

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГРИЩЕНКО ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ А
КОМПРЕСІЙНОЮ ПІНОЮ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
МОДИФІКУВАЛЬНИХ ДОБАВОК

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.

_____ Д. В. Грищенко

Науковий керівник:

Виноградов Станіслав Андрійович., кандидат технічних наук, доцент

Черкаси - 2026

АНОТАЦІЯ

Грищенко Д.В. Підвищення ефективності гасіння пожеж класу А компресійною піною за рахунок використання модифікувальних добавок – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуального науково-практичного завдання в галузі пожежної безпеки, а саме підвищенню ефективності гасіння пожеж класу А компресійною піною за рахунок використання модифікувальних добавок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету, завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Також показано особистий внесок здобувача та представлено інформацію про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** проведено аналіз наукових публікацій, присвячених використанню компресійної піни. Встановлено, що на сьогодні відсутні дослідження спрямовані на підвищення ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікувальних добавок. Розглянуто та проаналізовано модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізовано експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах. За результатами аналізу розроблено класифікацію та виділено чотири типи модифікувальних добавок за механізмом впливу на процес горіння. Встановлено, що найбільшого поширення під час застосування у водних вогнегасних речовинах набули фосфати та карбонати амонію, хлориди та карбонати

калію. На підставі результатів проведеного аналізу для підвищення ефективності компресійної піни у її складі, згідно з розробленою класифікацією модифікувальних добавок, обрано сполуки, що належать до 1, 2 та 3 типів: гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію, карбонат калію, хлорид калію.

У другому розділі запропоновано систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють. Розроблено систему вимірювання витрати водного розчину і повітря, яка являє собою апаратно-програмний комплекс. Експериментальним шляхом із використанням розробленої установки визначено вплив п'яти модифікувальних добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію, карбонат калію та хлорид калію у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни. Результати показали, що вміст добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію та карбонат амонію у складі водного розчину піноутворювача не впливає на її кратність в заданих межах. Натомість з добавками карбонат калію та хлорид калію не вдалося отримати компресійну піну кратністю 5–20, тобто відмічена їх неефективність у компресійній піні. Визначено характерну залежність впливу добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію та карбонат амонію на стійкість. Найбільша стійкість характерна для режиму генерування із кратністю 20. Найвищий зафіксований показник стійкості встановлено для дигідроортофосфат амонію, а саме 5,45 хв, для гідрофосфату амонію стійкість нижча на 8 %, для карбонату амонію стійкість нижча на 20 %. При цьому з використанням гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію та карбонат амонію характерне отримання піни із меншою стійкістю відносно до піни традиційного складу. Так, для піни кратністю 20, стійкість піни із дигідроортофосфатом амонію нижче на 17 %, із гідрофосфатом амонію на 23 %, та з карбонатом амонію на 33 %.

У третьому розділі експериментальним шляхом визначено вплив модифікувальних добавок у складі компресійної піни із діапазоном концентрацій 1–5 % на її вогнегасні властивості. Результати показали, що для всіх добавок при зміні концентрації від 1 % до 5 % характерно несуттєве зменшення витрати водного розчину піноутворювача. Наслідком підвищення кратності, навпаки, є суттєве зниження маси водного розчину піноутворювача, що витрачається на гасіння. При збільшенні концентрації добавки в межах від 1 % до 3 % притаманне зниження часу гасіння, при подальшому підвищенні від 3 % до 5 % характерне збільшення часу гасіння. Також збільшення кратності піни має суттєвий вплив, при підвищенні від 5 до 20 спостерігається зниження часу гасіння, а при подальшому збільшенні до 25 відбувається збільшення часу. Для компресійної піни із дигідроортофосфатом амонію найвищий показник ефективності становив $20,15 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації модифікувальної добавки 3 % та кратності піни 18; для компресійної піни із гідрофосфатом амонію найвищий показник ефективності складав $18,04 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації модифікувальної добавки 3 % та кратності піни 18; для компресійної піни із карбонатом амонію найвищий показник ефективності складав $14,99 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації модифікувальної добавки 3 % та кратності піни 18. Таким чином, на підставі результатів експериментальних досліджень найбільш ефективною є компресійна піна із дигідроортофосфат амонієм. Отриманий показник ефективності гасіння на 11 % більше відносно до компресійної піни із гідрофосфат амонієм та на 26 % більший за показник компресійної піни із карбонат амонієм.

У четвертому розділі експериментальним шляхом отримано науково обґрунтовані порівняльні дані щодо вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин при гасінні ними стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А: компресійної піни з модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонієм, компресійної піни традиційного складу, води та гелеутворювального складу. При використанні всіх зазначених вогнегасних

засобів спостерігалось успішна ліквідація горіння. Проте найнижчий час та витрачена маса на гасіння були встановлені саме для компресійної піни із модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонію. Маса компресійної піни з дигідроортофосфатом амонію, витрачена на гасіння вогнища, на 7 % менша за масу компресійної піни традиційного складу та 52% менша за масу води. Для компресійної піни із модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонієм зафіксований час гасіння на 10% менший за час, необхідний для гасіння вогнища компресійної піни традиційного складу, та на 51% менший за час гасіння водою. Порівняно показники ефективності гасіння компресійної піни із модифікувальною добавкою дигідроортофосфату амонію, компресійної піни традиційного складу, гелеутворювальної суміші та води між собою. У результаті показник ефективності гасіння для компресійної піни із модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонієм становить $16,5 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для компресійної піни традиційного складу $14,03 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для гелеутворюючої суміші $11,9 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для води $3,94 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Отримані результати підкреслюють, що застосування модифікувальних добавок у складі компресійної піни, зокрема дигідроортофосфату амонію, підвищує її вогнегасні властивості, при гасінні пожеж класу А. Доведено, що вогнегасна ефективність компресійної піни зі вмістом модифікувальної добавки на 15 % вище відносно до компресійної піни традиційного складу. Порівняно з гелеутворюючими сумішами ефективність вища на 28 %, а порівняно з водою – на 77 %.

У п'ятому розділі на основі проведених розрахунків отримано науково обґрунтовані дані щодо економічної доцільності та розроблено практичні рекомендації стосовно застосування компресійної піни з модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонію. Встановлено, що головним чинником фінансової ефективності є підвищення коефіцієнта використання вогнегасної речовини до 95 %, що у порівнянні з водою (де цей показник становить лише 5 %) дозволяє практично нівелювати надлишковий пролив. Доведено, що застосування компресійної піни із модифікувальною добавкою забезпечує

зниження величини вторинних збитків у 80 разів: з 475 000 грн (для води) до 5 938 грн на одну умовну пожежу в житловому секторі. Розрахований сумарний економічний ефект становить 469 062 грн, що дозволяє нівелювати капітальні витрати на переоснащення пожежних автомобілів системами CAFS вже після ліквідації кількох резонансних пожеж, а повний термін окупності обладнання для одного підрозділу складає 5 років. Додатково сформульовано рекомендації щодо оптимальних параметрів генерування піни, а саме: концентрація модифікувальної добавки – 3 %, кратність – 18 та робочий тиск – 6 бар. Отримані результати підкреслюють, що перехід від гасіння водою до використання компресійної піни із модифікувальними добавками є переходом від кількісного до якісного методу захисту, що гарантує максимальне збереження майна та інфраструктури будівель.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

1. **Вперше** встановлено закономірності впливу модифікувальних добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію, карбонат калію та хлорид калію у складі водного розчину піноутворювача на процеси піноутворення компресійної піни, її кратність та стійкість, що дозволяє визначити доцільність використання добавок для підвищення вогнегасної ефективності

2. **Вперше** отримано математичну модель у формі поліномів другого порядку, що описує залежність показника вогнегасної ефективності компресійної піни від концентрації модифікувальних добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію у складі водного розчину піноутворювача та кратності компресійної піни, що дозволяє визначати оптимальний склад водного розчину піноутворювача з точки зору вогнегасної ефективності

3. **Вперше** отримано кількісні показники вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонію у складі водного розчину піноутворювача у порівнянні з іншими водними вогнегасними речовинами, у результаті чого підтверджено, що вогнегасна

ефективність компресійної піни із цією добавкою на 15 % вище за вогнегасну ефективність компресійної піни традиційного складу, на 28 % – гелеутворюючих сумішей та на 77 % – води.

4. Удосконалено наявний зразок системи генерування та подавання компресійної піни за рахунок інтеграції апаратно-програмного комплексу контролю витрат, що на відміну від існуючих, забезпечує підвищення точності дозування компонентів і контроль параметрів піноутворення у режимі реального часу.

Ключові слова: компресійна піна, модифікувальні добавки, вогнегасні властивості, пожежі класу А, ефективність гасіння, стійкість піни, кратність піни, системи компресійної піни, вода

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Shakhov S., Vynohradov S., Kodryk A., Titenko O., Melnychenko A., **Hryshchenko D.**, Grinchenko E., Knaub L. Influence of modified additives on the properties of compressed air foam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4. No. 6(130). P. 38-48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310371>

Особистий внесок – експериментальним шляхом визначив вплив п'яти модифікувальних у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни.

