Вип. 63. С. 240–243.

49. Ольшанский В.П., Поляк Т.Ю., Чернуха А.А. Об одной задаче геометрического синтеза траектории пожарной гидравлической струи. *Проблемы пожарной безопасности*. 2005. Вып.17. С 147–153.

50. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К расчету предельной дальности подачи испаряющихся тонкораспыленных огнетушащих веществ установками импульсного пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность.* 2005. Вып. 4. С. 67–70.

51. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. К моделированию падения испаряющейся капли диспергированного огнетушащего вещества. *Пожаровзырывобезопасность*. 2006. Том 15, №1. С. 141–148.

52. Виноградов А.Г., Яхно О.М., Дунюшкин А.В. Взаимосвязь параметров противопожарных водяных завес с эффективностью экранированного теплового излучения. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2015. №1(31). С. 36–45.

53. Виноградов А.Г., Малигін Г.О. Екрануючі властивості водяних завіс: методика розрахунків і порівняння з експериментом. *Пожежна безпека: теорія і практика*». 2013. Вип. 15. С. 49–56.

54. Виноградов А.Г. Расчет конструктивных параметров противопожарных водяных завес. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. №3 (87). С. 61–74.

55. Роенко В.В. Анализ требований к комплексу средств пожаротушения автодорожных тоннелей. *Мир и безопасность*. 2004. Вып 6. С. 26–29.

56. Alfons R. Loschmittelwasser. Stuttgart, Berlin. 1997. P. 161.

57. Механизм тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах. Информационный сборник. М.: ЦНИИПО ГУПО. 1958. 75 с.

58. Брушлинский Н.Н., Мешалкин Е.А. Оценка эффективности тушения пожаров твердых горючих материалов и веществ на открытом пространстве при использовании огнезащитных устройств. *Пожаровзрывобезопасность.* 2003. Вып. 3. С. 42–47.

59. Новожилов В. В. Численное моделирование струй распыленной воды. *Пожаровзрывобезопасность.* 2005. Вып. 11. С. 32–37.

60. Антонов Н.М. Характеристика пожарных ручных стволов типа ПС50, ПС70, КРБ и РСБ и водоизмерительных приборов : Информационный сборник. Пожарная техника. М: ГУПО ЦНИИПО, 1958. 45 с.

61. Бабенко В.С., Кремена А.П. Дальнобойность гидроимпульсной струи. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. Вып. 32. С.13–19.

62. Карпенчук И.В., Петуховский С.Г. Методы расчёта кавитационных сопел для получения мелкораспылённой воды или водного огнетушашего раствора. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2007. №2 (16). С. 162–169.

63. Душкин А.Л., Карпышев А.В., Сегаль М.Д. Оптимизация параметров потоков тонкораспылённых огнетушащих веществ. *Пожаровзрывобезопасность*. 2010. №1. С. 39–44.

64. Роенко В.В. Уникальные свойства температурно активированной воды. *ЖПД*. 2009. №4. С. 20–22.

65. Мешалкин Е.А., Шевченко П.П. Состояние и перспективы разработок изделий для тушения тонкораспыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т.17, № 1, С. 68–75.

66. Данэнгадэр С.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой: механизм, особенности, перспективы. 1994. 40 с.

67. Chow W.K., Li Y.F. A review on studying extinguishing room fires by water mist. *J. Appl. Fire Sci*. 2002–2003. V.11, № 4. P. 367–403.

68. Карпышев А.В., Душкин А.А., Рязанцев Н.Н. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ. *Пожаровзрывобезопасность.* 2007. Т. 16, № 2. С. 69–73.

69. Дугин Г.С. Новые решения и оборудование для тушения пожаров. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. 2007. № 6. С. 68-73.

70. Храмцов С.П. Вода для тушения пожаров. *Пожаровзрывобезопасность.* 2007. №16 (4). С. 72–75.

71. Повзик Я.С. Пожарная тактика: учеб. пособие. М.: Спецтехника, 2004. 416 с.

72. Абдурагимов И.М., Вильчковский С.К., Ринков К.М., Яворский Г.А. О повышении эффективности и коэффициента использования огнетушащих составов при тушении пожаров ТГМ. *Труды ВИПТШ МВД СССР*. 1978. Вып. 3. 1012 с.