2. Shakhov S., Vynohradov S., **Hryshchenko D.**, Savchenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Shevchuk V., Dominik A. Determining the effect of modified additives on the fire-extinguishing properties of compressed air foam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2. No. 10(134). P. 44-52. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325930>

Особистий внесок – визначив вплив наявності домішок $(NH_4)_2HPO_4$, $NH_4H_2PO_4$, $(NH_4)_2CO_3$, у водному розчині піноутворювача у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на вогнегасні властивості компресійної піни та порівняв їх ефективність.

3. Shakhov S., Vynohradov S., **Hryshchenko D.**, Melnychenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Pinder V., Pavlyuk Y. Determining the fire extinguishing efficiency of compressed air foam with modified additive $NH_4H_2PO_4$. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 6. No. 10(138). P. 32-38. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.345244>

Особистий внесок – визначив та порівняв вогнегасну ефективність компресійної піни з модифікувальною добавкою $NH_4H_2PO_4$ із компресійною піною традиційного складу, водою та гелеутворювальним складом при

гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А.

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

4. **Грищенко Д.В.,** Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз способів підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. Комунальне господарство міст. 2023. Т. 1. № 175. С. 151-159. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-151-159>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

5. **Грищенко Д.В.,** Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз досвіду використання модифікувальних добавок та їх фізико-хімічних властивостей для подальшого застосування у складі компресійної піни. Пожежна безпека. 2023. Т. 42. С. 85-95. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.10>

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

6. Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Шахов С.М., **Грищенко Д.В.** Розробка дослідного зразка системи генерування та подавання компресійної піни. Комунальне господарство міст. 2024. Т. 4. №185. С. 172–177. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-172-177>

Особистий внесок – запропонував систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють.

Патенти України на корисну модель:

7. Спосіб утворення компресійної піни: пат. 156347, МПК А62D 1/02, (2006.01), № u202304736; заяв. 09.10.2023; опубл. 12.06.2024, бюл. № 24.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А., Шахов С.М. Компресійна піна як альтернатива водоемульсійним та водопінним засобам пожежогасіння. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 79-81. URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18351/1/%D0%9A%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%90%20%D0%9F%D0%86%D0%9D%D0%90%20%D0%AF%D0%9A%20%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%A2%D0%95%D0%A0%D0%9D%D0%90%D0%A2%D0%98%D0%92%D0%90%20%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%95%D0%9C%D0%A3%D0%9B%D0%AC%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%98%D0%9C.pdf>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

9. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А. Щодо застосування модифікованих добавок у складі компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація. Матеріали круглого столу (вебінару)*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 88 – 89. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17232>

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

10. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз фізико-

хімічних властивостей модифікованих добавок та механізм їх вогнегасної дії. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій - 2023» («Problems of Emergency Situations – 2023»)*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 346-347. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17657>.

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

11. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А., Холодько В.М. Шляхи підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 191. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18350>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

12. **Грищенко Д.В.** Розробка лабораторного зразку системи для дослідження впливу модифікувальних добавок на ефективність компресійної піни. *Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 127-128. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18686/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D1%96%D0%BB_%D0%A1%D0%A5%D0%A5%D0%A2%20%28pdf.io%29.pdf

Особистий внесок – запропонував систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом

модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють.

13. **Грищенко Д.В.,** Виноградов С.А. Результати експериментального визначення властивостей компресійної піни із модифікованими добавками. *Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням».* м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 51-54. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22378/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%20%D0%9E%D0%A0%D0%A1%20%D0%92%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2.pdf>

Особистий внесок – експериментальним шляхом визначив вплив п'яти модифікувальних у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни.

ABSTRACT

Hryshchenko D.V. Improving the Effectiveness of Class A Fire Suppression Using Compressed Air Foam Through the Use of Modifying Additives – qualification scientific work in the form of a manuscript.

A dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2025.

The dissertation is dedicated to solving a relevant scientific and practical problem in the field of fire safety, namely, increasing the fire extinguishing efficiency of compression air foam by adding modifying additives to its composition when extinguishing class A fires.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the goal and objectives of the study, and outlines the scientific novelty and practical significance of the obtained results. The author's personal contribution is also detailed, along with information regarding the practical testing and approbation of the dissertation research findings.

The first chapter provides an analysis of scientific publications dedicated to the use of compressed air foam. It has been established that, to date, there is a lack of research aimed at improving the efficiency of compressed air foam through the addition of modifying additives to its composition. Modifying additives used in the field of fire suppression were reviewed and analyzed based on their fire-extinguishing action and physicochemical properties. Experimental studies regarding the experience of using modifying additives in water-based extinguishing agents were also analyzed. Based on the results of this analysis, a classification was developed, identifying four types of modifying additives depending on their mechanism of influence on the combustion process. It was found that ammonium phosphates and carbonates, as well as potassium chlorides and carbonates, have gained the most widespread use in water-based extinguishing agents. Based on the results of the conducted analysis, compounds belonging to

types 1, 2, and 3 according to the developed classification of modifying additives were selected to improve the efficiency of compressed air foam: ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, ammonium carbonate, potassium carbonate, and potassium chloride.

The second chapter proposes a compressed air foam generation and delivery system designed to study its properties with modifying additives while varying the composition of the forming liquid and air. A system for measuring the flow rates of the aqueous solution and air, which is a hardware-software complex, has been developed. Through experimental methods using the developed installation, the influence of five modifying additives – ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, ammonium carbonate, potassium carbonate, and potassium chloride – in a concentration range of 1-5% by weight on the expansion ratio and stability of compressed air foam was determined. The results showed that the content of ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, and ammonium carbonate in the aqueous foam-forming solution does not affect its expansion ratio within the specified limits. Conversely, with the additives potassium carbonate and potassium chloride, it was not possible to obtain compressed air foam with an expansion ratio of 5-20, indicating their ineffectiveness in compressed air foam. A characteristic dependence of the influence of ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, and ammonium carbonate on foam stability was determined. The highest stability was observed in the generation mode with an expansion ratio of 20. The highest recorded stability indicator was established for ammonium dihydrogen phosphate, reaching 5.45 minutes; for ammonium hydrogen phosphate, the stability was 8% lower, and for ammonium carbonate, it was 20 % lower. At the same time, the use of ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, and ammonium carbonate typically resulted in foam with lower stability compared to foam of traditional composition. Specifically, for foam with an expansion ratio of 20, the stability of foam with ammonium dihydrogen phosphate was 17 % lower, with ammonium hydrogen phosphate — 23 % lower, and with ammonium

carbonate — 33 % lower.

The third chapter experimentally determines the influence of modifying additives within the composition of compressed air foam, in a concentration range of 1-5 %, on its fire-extinguishing properties. The results showed that for all additives, varying the concentration from 1 % to 5 % is characterized by a negligible decrease in the consumption of the aqueous foam-forming solution. Conversely, increasing the expansion ratio leads to a significant reduction in the mass of the aqueous foam-forming solution consumed during suppression. An increase in additive concentration within the range of 1 % to 3 % is associated with a decrease in extinguishing time, while a further increase from 3 % to 5 % is characterized by an increase in extinguishing time. Additionally, increasing the foam expansion ratio has a significant impact: an increase from 5 to 20 leads to a decrease in extinguishing time, whereas a further increase to 25 results in an increase in time. For compressed air foam with ammonium dihydrogen phosphate, the highest efficiency indicator was $20.15 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ at a modifying additive concentration of 3 % and an expansion ratio of 18; for compressed air foam with ammonium hydrogen phosphate, the highest efficiency indicator was $18.04 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ at a modifying additive concentration of 3 % and an expansion ratio of 18; for compressed air foam with ammonium carbonate, the highest efficiency indicator was $14.99 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$ at a modifying additive concentration of 3 % and an expansion ratio of 18. Thus, based on the experimental results, compressed air foam with ammonium dihydrogen phosphate is the most effective. The obtained extinguishing efficiency indicator is 11 % higher compared to compressed air foam with ammonium hydrogen phosphate and 26 % higher than that of compressed air foam with ammonium carbonate.

The fourth chapter experimentally provides scientifically substantiated comparative data on the fire-extinguishing efficiency of water-based extinguishing agents when suppressing standardized Class 1A model fire sources: compressed air foam (CAF) with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate, traditional CAF, water, and a gel-forming composition. Successful fire suppression

was observed with all mentioned extinguishing agents. However, the shortest extinguishing time and the lowest consumed mass were established specifically for compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate. The mass consumed for extinguishing the fire source with compressed air foam containing ammonium dihydrogen phosphate was 7 % less than the mass of traditional compressed air foam and 52 % less than the mass of water. For compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate, the recorded extinguishing time was 10% shorter than the time required for traditional compressed air foam and 51 % shorter than for water. The extinguishing efficiency indicators for compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate, traditional compressed air foam, gel-forming mixture, and water were compared with each other. As a result, the extinguishing efficiency indicator for compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate was $16.5 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$, for traditional compressed air foam – $14.03 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$, for the gel-forming mixture – $11.9 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$, and for water – $3.94 \text{ m}^2/(\text{kg}\cdot\text{s})$. The obtained results emphasize that the use of modifying additives in compressed air foam, specifically ammonium dihydrogen phosphate, enhances its fire-extinguishing properties when suppressing Class A fires. It has been proven that the fire-extinguishing efficiency of compressed air foam containing the modifying additive is 15 % higher relative to traditional compressed air foam. Compared to gel-forming mixtures, the efficiency is 28 % higher, and compared to water, it is 77 % higher.

The fifth chapter, based on the performed calculations, provides scientifically substantiated data on economic feasibility and presents practical recommendations regarding the use of compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate. It was established that the primary factor in financial efficiency is the increase in the extinguishing agent utilization factor to 95 %, which, compared to water (where this indicator is only 5 %), allows for the practical elimination of excessive runoff. It has been proven that the use of compressed air foam with the modifying additive ensures an 80-fold reduction in

secondary damage: from 475,000 UAH (for water) to 5,938 UAH per conventional residential fire. The calculated total economic effect is 469,062 UAH, which allows for the offsetting of capital expenditures for retrofitting fire engines with CAFS after extinguishing only a few high-profile fires, with the full payback period for the equipment of one unit being 5 years. Additionally, recommendations for optimal foam generation parameters were formulated, namely: an additive concentration of 3 %, an expansion ratio of 18, and a working pressure of 6 bar. The results emphasize that the transition from water suppression to the use of compressed air foam with modifying additives represents a shift from a quantitative to a qualitative method of protection, ensuring maximum preservation of property and building infrastructure.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. **For the first time**, the regularities of the influence of modifying additives – ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, ammonium carbonate, potassium carbonate, and potassium chloride – within the aqueous foam-forming solution on the processes of compressed air foam formation, its expansion ratio, and stability have been established, allowing for the determination of the feasibility of using additives to enhance fire-extinguishing efficiency.

2. **For the first time**, a mathematical model in the form of second-order polynomials has been obtained, describing the dependence of the fire-extinguishing efficiency indicator of compressed air foam on the concentration of modifying additives (ammonium hydrogen phosphate, ammonium dihydrogen phosphate, and ammonium carbonate) in the aqueous foam-forming solution and the foam expansion ratio, enabling the determination of the optimal composition of the aqueous foam-forming solution from the perspective of fire-extinguishing efficiency.

3. **For the first time**, quantitative indicators of the fire-extinguishing efficiency of compressed air foam with the modifying additive ammonium dihydrogen phosphate in the aqueous foam-forming solution have been obtained in

comparison with other water-based extinguishing agents; as a result, it was confirmed that the fire-extinguishing efficiency of compressed air foam with this additive is 15 % higher than that of traditional compressed air foam, 28 % higher than gel-forming compositions, and 77 % higher than water.

4. **An existing** prototype of a compressed air foam generation and delivery system has been improved by integrating a hardware-software complex for flow control, which, unlike existing systems, ensures increased precision in component dosing and real-time monitoring of foam formation parameters.

Keywords: compressed air foam, modifying additives, fire-extinguishing properties, Class A fires, extinguishing efficiency, foam stability, expansion ratio, compressed air foam systems (CAFS), water.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН	30
1.1. Водні вогнегасні речовини та їх застосування у пожежогасінні.....	30
1.2. Аналіз застосування компресійної піни для гасіння пожеж.....	41
1.3. Характеристики модифікувальних добавок та їх застосування у водних вогнегасних речовинах	48
Висновки до розділу 1.....	59
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ	61
2.1. Розробка лабораторного зразка для дослідження властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі	61
2.2. Результати експериментального дослідження властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі та доцільності їх застосування	68
2.3. Результати порівняння властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками з компресійною піною традиційного складу.	80
Висновки до розділу 2.....	83
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ВОГНЕГАСНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ.....	86
3.1. Результати експериментальних досліджень визначення вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі	91
3.1.1. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ за планом першого порядку.....	91
3.1.2. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ за планом другого порядку	100

3.1.3. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ за планом першого порядку	106
3.1.4. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ за планом другого порядку.	111
3.1.5. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за планом першого порядку.	116
3.1.6 Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за планом другого порядку.....	121
3.2. Визначення та порівняння показників ефективності гасіння компресійної піною із модифікувальними добавками	126
Висновки за розділом 3.....	133
РОЗДІЛ 4. ПОРІВНЯННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ З МОДИФІКУВАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ З ІНШИМИ ВОДНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ	135
Висновки за розділом 4.....	141
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ІЗ МОДИФІКУВАЛЬНОЮ ДОБАВКОЮ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	143
5.1. Економічне обґрунтування доцільності застосування компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ при гасінні пожеж класу А	143
5.2. Розробка рекомендацій із застосування компресійної піни із модифікувальними добавками для гасіння пожеж класу А.....	148
Висновки до розділу 5.....	150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	152
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	157
ДОДАТОК А. Список публікацій за темою дисертації	171
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	177

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ОДИНИЦЬ
ВИМІРЮВАННЯ**

- AFFF – Aqueous Film-Forming Foam Concentrates (фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі)
- CAF – compressed air foam (компресійна піна)
- ВВР – водні вогнегасні речовини
- ГР – горючі рідини
- ГУС – гелеутворюючі системи
- ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій
- КП – компресійна піна
- ЛЗР – легкозаймисті рідини
- МД – модифікувальна добавка
- ПАР – поверхнево-активні речовини
- ПУ – піноутворювач
- CAFS – compressed air foam system (система генерування і подавання компресійної піни)
- ТГМ – тверді горючі матеріали

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За механізмом припинення горіння під час гасіння ТГР застосовують вогнегасні речовини переважно охолоджувальної дії. Тому під час гасіння ТГР найбільш поширеним вогнегасним засобом є вода. Її переваги полягають у дешевизні та простоті використання, але головним недоліком є низький коефіцієнт використання, оскільки лише 5-10 % витрачається саме для гасіння осередку пожежі.

Шляхами підвищення вогнегасної ефективності води є додавання до її складу модифікувальних добавок, поверхнево-активних речовин, піноутворювачі та інгібіторів горіння. На сьогодні поширення набули різноманітні водні вогнегасні речовини, зокрема змочувачі, гелеутворювальні сполуки, водні розчини неорганічних солей, комбіновані водні та водопінні вогнегасні речовини. Деяким з них притаманна комбінована вогнегасна дія, яка полягає у одночасному поєднанні різних механізмів припинення горіння. Але, у зв'язку з високою вартістю та складністю застосування переважна кількість водних вогнегасних речовин залишається у вигляді дослідних зразків, та не впроваджена у практику пожежогасіння.

Дотепер вода залишається найбільш поширеною вогнегасною речовиною для гасіння пожеж класу А. Альтернативним водним вогнегасним засобом є компресійна піна, яка набула широкого поширення у провідних країнах світу, зокрема США, Німеччини, Китаю та ін. У компресійній піні за рахунок процесу її генерування досягається висока змочувальна здатність, проникаюча властивість та стійкість утвореної піни, що робить її більш ефективною у порівнянні з водою.

Недоліком компресійної піни є вогнегасна дія лише за двома механізмами припинення горіння, а саме охолодженням та ізолюванням.

Значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з вивченням водних вогнегасних речовин, у тому числі

компресійної піни, було проведено такими вченими, як Кодрик А. І., Тітенко О. М., Виноградов С. А., Шахов С. М.

В роботах згаданих авторів розглянуто застосування компресійної піни для гасіння як ЛЗР так і ТГМ. Низку досліджень присвячено підвищенню вогнегасної ефективності компресійної піни за рахунок варіювання кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, зміни співвідношення повітря/розчин піноутворювача, застосуванню різних видів піноутворювачів. Але поза увагою авторів залишилося дослідження, спрямовані на підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні пожеж класу А, за рахунок додавання до її складу модифікувальних добавок, та визначення найбільш ефективної модифікувальної добавки, яка надає піні змогу впливати на процес горіння одразу за трьома механізмами припинення горіння.

Отже, питання підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікувальних добавок для підвищення ефективності 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-дослідної роботи «Підвищення ефективності гасіння пожеж з використанням компресійної піни удосконаленого складу» (№ державної реєстрації 0126U000421), в які автор брав участь як виконавець. Також виконано науково-дослідну роботу «Обґрунтування параметрів переносної системи гасіння компресійною піною» для товариства з обмеженою відповідальністю «Промислова компанія "Пожмашина"», в які автор брав участь як відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження відповідно до предмета та об'єкта дослідження.

Метою роботи є підвищення вогнегасної ефективності компресійної

піни за рахунок використання модифікувальних добавок при гасінні пожеж класу А.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання досліджень:

- 1) Проаналізувати способи підвищення вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин;
- 2) Дослідити експериментальним шляхом вплив модифікувальних добавок на властивості компресійної піни;
- 3) Дослідити експериментальним шляхом вплив модифікувальних добавок на вогнегасні властивості компресійної піни;
- 4) Здійснити порівняльний аналіз вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою з іншими водними вогнегасними речовинами;
- 5) Провести економічне обґрунтування ефективності використання компресійної піни з модифікованими добавками та розробити рекомендації щодо її застосування.