73. Тетерин И.М. Температурно–активная вода – новая парадигма развития техники пожаротушения. Индустрия безопасности [сайт]: *Средства спасения. Противопожарная защита [Интернет-журнал]*. 2005.

74. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Подслойное тушение. *Пожарное дело.* 1995. № 11. С. 40–41.

75. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах подачей пен в слой горючего. *Транспорт и хранение нефтепродуктов*. 1996. Вып. 8–9. С. 5–10.

76. Шароварников А.Ф., Ефимов А.А. Перспектива разработки и освоения «подслойного» способа тушения нефти и нефтепродуктов в резервуарах. *Пожаровзрывобезопасность*. 1992. №1. С. 62–67.

77. Казаков М.В. Применение поверхностно–активных веществ для тушения пожаров. М.: Стройиздат, 1997. 80 с.

78. Казаков М.В., Билкун Д.Г., Моисеенко В.М., Пешков В.В. Огнетушащие свойства пен низкой и средней кратности из пенообразователей различных типов. *Пожаротушение:* сб. науч. тр. М.: ВНИИПО МВД СССР. С. 10–15.

79. Пешков. В.В. Водопенные средства тушения. *Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны*. М.: ВНИИПО МВД России. 1997. С. 362−373.

80. Пешков В.В., Цариченко С.Г. Пенообразователи для тушения пожаров. *Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России*. М: ВНИИПО. 2007. С. 281−289.

81. Пешков В.В., Крылова Г.С. Применение синтетических пенообразователей для тушения авиационного топлива. *Пожаротушение*: сб. науч. тр.М.: ВНИИПО МВД СССР, 1983. С. 79–82.

82. Parsons P.L. Foam tests on petrol tray fires. *Fire Eng. J.* 1982. 42, №125, 32 p.

83. Ryderman Anders. Testing of foam as a fire extinguishing medium for polar. *Fire*. 1975, № 2, p. 35–41.

84. Oil Tank Fire Extinguishing. *Fire*. October, 1960, № 109, p. 1–43.

85. R. J. French. P. L. HinkPey and P. Nash. Foam extinguishing liquid fire. *Fire*. 1958. March, № 50, p. 585–594.

86. Comparative tests on liquid fuel fires. *Fire International*. 1968, September, № 121, p. 65– 79.

87. Pozarnik. 1984. V. 61 № 21, p. 15.

88. Pinuela de Pablos N.A. Eficacia de los agents extintores Instalador 1987. P. 33-35.

89. Иагата К. Пены. Касай, 1987, V. 37 № 1, p. 43–46.

90. Кругляков П. М., Ексерова Д. Р. Пена и пенные пленки. М.: Химия. 1990. 402 с.

91. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: Калан, 2002. 448 с.

92. ДСТУ 3789:2015. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 67 с.

93. Котов А.А., Петров И.И., Реутт В.Ч. Применение высокократной пены при тушении пожаров. М.: Стройиздат, 1972. 114 с.

94. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («ПІНА – К»). К.: УкрНДІЦЗ, ДСНУ України, Звіт про науково-дослідну роботу. 2018. 259 с.

95. Авакимов С.С, Белов В.П., Бушуй М.И. Справочник по противопожарной службе гражданской обороны. М.: издательство Мин. обороны СССР, 1982. 152 с.

96. Compressed Air Foam System: веб-сайт. URL: http://compressedairfoamsystem.com (дата звернення: 30.12.2018).

97. Ларін О.М., Виноградов С.А., Баркалов В.Г. Пожежні машини. К.: МПБП «Гордон», 2016. 279 с.

98. Colletti, D. J. Compressed–air foam mechanics. *Fire Engineering*. 1994. 147. p. 61–65.

99. CAFS. Straight answers for the beginner or the expericienced user: веб-сайт URL: http://www.cafsinfo.com/index.html (дата звернення: 30.12.2018).

100. Robert G. Taylor. Technical Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions. *Report 98.* Morristown Fire Bureau –Morristown, New Jerseyю 1998. P. 75–112.