Об'єкт дослідження – процес гасіння компресійною піною пожеж твердих горючих речовин.

Предмет дослідження – вплив вмісту модифікувальних добавок в компресійній піні на її властивості, вогнегасну здатність та процеси гасіння нею пожеж твердих горючих речовин.

Методи досліджень. В дисертаційній роботі застосовано комплексний підхід до досліджень, який охоплює аналіз та систематизацію сучасних науково-технічних здобутків у сфері застосування компресійної піни для гасіння пожеж класу А.

Експериментальну оцінку вогнегасної ефективності компресійної піни проводили з використанням методології факторного планування експерименту. Отримані теоретичні та експериментальні дані піддавали статистичній обробці з використанням спеціалізованого програмного забезпечення та сучасних комп'ютерних засобів.

Вимірювання виконувалися за допомогою повірених та метрологічно атестованих приладів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. **Вперше** встановлено закономірності впливу модифікувальних добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію, карбонат калію та хлорид калію у складі водного розчину піноутворювача на процеси піноутворення компресійної піни, її кратність та стійкість, що дозволяє визначити доцільність використання добавок для підвищення вогнегасної ефективності

2. **Вперше** отримано математичну модель у формі поліномів другого порядку, що описує залежність показника вогнегасної ефективності компресійної піни від концентрації модифікувальних добавок гідрофосфат амонію, дигідроортофосфат амонію, карбонат амонію у складі водного розчину піноутворювача та кратності компресійної піни, що дозволяє визначати оптимальний склад водного розчину піноутворювача з точки зору вогнегасної ефективності

3. **Вперше** отримано кількісні показники вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою дигідроортофосфат амонію у складі водного розчину піноутворювача у порівнянні з іншими водними вогнегасними речовинами, у результаті чого підтверджено, що вогнегасна ефективність компресійної піни із цією добавкою на 15% вище за вогнегасну ефективність компресійної піни традиційного складу, на 28 % – гелеутворювальних складів та на 77 % – води.

4. **Удосконалено** наявний зразок системи генерування та подавання компресійної піни за рахунок інтеграції апаратно-програмного комплексу контролю витрат, що на відміну від існуючих, забезпечує підвищення точності дозування компонентів і контроль параметрів піноутворення у режимі реального часу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та науковому обґрунтуванні оптимального складу модифікованої компресійної

піни, призначеної для ефективної ліквідації пожеж класу А. Удосконалено наявну систему генерування та подавання компресійної піни шляхом розробки апаратно-програмного комплексу, що дозволяє з високою точністю керувати процесом генерування піни та дозуванням компонентів. На основі проведених випробувань визначено найбільш дієву сполуку серед фосфатів та карбонатів амонію, що забезпечує найкращі вогнегасні властивості при збереженні стабільної структури піни. Використання запропонованого складу дозволяє суттєво скоротити час гасіння та мінімізувати витрату вогнегасної речовини порівняно з традиційними засобами, такими як вода або гелеутворювальні розчини. Результати роботи можуть бути використані конструкторськими бюро при розробці сучасних систем пожежогасіння та пожежно-рятувальними підрозділами для підвищення оперативності ліквідації надзвичайних ситуацій.

Матеріали дисертації впроваджено у діяльність ТОВ «КОМПАНІЯ ТІТАЛ» (акт від 07.05.2026 р.), учбовий процес (акт від 14.05.2026 р., дисципліна «Протипожежна та аварійно-рятувальна техніка, інженерна техніка», тема «Основи пінного гасіння. Пожежні автомобілі пінного гасіння») та ГУ ДСНС України у Чернівецькій області (акт від 19.05.2026 р.).

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені у дисертації, особисто отримані автором на основі експериментальних та теоретичних досліджень, спрямованих на підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні пожеж класу А шляхом додавання модифікувальних добавок до її складу.

Особистий внесок здобувача у працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: у роботах [1-3] автор провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності. За результатами аналізу встановив, що сьогодні відсутні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікувальні добавок; у [4-6] розглянув та проаналізував модифікувальні

добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізовано експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у ВВР. На підставі проведеного аналізу для підвищення ефективності компресійної піни у її складі, згідно з розробленою класифікацією модифікувальних добавок, обрав сполуки, що належать до I, II та IV типів: гідрофосфат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$, дигідроортофосфат амонію $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, карбонат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$, карбонат калію (K_2CO_3) , хлорид калію (KCl) ; в [7-9] запропонував систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють. Розробив систему вимірювання витрати водного розчину і повітря, яка являє собою апаратно-програмний комплекс; в [10,11] експериментальним шляхом автор визначив вплив п'яти модифікувальних добавок $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, K_2CO_3 та KCl у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни. На підставі результатів обрав добавки $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, для подальшої оцінки вогнегасної ефективності компресійної піни; у роботі [12] визначив вплив наявності домішок $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, у водному розчині піноутворювача у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на вогнегасні властивості компресійної піни та порівняв їх ефективність. На підставі результатів експериментальних досліджень та їх оцінки встановив, що найбільш ефективною є компресійна піна із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Отриманий показник ефективності гасіння на 11 % вищий, ніж показник КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та на 26 % більший за показник КП із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Згідно цього обрав зазначену добавки для подальших експериментальних досліджень; у [13] визначив та порівняв вогнегасну ефективність компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ із компресійною піною традиційного складу, водою та гелеутворювальним складом при гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А. У результаті для КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

становить $P_{e.g.} = 16,5 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для КП традиційного складу $P_{e.g.} = 14,03 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для ГУС $P_{e.g.} = 11,9 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для води $P_{e.g.} = 3,94 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Отримані результати підкреслили, що застосування МД у складі КП, зокрема $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ забезпечує вогнегасну ефективність компресійної піни, яка є на 15 % вищою порівняно з КП традиційного складу, на 28 % вище відносно до ГУС та на 77 % відносно до води, при гасінні пожежі класу А.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційного дослідження представлені та отримали підтримку на науково–практичних конференціях різного рівня:

- Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення», м. Львів (2022 р.);

- Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики - запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням», м. Харків, НУЦЗ України, (2022 р.);

- Круглий стіл «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків», м. Харків, НУЦЗ України, (2023 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки 2022» («Fire Safety Issues 2022»); м. Харків, НУЦЗ України, (2022 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надзвичайних ситуацій - 2023» («Problems of Emergency Situations – 2023»), м. Харків, НУЦЗ України, (2023 р.);

- Круглий стіл «Об'єднання теорії та практики - запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням», м. Харків, НУЦЗ України, (2023 р., 2024р.);

- Науково-практична конференція «Проблемні питання тактики дій та всебічного забезпечення військових формувань і правоохоронних органів держави в умовах воєнного стану», м. Харків, НАНГ України, (2023 р.);

- Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні питання з розроблення та спеціалізованих автотранспортних засобів в умовах воєнного стану», м. Київ, (2023);

- Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту», м. Харків, НУЦЗ України, (2023 р.);

- Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», м. Черкаси, НУЦЗ України, (2023 р.);

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, з них 3 статті у наукових журналах, які входять до бази даних Scopus, 3 статті – у наукових фахових виданнях України, 6 тез доповідей на наукових конференціях та отримано 1 патент на корисну модель.

Дисертаційна робота складається із анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 181 сторінку основного тексту, містить 34 таблиці та 50 рисунків. Список використаних джерел складається з 111 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДНИХ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН

1.1. Водні вогнегасні речовини та їх застосування у пожежогасінні

Відповідно до ДСТУ 2272:2006 [14] термін «Вогнегасна речовина» має таке визначення – це речовина або однорідна суміш, за своїми фізико-хімічними властивостями придатна для застосування в технічних засобах, задля припинення горіння. Вогнегасні речовини мають різні фізико-хімічні властивості, залежно від сфери їх застосування. Для різних класів пожеж рекомендовано застосовувати відповідну вогнегасну речовину, яка діє на процес горіння за певним механізмом [15]. На сьогодні поширеним залишається виникнення пожеж, пов'язаних із горінням твердих горючих матеріалів. Найбільшого поширення під час гасіння таких пожеж набули вода та вогнегасні речовини, основою яких вона є.

У таблиці 1.1 наведено відомості щодо вогнегасних речовин, які застосовуються у пожежогасінні на сьогодні.

Таблиця 1.1 – Водні вогнегасні речовини [16]

Види водних вогнегасних речовин	Клас пожежі	Хімічна основа	Приклади
Вода	А	H ₂ O	
Рідиннофазові водні H ₂ O+ПАР	А	H ₂ O+ПАР	Дослідні зразки Вода зі змочувальниками
Рідиннофазові водоемульсійні	В, А, С	H ₂ O+модифікувальні добавки	Дослідні зразки
Рідиннофазові гелеутворювальні	А, В	H ₂ O+модифікувальні добавки	Prevento; дослідні зразки
Рідиннофазові комбіновані	А, В, С	H ₂ O+ПАР+ПГ+модифікувальні	Дослідні зразки; ОС-5; ОС-А1

		добавки	
Рідиннофазові водопінні	В, А	H ₂ O+піноутворювачі	Пірена 1; Пірена 2; Пірена 3; Альпен; Альпен М; Пайрокул; ПО-63РЗ; ПО-63М (Морпен); ПО-РЗФ; ПО-РЗП «Заполярий»

Вода. Вода є найбільш поширеним вогнегасним засобом. Воду застосовують у 80 % випадків виникнення пожеж. Домінуючою властивістю води є охолодження. При гасінні пожеж водою відбувається охолодження не зони горіння, а горючої речовини, відповідно охолодити водою гази або легкозаймисті рідини практично неможливо. Саме тому спосіб охолодження водою набув поширення при гасінні твердих горючих матеріалів.

Характерною властивістю води є її підвищення термічна стійкість: лише при температурі 1700°C і більше пари води починають розкладатися. У свою чергу температура горіння більшої частини поширених твердих горючих речовин не більше 1300°C.

Ліквідацію горіння водою досягають за рахунок комбінованої вогнегасної дії, зокрема охолодження, розбавлення та ізоляції. Але домінуючим є охолодження. Для підвищення швидкості охолоджувальної дії та площі контакту води із твердим горючим матеріалом на практиці в залежності від конкретних випадків застосовують компактні або розпилені струмені води. Ці способи підвищують швидкість процесу гасіння, але незначно знижують інтенсивність її подавання.

Загальним недоліком цього традиційного способу пожежогасіння є нерівномірність зрошування зони пожежі, при цьому із загальної кількості води, безпосередньо на гасіння використовується всього від 6 до 10 відсотків від поданого об'єму, а в окремих випадках – не більше 1 % [17-19].

Для підвищення вогнегасної ефективності води необхідно знизити коефіцієнт поверхневого натягу і збільшити змочувальну здатність. У цьому випадку при контакті з з горючою поверхнею, вода покриває більшу площу та проникає у пори матеріалу.

Це досягається за рахунок отримання інших водних вогнегасних речовин на основі води. Відповідно до неї додають:

- поверхнево-активні речовини;
- модифікувальні добавки;
- інгібітори горіння;
- піноутворювачі.

Рідиннофазові водні вогнегасні речовини або змочувальники.

Змочувальники отримують шляхом додавання до води поверхнево-активних речовини. Відповідно у разі застосування води із вмістом 0,1-2 % поверхнево-активних речовин змінюються її властивості. Відбувається зниження поверхневого натягу води, підвищується змочувальна здатність та вогнегасна ефективність (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1. – Приклад зниження поверхневого натягу: а) вода;
б) змочувальник

Чим менший поверхневий натяг розчину води з ПАР, тим більше буде утворюватися краплин із того самого об'єму рідини, і відповідно тим більше буде їх сумарна площа та поверхня. У результаті чого підвищується швидкість випаровування води, відбувається прискорене зниження

температури та осадження диму, продукти термодеструкції розбавляються до не горючих концентрацій. Наслідком зниження є підвищення змочувальної здатності, а отже проникаюча властивість розчину у пори твердого матеріалу. Від змочувальної здатності залежить і швидкість розтікання по поверхні матеріалу, що має суттєвий вплив на ефективність гасіння.

Змочувачі, що використовуються для зниження поверхневого натягу води, є поверхнево-активними речовинами, здатними адсорбуватися на межі розділу вода-повітря і розташовуватися певним чином. Такі речовини можна розділити на дві групи: іоногенні та неіоногенні. До першої групи належать речовини, здатні у воді дисоціювати протилежно заряджені частинки. До таких сполук належать алкілсульфати первинних та вторинних спиртів, алкіларилсульфонати (сульфонати НП-1 та НП-5, змочувач НБ), алкілсульфонати, а також піноутворювач ПО-1, змочувач ДС-РАС, ДБ, емульгатор ОП-4.

Рідиннофазові водоемульсійні водні вогнегасні речовини.

Рідиннофазові водоемульсійні вогнегасні речовини отримують шляхом додавання у воду модифікувальних добавок. У фундаментальних працях [15,19,20] модифікувальними добавками є неорганічні сполуки солей.

Широке впровадження знайшли діамонійфосфат та карбамід. Їх застосовують для гасіння лісових пожеж. Також встановлено, що 10 %-ми водними розчинами гідрокарбонатів натрію та калію, а також карбонатів натрію та калію можливе гасіння нафтопродуктів, спиртів, ефірів і інших рідин, які водою гасить не вдається. Але слід зауважити, що механізм дій цих модифікувальних добавок у повному обсязі не вивчений.

Прикладом може бути застосування розчинів солей хлоридів кальцію і амонію, глауберової солі. При інтенсивному тепловому впливі підвищення вогнегасної здатності зазначених розчинів полягає у створенні плівки на поверхні матеріалу, при випаданні в осад з водного розчину. Ця властивість також притаманна водним розчинам гідрофосфатам амонію та деяким солям, що утворюють кристалогідрати з великою кількістю кристалізаційної води,

наприклад солі алюмінію, магнію, кальцію та тривалентного заліза [21]. Створена плівка на поверхні твердого матеріалу має теплозахисну і ізолюючу дію.

За рахунок введення карбонатів, хлоридів, бікарбонатів лужних металів підвищується водночас і густина і в'язкість води, що має вплив на підвищення кінетичної енергії струменя вогнегасної речовини. Такі модифікувальні добавки знижують в'язкість води за великих швидкостей потоку рідини. Вважається, що молекули деяких водорозчинних полімерів під час руху води орієнтуються переважно вздовж потоку рідини (ефект Томаса) і знижують інтенсивність турбулентних пульсацій, що призводить до зменшення гідравлічного опору.

До складових вогнезахисної та вогнегасної дії водних розчинів із модифікувальними добавками також відносять поглинання тепла при розкладанні неорганічних сполук. Але слід зауважити, що суттєвий вплив ця складова має лише за умов невисоких температур розкладання. Однак істотний внесок ця складова може мати за відносно невисоких температур розкладання. Це пояснюється тим, що температура на поверхні твердих речовин не перевищує 700–800°C [21].

Для води спостерігається недостатньо висока охолоджувальна дія при подаванні на поверхні, температура яких більше ніж 165–170 °C (ефект Лейденфроста). Підвищити охолоджувальну здатність також можливо за рахунок використання модифікувальних добавок. Зменшити вплив цього ефекту дозволяє застосування водяних розчинів солей. При попаданні води із модифікувальними добавками на нагріту поверхню спостерігається послаблення ефекту утворення парового прошарку між водним розчином та нагрітою поверхнею [21]. Це супроводжується підвищенням інтенсивності тепловідведення від нагрітої поверхні.

Також застосування знайшли суспензії деяких речовин у воді: оксиди бору, карбонати кальцію та магнію, оксиди та гідроксиди металів. Однак практичного застосування вогнегасні композиції на основі суспензій не

знайшли через низьку стійкість таких систем і труднощів пов'язаних з їх подачею.

Одним із недоліків води, що ускладнюють її застосування при негативних температурах, є відносно висока температура замерзання. Для зниження температури замерзання води застосовуються спеціальні добавки – антифризи.

З інших функціональних добавок до води як вогнегасної речовини необхідно відзначити використання інгібіторів корозії. Особлива необхідність їх застосування виникає при застосуванні водних розчинів солей і кислот. Вибір інгібіторів корозії визначається характером матеріалів і умовами їх застосування.

Наявність модифікувальних добавок у воді забезпечує комплексний вплив на вогнегасну речовину [21], а саме:

- 1) забезпечення функцій антипіренів, завдяки чому відбувається просочування у горючий матеріал, наслідком чого є ускладнення його горіння;
- 2) забезпечення механізму інгібування, за рахунок чого відбувається вплив на полум'яну фазу горіння;
- 3) утворення твердих плівок на поверхні горючого матеріалу після випаровування рідкої фази, яким притаманні ізолюючі та теплозахисні властивості.
- 4) зниження температури замерзання.

Рідиннофазові гелеутворювальні вогнегасні речовини.

Гелеутворювальні рідиннофазові вогнегасні речовини отримують шляхом додавання до води полімерних добавок. При підвищенні температури, ці розчини здатні до гелеутворення, а саме створення вогнезахисного покриття на поверхні горючого матеріалу. Гелеутворюючі системи складаються з двох, або більше компонентів, що одночасно або роздільно подаються до змішувальної камери або на поверхню матеріалу. Перший склад являє собою розчин гелеутворюючого компоненту, а другий –

розчин каталізатора гелеутворення. При взаємодії двох розчинів спочатку відбувається процес золь-гелю, а потім стійкого гелю. Гель утворює на поверхні нетекучий вогнезахисний прошарок, який надійно утримується на вертикальних і похилих поверхнях (рисунок 1.2)



а)

б)

Рисунок 1.2 – Вогнезахисний шар ГУС [21]: а) модельне вогнище, погашене ГУС $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7 \text{SiO}_2$; б) модельне вогнище, погашене ГУС $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7 \text{SiO}_2$.

Вогнегасна ефективність гелеутворюючих розчинів вища за вогнегасну здатність води у 1,5-2 рази [22,23]. Поширеними гелеутворюючими добавками є полісилікат натрію, поліакриламід і метилцелюлоза [23, 24].