101. Colletti, D. J. Class A foam for structure firefighting. *Fire Engineering*. 1992, 145. P. 47–56.

102. NFPA 1145. Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting. 2011. P. 1–34.

103. CAFS веб-сайт URL: https://tcesd5.org/articles/ (дата звернення: 20.12.2019).

104. Кректунов А.А., Платонов Е.Ю., Торопов С.В., Хабибулин А.Ф. Использование компрессионной пены при тушении лесных пожаров. *Аграрное образование и наука*. 2016. №2. С. 16–23.

105. Залесов С.В., Годовалов Г.А., Кректунов А.А., Оплетаев А.С. Новый способ создания заградительных и опорных противопожарных полос. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2014. № 3. С. 90–94.

106. Colletti, D. J. Compressed air foam systems and fire hose. *Fire Engineering*. 1996. P. 50–52.

107. BAO Zhi–ming, CHEN Tao, Fu XUE–cheng, ZHANG Xian–zhong, WANG Rong. Study of Performance of Class A Foam used for Liquid Hazard Fire Protection and Foam Stability Mechanism. *The National Dangerous Substances and Security Emergency Symposium.* 2011. P. 41–43.

108. Li Huiqing. Experimental study of foam generated by compressed air foam system. *Beijing: Beijing Forestry University*. 2000. P. 105–111.

109. Compressed air foam systems. Patent No.: US 6,357,532 B1; Date of Patent: Mar. 19, 2002. Michael A. Laskaris; Michael Sulmone. P. 1–7.

110. Compressed air foam generator. Patent No.:US 6276459 B1; Date of Patent: Aug. 21, 2001. Bradford James Herrick, Mark D. Baxter. P 1–6.

111. Chu Yingxia. A Experimental study on The Dependent Relationship of Flow Parameters and foam Pattern in CAFS. *Beijing: Beijing Forestry University*. 2005. P. 31–35.

112. Lin Lin. Propertiy characterization and fire extinguishing efficiency study of the multi–component compressed air foam. *Beijing: University of Science and Technology of China*. 2007. P. 164–168.

113. Tafreshi A.M., Marzo M, R. Floyd R, Wang S. FIRE PROTECTION FOAM THERMAL PHYSICAL PROPERTIES. *Maryland: NIST*. 1998. P. 1–8.

114. Xue Lin. Water–saving and high efficiency firefighting equipment and application technology research. Shanghai: *Shanghai Fire Research Institute*. 2008. P. 25–31.

115. Алексеев К.О. Гидродинамика потока в статических смесителях насадочного типа: дис. канд. техн. наук: 05.17.08, КНИТУ. Казань, 2016. 167 с.

116. Богданов, В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.

117. Myers K.J., Bakker D., R. Avoid agitation by selecting static mixers. *Chem Eng Prog*. 1997. V.6. P.28–38.

118. Фарахов Т.М. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа. Маслообменные характеристики нерегулярной насадки Инжехим.

119. Comax products веб-сайт URL: https://komax.com/product-category/static-mixers/ (дата звернення: 11.08.2020).

120. Taysher W., Mathys P. Paper presented at the first European Conference of Mixing and Centrifugal Separation, Cambridge, England, September 9-11 – 1974.

121. Ковалишин В.В., Грушовінчук О.В. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності піни різної кратності, генерованої з 6% розчину піноутворювача «альпен». *Пожежна безпека: теорія і практика*» 2015. №19. С. 42–48.

122. Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б., Грушовінчук О.В. Експериментальні дослідження процесу взаємодії струменів повітряно-механічної піни різної кратності під час їх польоту. *Пожежна безпека*. 2018. №32. С. 32–38.

123. Ковалишин В.В., Кирилів Я.Б. Перспективи гасіння пожеж водопінними вогнегасниками. *Пожежна безпека*. 2017. Вып 31. С. 49-58.

124. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Присяжнюк В.В. Розроблення експериментального лабораторного зразка системи пінного пожежогасіння, що споживає стиснене повітря (CAFS). *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2018. № 2 (6). С. 27-41.

125. Мороз О.І., Кодрик А.І., Нікулін О.Ф., Тітенко О.М. Матеріали 20-ї Всеукраїнської науково- практичної конференції «*Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку»*. 2018. С. 320- 324.

126. Боровиков В.А., Слуцкая О.М. Совершенствование методов испытаний и нормативной базы по оцениванию показателей качества пенообразователей для тушения пожаров в Украине. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. 2017. №2(42). С. 5–15.