Вогнегасна перевага ГУС над водою полягає у зменшеній витраті, за рахунок високого коефіцієнту поверхневого натягу, наслідком чого є відсутність стікання. Зокрема відбувається створення ізолювального вогнезахисного прошарку на поверхні матеріалу [21-23]. Завдяки цьому час потрібний на гасіння менший, і знижуються вторинні збитки від надмірного проливу вогнегасної речовини. Вагомий внесок у дослідження використання гелеутворювальних сполук проведено науковцями з Національного університету цивільного захисту України [25-30].

Використання добавок рідкого скла суттєво змінює в'язкість та щільності розчину. Така зміна в'язкості водних розчинів, використовуваних для гасіння пожеж, практично недосяжна при використанні органічних або інших неорганічних загусників. При цьому істотно підвищується щільність

розчину, що сприяє збільшенню кінетичної енергії руху струменя розчину в порівнянні з енергією струменя води, спрямованої в осередок горіння з однаковою швидкістю. Дальність польоту струменя розчину при цьому також збільшується.

Новітнім видом гелів є гідрогель алюмінію [31] з різною концентрацією в розчині, отриманий на основі реакції кристалогідрату сульфату алюмінію ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) з поташем (K_2CO_3). Для нього притаманні одразу три механізми гасіння, зокрема охолодження, ізоляцію і інгібування, наслідком чого є зниження витрати вогнегасної речовини. Застосування поташу у гідрогелі алюмінію підвищує вогнегасну ефективність водного вогнегасного розчину при гасінні пожежі. Також при попаданні у зону високої температури, гідрогель алюмінію розкладається з утворення плівки оксиду алюмінію та води.

Але практичне застосування ГУС не набуло широкого поширення через складність реалізації технології застосування.

Рідиннофазові комбіновані вогнегасні речовини.

Комбіновані вогнегасні речовини отримують шляхом додавання до води різних добавок, зокрема поверхнево-активних речовин, модифікувальних добавок та інгібіторів горіння. Комбінування різноманітних добавок підвищує вогнегасну ефективність води, за рахунок зміни її фізико-хімічних властивостей. Окрім охолоджувальної домінуючої дії, наявність добавок у воді сприяє підвищенню ліквідації полум'я іншими механізмами припинення горіння.

Прикладом застосування комбінованих вогнегасних складів із ПУ та модифікувальними добавками є вогнегасні склади [32], що спінюються в осередку пожежі. Ці композиції є емульсіями легколетких рідин у воді, що містить піноутворювач. При попаданні в осередок горіння за рахунок швидкого випаровування легколеткої рідини утворюється піна. Перевага подібних складів перед звичайною подачею піни полягає у суттєвому збільшенні дальності подачі та збільшенні їхньої проникаючої здатності.

Суттєвий вплив на підвищення вогнегасної ефективності води має одночасне застосування загусників і змочувачів. У результаті зменшується поверхневий натяг та підвищується проникаюча здатність, що зменшує витрати та надмірний пролив водного розчину [33].

У разі додавання до розчину води із ПАР, модифікувальних добавок у вигляді антипіренів підвищується ефективність гасіння матеріалів, що схильні до тління. Їхня присутність у вогнегасній комбінованій речовині істотно впливає на повторне займання, що особливо актуально при гасінні великих пожеж. Також до комбінованих водних вогнегасних речовин додають інгібітори корозії, антифризи, гідродинамічно активні речовини. Зазвичай у таких комбінованих речовинах використовують добавки, які виконують одразу декілька функцій. Прикладом можуть бути фосфати амонію, які виконують одночасно роль антипірену, інгібітора корозії, антифризу та сполуки, що утворює при нагріванні вогнезахисну плівку [21].

Рідиннофазові водопінні вогнегасні речовини.

Пінні вогнегасні речовини отримують шляхом додавання до води ПУ та повітря. Першим представником водопінного вогнегасного засобу була хімічна піна, запропонована інженером А.Г. Лораном. Як піноутворювач він рекомендував водні розчини сірчаноокислого алюмінію та бікарбонату натрію з добавкою солодкового екстракту чи сапоніну. Подібні суміші були використані для гасіння полум'я нафтопродуктів понад півстоліття.

На сьогодні найбільш поширеним водопінним вогнегасним засобом є повітряно-механічна піна. Переважно вона застосовується для гасіння пожеж класу В [34-39].

Одним з різновидів водопінних вогнегасних речовин є компресійна піна.

Компресійна піна (англійською Compressed Air Foam) – високодисперсна гомогенна піна низької кратності, яка генерується у спеціальних системах [40-46] – Compressed air foam systems (рисунок 1.3), шляхом змішування води піноутворювача та повітря під тиском [47,48]. У

літературі зустрічається також як: «газонаповнена», «пневматична піна», «легка піна».

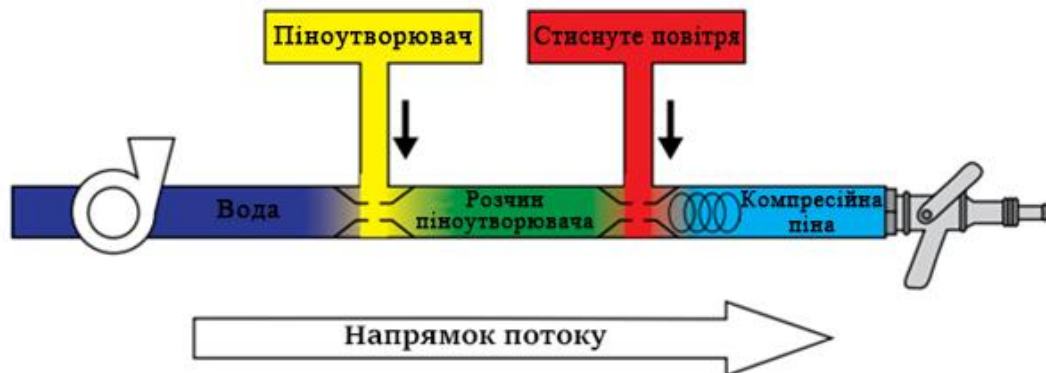


Рисунок 1.3 – Процес генерування компресійної піни у системах CAFS [49]

Відповідно до [50] компресійну піну в залежності від співвідношення повітря/рідина поділяють на три типи: «мокра» з кратністю від 1 до 5; «рідка», кратність від 5 до 10; «суха, або жорстка», з кратністю від 10 до 20 (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Типи компресійної піни за кратністю [51]

До переваг компресійної піни у порівнянні з водою відносять [52-55]:

- знижена витрата піноутворювача (у системах CAFS застосовують піноутворювачі класу А з робочою концентрацією від 0,1 до 1 %, генерування піни із таким вмістом піноутворювача досягається за рахунок нагнітання повітря під тиском);
- швидше поглинає тепло (технологія ONE SEVEN [41], завдяки якій з

одного і того ж об'єму рідини можливе утворення більшої кількості краплин/бульбашок, що позитивно впливає на процес поглинання тепла);

- зменшення ймовірності виникнення повторного займання, за рахунок високої проникаючої здатності у пори твердих матеріалів та речовин;

- зменшена вага рукавів, за рахунок знаходження у рукаві вже готової сгенерованої піни, яка переважно складається з газової фази;

- зменшує ймовірність руйнування конструкції від накопиченої ваги (у порівнянні з водою), за рахунок виключення стікання водного розчину піноутворювача с вертикальних та похилих поверхонь та надмірного його проливу;

- має високий коефіцієнт адгезії, за рахунок чого не стікає з вертикальних та похилих поверхонь, що забезпечує вогнезахисну здатність суміжних об'єктів;

- забезпечує функцію захисту горючих матеріалів від теплового потоку полум'я, за рахунок непрозорих бульбашок.

Отже, за результатом аналізу встановлено, що вода зі змочувальниками, гелеутворюючи вогнегасні склади, рідиннофазові водоемульсійні та комбіновані речовини на сьогодні не знайшли широкого впровадження в пожежогасінні та переважно залишаються в вигляді дослідних зразків. Це зумовлено складністю, яка полягає у технології застосування та економічною не вигідністю. Повітряно-механічну піну переважно застосовують для гасіння легкозаймистих горючих рідин. Аналіз механізмів вогнегасної дії ВВР дозволив встановити, що є експериментальні або дослідні зразки, які діють одразу за комбінацією декількох механізмів припинення горіння.

Але на сьогодні найбільш поширеною водною вогненною речовиною для гасіння твердих горючих речовин залишається вода, незважаючи на її недоліки, вона використовується переважно на більшій кількості пожеж. Підвищення її вогнегасної ефективності досягається за рахунок додавання ПАР, ПУ, модифікувальних добавок та інгібіторів горіння.

Альтернативою воді є компресійна піна, яка застосовується для гасіння твердих матеріалів і горючих рідин [52,56]. Експериментальним шляхом визначено, що при гасінні пожеж класу А компресійна піна має низку переваг у порівнянні з іншими водними вогнегасними речовинами, зокрема над водою [57]. До недоліків вогнегасної властивості компресійної піни можна віднести дію тільки за двома механізмами припинення горіння, а саме ізоляцію та охолодження. Компресійна піна не має інгібувального впливу на зону горіння, та не утворює вогнезахисне покриття на поверхні горючого матеріалу.