127. Боровиков В.О., Слуцька О.М. Про необхідність удосконалення нормативних документів щодо протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння. *Науковий вісник УкрНДІПБ.* 2014. № 2 (30). С. 93–98.

128. Боровиков В.О., Слуцька О.М. Щодо визначення ефективності піноутворювачів у разі гасіння моторного пального з полярними добавками *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека* 2017. № 1 (3). С 78–83.

129. Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Функціонально–фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 7. С. 163–166.

130. Кодрик А.І., Тітенко О.М., Куртов О.В. Залежність властивостей компресійної піни від робочих параметрів процесу генерування піни. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека.* 2019. Вип. 7. С. 54–62.

131. Vinogradov S., Kodrik A., Titenko O. Consideration of Thermodynamic Processes Formation of Compressed-Air Foam in Design Compressed Air Foam SystemsMaterials Science Forum 1006. P. 1-11.

132. Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Проектування систем компресійної піни з урахуванням процесів її формування. *Проблеми надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2020. С. 192–193.

133. Carey W.M. National class A foam research project technical report: Structural fire fighting–room burn tests phase II. *MA: National Fire Protection Research Foundation*. 1994. P. 33.

134. Liebson, J. Introduction to class A foams and compressed air foam systemsfor the structural fire service. *MA: International Society of Fire Service Instructors.* 1991. P.41–45.

135. Грачулин А.В., Камлюк А.Н., Навроцки О.Д., Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. №1. С.44–53.

136. Алешков М.В., Емельянов Р.А., Колбасин А.А., Федяев В.Д. Условия применения современных технологий пожаротушения для ликвидации пожаров электрооборудования под напряжением. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Вып. 25(6). С. 12–16.

137. Crampton G., Kim A. Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Soputions. *Research Report*. 2007. 147 P. 1–25.

138. Dong–Ho R., Jang–Won L., Seonwoong K. Class B Fire–Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Differen Air–to–Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. *Applied Science*. 2016. Vol. 6 (191). P. 2–12.

139. Wang X., Liao Y., Lin l. Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi–component compressed air foam. *Chinese Science Bulletin.* 2009. Vol. 54. Issue 3. P. 492–496.

140. Jing–yuan C., Mao X. Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering.* 2014. № 71. P. 44–56.

141. William L., San J. Properties of compressed air foam. *County Fire District. Friday Harbour*. 2001. №3 P. 13–19.

142. Grady C., Lafferty R. How high can you pump wildland firefighting foam. *Foam applications for wildland and urban fire management*. 2007. №1. P. 27-35.

143. Dhrupad P. 2017. Experimental study of pressure drop an bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system. 2017. P. 1–135.

144. Oneseven: веб-сайт. URL: http://www.oneseven.com (дата звернення: 30.12.2018).

145. Systeme: einfach, sicher und okonomisch: веб-сайт. URL: http://www.oneseven.com/de/stationaerbrandschutz/systeme/standardsystem/beschreibung.php (дата звернення: 30.12.2018).

146. Leistungsstark. Einfach. Sicher : веб-сайт. URL: http://www.rosenbauer.com (дата звернення: 27.11.2018).

147. CAFS–Systems : веб-сайт. URL: http://www.waterousco.com/cafs–systems (дата звернення: 27.11.2018).

148. Firefighting Vehicles : веб-сайт. URL: http://www.gimaex.com. (дата звернення: 27.11.2018).

149. Products: веб-сайт. URL: http://kssieler.de/hale/cafs (дата звернення: 27.11.2018).

150. Описание технологии NATISK : веб-сайт. URL: http://www.specialauto.ru/catalog/524.html (дата звернення: 27.11.2018).

151. Оборудование пенного пожаротушения : веб-сайт. URL: http://www.stalt.ru/en/products/sistema–pennogopojarotusheniya.html (дата звернення: 27.11.2018).

152. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1979. 824 с.

153. Кутателадзе С.С., Стыркович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. М.: «Энергия» 1976. 143 с.

154. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О. Штейнберга, 3-е изд., перераб. и доп.-М.; Машиностроение, 1992. 672 с.

155. Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. М.: Гостоптехиздат, 1961. 848 с.

156. Feng D. Analysis on Influencing Factors of the Gas–liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems. *Procedia Engineering*. 2013. №52 P. 105 –111.

157. ДСТУ ГОСТ 8.003:2008 Метрологія. Мікроскопи інструментальні. Методи і засоби перевірки. Київ. Дата початку дії 01.10.2008.Дата прийняття. 25.06.2008

158. Виноградов А.Г., Огурцов С.Ю., Дунюшкин А.В., Бенедюк В.С. Экспериментальное исследование экранирования теплового излучения распыленной водой. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2014. №2(30). С. 99–108.

159. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

160. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических условиях. К.: Техника, 1975. 168 с.

161. Изаков Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка данных. Челябинск: ЧГАУ, 1997. 128 с.

162. Закгейм Д.А. О некоторых рекомендациях при планировании эксперимента. Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях. 1974. 25 с.

163. Тихомиров В.Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканных материалов. М.: Легкая индустрия, 1968. 262 с.

164. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. К.: Вища школа, 1976. 184 с.

165. Box G.E.P., Wilson K.B. On the Expersmental Attainement of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1951. № 1. P. 1–45.

166. Усовершенствованная технология создания пены со сжатым воздухом: пат. 2456037 RU; заявл. № 2008151529\12, 24.04.2018; опубл. 20.07.2012.

167. Антонов А.В., Боровик В.О., Орел В.П. Вогнегасні речовини. К.: Пожінформтехніка. 2004. 176 с.

168. ДСТУ 2272. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. К.: Держстандарт України. 2006. 32 с.

169. Абрамов А.А., Степаненко С.Г., Шкоруп А.И. Параметры горения модельного очага пожара класса А. *Средства порошкового пожаротушения*. 1992. С. 3–5.

170. Шкоруп А. И., Степаненко С. Г., Волошаенко А. И. Особенности тушения очагов пожаров классов А и В в лабораторных условиях. *Средства порошкового пожаротушения*. 1992. С. 119–125.

171. Кустов М.В., Калугин В.Д. Повышение огнетушащей эффективности истинных растворов с помощью добавок электролитов. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. №.24. С. 38–43.

172. ДСТУ 3675–98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. К.: Держстандарт України, 1999. 33 с.

173. Савченко О.В., Кирєєв О.О. Оптимізація кількісного складу гелеутворюючої системи для гасіння пожеж об’єктів житлового сектору. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. Вып. 25. С. 162–166.

174. Савченко О.В. Експериментальне визначення вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворювальної системи $CaCl_2$ – $Na_2O{\cdot}2{,}95\ SiO_2$ – H_2O. *Пожежна безпека*. 2010. Вип. 16. С. 109–114.

175. Савченко О.В., Кірєєв О.О., Островерх О.О. Визначення показника вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворюючої системи $CaCl_2$ – $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2$ – H_2O на стандартизованому модельному вогнищі пожежі. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. Вып. 29. С. 149–155.

ДОДАТКИ

Додаток 1

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Полтавській області
Олександр ЛИСЕНКО
«19» 09 2020р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України Шахова Станіслава Михайловича

Комісія у складі:
голови комісії: заступника начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Полтавській області ЛИСЕНКА Олександра Миколайовича
членів комісії: заступника начальника відділу реагування на надзвичайні ситуації управління організації реагування на надзвичайні ситуації та цивільного захисту ГУ ДСНС України у Полтавській області ДІМНИЧА Андрія Анатолійовича, начальника оперативно-координаційного центру ГУ ДСНС України у Полтавській області ГУПАЛА Андрія Євгенійовича, заступника начальника центру з питань оперативного реагування оперативно-координаційного центру ГУ

ДСНС України у Полтавській області КУЗЬМЕНКА Віктора Григоровича,

склала даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження ад'юнкта НУЦЗ України Шахова С.М. у вигляді:

- технічних вимог до переносних технічних засобів пожежогасіння компресійною піною;
- пропозицій щодо застосування переносних технічних засобів пожежогасіння компресійною піною були використані в діяльності ГУ ДСНС України у Полтавській області для подальшого впровадження технології компресійної піни у оперативно-рятувальних підрозділах.

Члени комісії

Заступник начальника відділу реагування
на надзвичайні ситуації управління
організації реагування на надзвичайні ситуації
та цивільного захисту
ГУ ДСНС України у Полтавській області Андрій ДІМПІЧ

Начальник оперативно-координаційного центру
ГУ ДСНС України у Полтавській області Андрій ГУПАЛО

Заступник начальника центру
з питань оперативного реагування ОКЦ
ГУ ДСНС України у Полтавській області Віктор КУЗЬМЕНКО

Додаток 2

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Заступник начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області

Анатолій ТОРЯНИК
«08» 08 2020р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України
Шахова Станіслава Михайловича

Комісія у складі:
голови комісії: заступника начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області ТОРЯНИКА Анатолія Олексійовича
членів комісії: заступника начальника управління - начальника відділу організації реагування та готовності підрозділів управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області, БЄЛАЯ Олега Володимировича, начальника відділу організації пожежогасіння та роботи з об'єктовими підрозділами управління реагування на надзвичайні ситуації ГУ ДСНС України у Харківській області МАЛЬЖИКА Олексія Вікторовича, заступника начальника центру з питань оперативного реагування оперативно-координаційного центру ГУ ДСНС України у Харківській області СЕРГІЄНКА Олексія Васильовича склали дійсний акт про те, що дисертаційна робота Шахова С.М. становить науковий та практичний інтерес оскільки в ній вирішені задачі щодо підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин.

В ГУ ДСНС України у Харківській області впроваджено для практичного використання результати дисертаційної роботи Шахова Станіслава Михайловича, зокрема:

- технічні вимоги до переносних технічних засобів пожежогасіння компресійною піною;
- пропозиції щодо застосування переносних технічних засобів пожежогасіння компресійною піною.

Використання результатів дисертаційної роботи дає можливість підвищити ефективність гасіння пожеж твердих горючих речовин при застосуванні систем подачі ком пресійної піни.

Члени комісії

Заступник начальника управління
- начальник ВОР та ГП УР на НС
ГУ ДСНС України у Харківській області — Олег БЄЛАЙ

Начальник ВОП та РОП УР на НС
ГУ ДСНС України у Харківській області — Олексій МАЛЕЖИК

Заступник начальника центру з питань
оперативного реагування ОКЦ
ГУ ДСНС України у Харківській області — Олексій СЕРГІЄНКО

Додаток 3

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчальної та методичної роботи
кандидат психологічних наук, професор
Олег НАЗАРОВ
"25" 09 2020 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук викладача кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки НУЦЗ України Шахова Станіслава Михайловича

Комісія у складі:

голова комісії – начальник кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки НУЦЗ України, кандидат технічних наук, доцент Калиновський А.Я.

члени комісії:

доцент кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки НУЦЗ України, кандидат технічних наук Назаренко С.Ю.;

доцент кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки НУЦЗ України, кандидат технічних наук Коваленко Р.І.

склала даний акт про те, що аналіз світових зразків систем пожежогасіння компресійною піною та особливості властивостей компресійної піни в залежності від її складу, що розроблено в дисертаційній роботі Шахова Станіслава Михайловича впроваджено і використовуються на кафедрі інженерної та аварійно-рятувальної техніки в навчальному процесі при викладанні дисципліни «Протипожежна та аварійно-рятувальна техніка» при вивченні теми «Основи пінного гасіння. Пожежні автомобілі пінного гасіння».

Голова комісії Андрій КАЛИНОВСЬКИЙ

Члени комісії: Сергій НАЗАРЕНКО

Роман КОВАЛЕНКО

Додаток 4

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеню доктора філософії за
спеціальністю 261 «Пожежна безпека»
Шахова Станіслава Михайловича

ТОВ «Компанія Тітал» спеціалізується на виробництві пожежно-рятувальної, аварійно-рятувальної та спеціальної техніки. У тому числі, фахівцями підприємства виконуються розробка із виготовлення спеціального оснащення, устаткування, технічних засобів для попередження виникнення та ліквідації пожеж.

Результати дисертаційної роботи Шахова Станіслава Михайловича використані в діяльності заводу «Тітал» при розробці новітніх зразків пожежно-рятувальної техніки та засобів пожежогасіння у вигляді математичної моделі процесу генерації компресійної піни.

Впровадження зазначених результатів дозволило знизити час на проектування новітніх зразків пожежно-рятувальної техніки з використанням компресійної піни, а також підвищити їх ефективність.

Керівник проектів та програм
у сфері матеріального і
нематеріального виробництва Павло Брицький

Додаток 5

Список опублікованих праць за темою дисертації:

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

1. Шахов С.М., Виноградов С.А., Присяжнюк В.В. Розробка системи пожежогасіння газонаповненою піною. *Проблемы пожарной безопасности.* 2017. Вип 42. С. 12–21.

2. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Вплив кратності компресійної піни на дисперсність і стійкість. *Проблемы пожарной безопасности*. 2019. Вип. 45. С. 27–33.

3. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Стилик І.Г. Визначення залежності характеристик компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2019. Т. 29, № 5. С. 103–106.

4. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею твердих горючих речовин. *Проблемы пожарной безопасности*. 2019. Вип. 46. С. 199–205.

5. Шахов С.М., Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А. Математичне забезпечення для проектування систем генерування компресійної піни. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020, Т. 30, № 3. С.111–115.

6. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення показника вогнегасної здатності компресійної піни. *Проблемы пожарной безопасности*. 2020. Вип. 47. С. 127–131.

7. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchyk O.V. Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 4/3(54). P. 29–35.

Стаття у науковому періодичному виданні інших держав з напряму, з якого підготовлено дисертацію:

8. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. Fire Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam, Water and Gel Forming Agents in a Standard Class A Test *Safety & Fire Technology*. 2020. Vol. 55.Issue 1. P. 154–160.

Статті в інших виданнях:

9. Шахов С.М., Виноградов С.А., Ларін О.М. Аналіз світових зразків систем пожежогасіння газонаповненою піною. *Надзвичайні ситуації. Попередження та ліквідація*. 2017. Вип 1. С. 50–58.

Патенти:

10. Шахов С.М., Виноградов С.А., Тітенко О.М., Кодрик А.І. Пінозмішувач для утворення компресійної піни: пат. 142507 Україна: МПК A62C 31/12, A62C 5/02, B05B 7/00. № u 2019 11826; заявл. 11.12.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11/2020.

Тези доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Шахов С.М. Використання статичних змішувачів у системах подачі компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. IX Міжнар. наук.–практ. конф., 18–19 трав. 2018 р. Черкаси : ЧІПБ, 2018. С. 144–145.

12. Шахов С.М, Нікулін О.Ф. Функціонально–фізична схема установки для генерації компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям і їх ліквідація* : матеріали наук.–практ. сем., 21 лют. 2019 р. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 285–287.

13. Шахов С.М. Розробка експериментальної установки для проведення досліджень властивостей компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Харків : НУЦЗУ, 2019. С. 185.

14. Shakhov S.M., Balaka N.I. Innovative technologies in firefighting: compressed air foam. *Technologie Informacyjne i innowacyjne w XXI wieku*: mat. Miedzynarodowa konferencja naukova. Poland : Katowice, 2019. P. 395–406.

15. Шахов С.М., Кодрик А.И., Виноградов С.А., Титенко О.М. Разработка математической модели установки для генерации компрессионной пены. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация* : сб. материалов докл. VIII Междунар. науч.–практ. конф. Минск : НИИПБЧС , 2019. С 103–115.

16. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Порівняння вогнегасних показників компресійної піни. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій* : зб. матеріалів доп. XI Міжнар. наук.– практ. конф., 09–10 квіт. 2020 р. Черкаси : ЧІПБ, 2020. С. 86–88.

17. Шахов С.М., Виноградов С.А. Пеносмеситель для генерации компрессионной пены. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы* : сб. материалов докл. XI Междунар. науч.–практ. конф. 8–9 апр., 2020 г. Минск : УГЗ, 2020. С. 291–292.

18. Шахов С.М., Виноградов С.А., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Визначення найбільш ефективної вогнегасної речовини під час гасіння стандартних модельних вогнищ класу А. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки:* зб. матеріалів доп. Міжнар. наук.–практ. конф. Рівне: НУВГП, 21–22 травня 2020. С. 178–180.