Одним зі шляхів вирішення цього недоліку є розробка нових або вдосконалення існуючих піноутворювачів [58-60]. Іншим напрямком є використання у її складі модифікувальних добавок.

Отже, наступним кроком необхідно провести аналіз наукових досліджень, спрямованих на використання компресійної піни при гасінні пожеж та підвищення її вогнегасної ефективності.

1.2. Аналіз застосування компресійної піни для гасіння пожеж

Використання компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин.

Авторами [61] проведено оцінку вогнегасної ефективності компресійної піни з кратністю 1:4, 1:7 та 1:10 під час гасіння модельного вогнища класу В. У тому числі для піни кратністю 4 порівняно вогнегасний ефект із застосування синтетичного та плівкоутворювального піноутворювачів. При однаковій інтенсивності та застосуванні піноутворювача AFFF найбільшу вогнегасну ефективність зафіксовано для піни кратністю 7. У свою чергу найменша вогнегасна ефективність спостерігалась за співвідношення повітря 1:10. Також авторами підкреслено переваги піноутворювача типу AFFF над синтетичним. (рисунок 1.5).

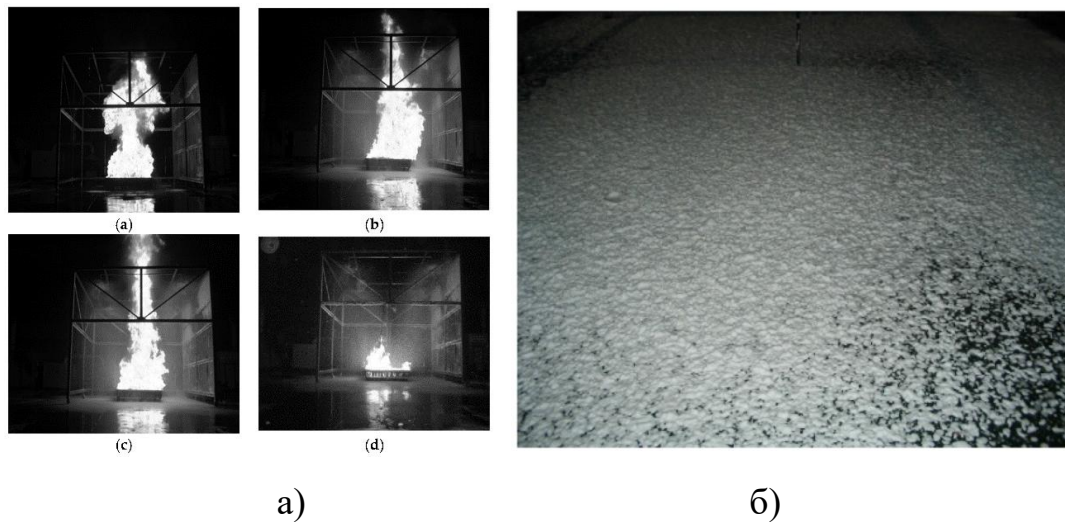


Рисунок 1.5 – Дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни для гасіння легкозаймистих горючих рідин: а) етапи гасіння; б) компресійна піна отримана з 3% розчину піноутворювача типу AFFF [61]

У роботі [62] порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни за різним вмістом піноутворювача у межах від 0,4 % до 1 %. Досліджували піну різної кратності, відповідно суха, мокра та рідка. У результаті найменший час 29 секунд при гасінні легкозаймистого палива зафіксовано для мокрої піни та концентрації піноутворювача 1 %. Найбільший час гасіння спостерігався для сухої піни і становив 100 секунд.

Авторами [63] було досліджено фізико-хімічні властивості компресійної піни під час гасіння пожежі в резервуарі з рідким паливом на основі механізму керування швидкістю горіння. Було виявлено, що при використанні фторвуглеводневих поверхнево-активних речовин, піні притаманна збільшена товщина плівки і нижчий коефіцієнт дифузії. Автори запропонували концепцію тактики гасіння. У роботі [64] порівняно експлуатаційні характеристики повітряно-механічної та компресійної піни за допомогою стаціонарної системи пожежогасіння. Модельне вогнище використано осередок пожежі класу В. Завдяки отриманим результатам встановлено, що компресійній піні притаманна більша стійкість у порівнянні з повітряно-механічною. Автори стверджують, що компресійна піна має

міцнішу і водночас тонку плівку. Підтверджено, що за рахунок використання стиснутого повітря, можливе генерування високодисперсної піни, яка рівномірно покриває дзеркало горючої рідини. У дослідженні [65] авторами у серії експериментів (рисунок 1.6) порівняно ефективність гасіння гептану компресійною піною, повітряно-механічною піною та розчинами піноутворювачів. Встановлено, що витрати компресійної піни на гасіння на 30 % менша порівняно з ПМП та на 87 % менша порівняно з розчином піноутворювача. Також порівняно вогнегасну ефективність піноутворювачу класу А з концентрацією 0,6 %, та плівкоутворюючого AFFF з концентраціями 1,5 %, 2 %, 3 %. У результаті час гасіння модельного вогнища компресійною піною із піноутворювачем класу А є у 2,4 раза меншим, ніж для повітряно-механічної піни..



Рисунок 1.6 – Дослідження ефективності застосування компресійної піни під час гасіння модельного вогнища класу Б [65]

Дослідження [66] присвячено вивченню властивостей компресійної піни під час гасіння оливи, яке використовується для охолодження

трансформаторів. У результаті підтверджено ефективність застосування піни, час гасіння модельного вогнища склав 3,9 хвилин, при інтенсивності подавання піни 11,2 л/(хв·м²). При цьому не спостерігалось повторного займання. Авторами [67] порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни різної кратності під час гасіння модельного вогнища з легкозаймистою рідиною. У експерименті застосовували піну кратністю 7, 10, 16, та 21. Найбільша вогнегасна ефективність спостерігалась для піни кратністю 10. При цьому не було зафіксовано повторного займання палива. Встановлена найбільш оптимальна витрата 3,48 л/(хв·м²). При цьому витрата розчину піноутворювача для запобігання розповсюдження полум'я повинна бути не менше 0,99 л/м², а для успішного гасіння 2,38 л/м². У роботі [68] автори оцінювали вогнегасну ефективність плівкоутворюючого піноутворювача у компресійній піні під час гасіння дизельного палива. При цьому автори замість повітря використовували азот (N₂) для генерування піни. При цьому визначено, що кратність піни 16 має найбільшу вогнегасну ефективність, час гасіння модельного вогнища склав 42 секунди. Також авторами проведено хімічний аналіз генерованої піни та визначено взаємозв'язок між кратністю піни та її стійкістю. За допомогою інфрачервоного аналізу автори стверджують, що домінуючим механізмом гасіння є охолодження. У [69] роботі авторами експериментальним шляхом порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни під час гасіння легкозаймистих рідин. Автори у ролі третього компонента у складі піни використовували як повітря, так і азот. Отже за результатами встановлено, що при генерування компресійної піни із азотом, її вогнегасна ефективність є вищою порівняно з піною, генерованої традиційним шляхом за допомогою повітря. У дослідженні [70] автори перевірили можливість генерування компресійної піни із морською водою. Оцінено стійкість генерованої піни із морською та прісною водою, результати 215,6 та 237,73 секунд відповідно. На 2 етапі дослідження за допомогою вогнегасника з компресійною піною досліджено ефективність гасіння модельного вогнища гептану. Авторами [71] проведено

експериментальне дослідження гасіння компресійної піною модельних вогнищ спиртів, зокрема етанолу та ацетону. Як вогнегасну речовину, застосовували піноутворювача типу AFFF-AR. Також оцінено ефективність застосування ПМП при однакових умов. За результатами встановлено, що стійкість та вогнегасна ефективність компресійної піна більша, ніж у повітряно-механічної. У разі застосування повітряно-механічної піни час гасіння більший ніж для компресійної. У дослідженні [72] авторами досліджено ефективність гасіння легкозаймистих рідин компресійною піною. У результаті визначено, що для успішного гасіння вогнища, інтенсивність подавання розчину піноутворювача, повинна бути у межах від 3,8 до 8 л/(хв·м²). Підвищення інтенсивності подавання супроводжувалось зменшенням часу гасіння. Під час зміни кратності піни від 8 до 12 суттєвих змін на вогнегасну ефективність не зафіксовано. Авторами [73] досліджено вогнегасну ефективність компресійної піни із використання фторсинтетичного піноутворювача, при гасіння бензину. Також автори додають до складу розчину піноутворювача хімічну сполуку (2-бром-3,3,3-трифторпропен). Найбільша вогнегасна ефективність спостерігалась для піни кратністю 9 і концентрації добавки 3,75 %. Час гасіння на 43 % менший відносно до зафіксованого часу гасіння піною без додавання хімічної сполуки. У експериментальному дослідженні [74] порівняно вогнегасну властивість компресійної піни при гасіння бензину. Для генерування піни застосовували стиснене повітря та азот. Для обох випадків зафіксовано ліквідування полум'я, при цьому рекомендовано подавати піни з інтенсивністю не менше 2,5 л/(хв·м²). Як стверджують автори, компресійній піні з азотом притаманна більша ефективність гасіння, але не достатньо суттєва відносно до компресійної піни, що генерована за допомогою стиснутого повітря. Авторами [75] експериментальним шляхом порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни під час гасіння модельних вогнищ класу В, зокрема метанолу та дизельного палива. Під час досліджень автори використовували піноутворювачі типу FP, AR, AFFF, S, а також

поєднання між собою. За результатами ефективності гасіння метанолу подано оцінку у вигляді переваг піноутворювачів наступним чином $FP/AR > AFFF > AFFF/AR > S > FP > S/AR$. Для дизельного палива спостерігали таку залежність $S > S/AR > AFFF > AFFF/AR > FP > FP/AR$.

Застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин.

У дослідженні [76] порівнюється вогнегасна ефективність компресійної піни (CAF) із звичайними засобами пожежогасіння, при гасінні модельних вогнищ пожеж класу А. Проведено серію експериментів на відкритому повітрі для аналізу ефективності піни з використанням синтетичних піноутворювачів класу А двох різних виробників та порівняння їх із водою та водно-пінним розчином, залежно від відстані гасіння. Результати показали, що в умовах випробувань компресійна піна мала найбільшу вогнегасну ефективність у порівнянні з водою та водним розчином піноутворювача. Результати містять вагомий внесок з питання використання ефективної концентрації піноутворювача.

Дослідження [77] присвячене порівнянню ефективності пожежогасіння чотирьох найбільш поширених засобів в однакових умовах. Випробування проводились із використанням стандартних модельних вогнищ 5А, а також системи пожежогасіння, що генерує повітряно-механічну та компресійну піну. Залежно від типу струменя охолоджувальна здатність вогнегасної води та води з піноутворювачем порівнювалася з охолоджувальною здатністю повного струменя мокрої, звичайної та сухої піни. Результати показують, що компресійній піні притаманна найбільша вогнегасна ефективність. У роботі встановлено зв'язок між охолоджувальною здатністю піни та змочувальною здатністю піноутворювача шляхом зіставлення результатів випробувань на вогнестійкість модельних вогнищ відповідно до DIN EN 3–7 та результатів лабораторних випробувань відповідно до DIN EN 1772. Авторами [78,79] досліджено вогнегасну ефективність компресійної піни гасінні модельних вогнищ класу А. У експерименті порівнювалася вогнегасна ефективність

піни кратністю 15, 20 та 25. При цьому концентрація піноутворювача варіювалась у межах від 4 % до 6 %. За двома показниками гасіння найбільша вогнегасна ефективність спостерігалась для піни кратністю 25. У роботі [80] порівняно (рисунок 1.7) вогнегасну ефективність компресійної піни, гелеутворюючих складів та води, під час гасіння стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу А. Визначено, що піна кратністю 25 з концентрацією робочого розчину піноутворювача 6 % ефективніше ліквідує загорання на 15 % та 80 % у порівнянні із ГУС та водою відповідно.



Рисунок 1.7 – Порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни та води [80]

У роботі [81] визначали вплив концентрації піноутворювача на ефективність гасіння компресійної піни при гасінні пожеж, зокрема твердих горючих речовин. Межі варіювання концентрації піноутворювача знаходились від 1,2 % до 12 %. У результаті встановлено, що при зниженні концентрації піноутворювача, має місце більший час гасіння, а саме при концентрації піноутворювача 12 % час гасіння менший у 2 рази порівняно з часом, який зафіксовано при концентрації піноутворювача 2,2 %. Дослідження [82] присвячено вивченню охолоджувальної дії компресійної піни під час гасіння модельних вогнищ класу А із піноутворювача власного виробництва, частина якого випадає в осад на поверхні горіння. У результаті експерименту підтверджено, що компресійна піна з таким типом піноутворювач ефективно ліквідує полум'я та запобігає повторному

займанню, за рахунок осаду на поверхні твердого горючого матеріалу.

За результатом огляду наукових праць можна зробити висновок, що на сьогодні немає відомостей про дослідження, присвячених застосуванню компресійної піни, у складі якої застосовуються модифікувальні добавки, і вивчення їх впливу на вогнегасну ефективність. Отже, наступним завданням є аналіз фізико-хімічних властивостей та їх застосування у водних вогнегасних речовинах.

1.3. Характеристики модифікувальних добавок та їх застосування у водних вогнегасних речовинах

Фізико-хімічні властивості модифікувальних добавок та механізм їх вогнегасної дії.

До першого типу модифікувальних добавок за напрямком дії можна віднести неорганічні сполуки, вплив яких змінює механізм термодеструкції целюлозних матеріалів [21]. Нижче подано характеристики добавок [83]:

- хлорид амонію (NH_4Cl), гігроскопічна тверда речовина, не має запаху, білий колір, у воді має слабкі кислотні властивості, не горюча. При нагріванні відбувається розкладання, яке супроводжується виділення токсичних газів, таких як оксиди азоту, аміак та хлорид водню. При вступанні в реакцію з нітратом амонію або хлоратом калію ймовірно виникнення пожежі або вибуху. Має дратівливий вплив на шкіру, органи дихання та зору. Розчинність у воді, г/100 мл при 25°C : 28.3 г (рисунок 1.8.а);

- хлорид натрію (NaCl), безбарвний кристал, негорючий. Не має негативного впливу на людину. Розчинність у воді, г/100 мл., при 20°C : 35,9 г. (рисунок 1.8.б);

- хлорид калію (KCl), гігроскопічні кристали, безбарвні. Негорючий. Має дратівливий вплив на органи зору та дихання. Розчинність у воді, г/100 мл., при 20°C : 34 г. (рисунок 1.8.в);

- хлорид магнію (MgCl_2). Кристалоподібна тверда речовина, білого кольору, не горюча. Розкладається при повільному нагріванні до 300 С. Розчиняється у воді з виділенням великою кількості тепла. Має дратівливий вплив на органи зору та дихання. Розчинність у воді, г/100 мл., при 20°C : 54.3 г. (рисунок 1.8.г);

- хлорид кальцію (CaCl_2), безбарвні або білі кристали, не мають запаху, не горючі. Розкладається при нагріванні, що супроводжується виділенням токсичної та їдкої пари хлору. В присутності води роз'їдає цинк, що супроводжується виділенням горючого/вибухонебезпечного газу. Речовина роз'їдає очі та має сильний дратівливий вплив на шкіру та органи дихання. Розчинність в воді, г/100 мл при 20°C: 74.5 г. (рисунок 1.8.д);

- гідрофосфат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$), кристали або порошок, без запаху, негорючий. Розкладається при температурі більше 100°C, що супроводжується виділенням токсичних та їдких газів, такі як оксиду азоту та оксиди фосфору. Має дратівливий вплив на органи зору. Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C: 57,5 г. (рисунок 1.8.ж);

- дигідроортофосфат амонію ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), кристали, безбарвні, не горючі. Має дратівливий вплив на органи зору. Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C: 35,3 г. (рисунок 1.8.е);

- сульфат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) безбарвні кристали, не мають виразного запаху, не горючі. Не мають негативного впливу на людину. При температурі вище +100°C розкладається з виділенням аміаку. Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C: 76,4 г. (рисунок 1.8.є).



а)



б)



в)



г)



д)

ж)

е)

е)

Рисунок 1.8 – Загальний вигляд першого типу модифікувальних добавок:
 а) NH_4Cl ; б) NaCl ; в) KCl ; г) MgCl_2 ; д) CaCl_2 ; ж) $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$; е) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$;
 є) $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Другим типом модифікувальних добавок є неорганічні сполуки, які незначно впливають на механізм термодеструкції деревини. Але вважається, що їм притаманні властивості інгібування полум'яної фази або здатність утворювати ізолюючу плівку на поверхні твердого матеріалу [21]. Нижче подано характеристики добавок [83]:

- бромід амонію (NH_4Br), безбарвний кристал (рисунок 1.9.а), не має запаху, негорючий. Його додають в органічні сполуки, що мають підвищену горючість. При нагріванні розкладається на сполуку, що подано рівнянням (1.1). Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C : 78,3 г.



- карбамід ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), безбарвні кристали або білі гранули (рисунок 1.9.б), без запаху. Температура розкладання $150-160^\circ\text{C}$. Негорючий та вибухонебезпечний. Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C : 58,3 г.



а)

б)

Рисунок 1.9 – Модифікувальні добавки другого типу: а) NH_4Br ; б)
 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

До третього типу модифікувальних добавок можна віднести неорганічні сполуки, напрямком дії яких є зменшення виділення летких горючих речовин під час термодеструкції. Зокрема вагомий внесок забезпечується у підвищення вогнезахисту процесу газовиділення. До них відносять [21]:

- гідрокарбонат натрію (NaHCO_3), дрібнокристалічний порошок білого кольору (рисунок 1.10.а), не горючий. При температурі $60\text{ }^\circ\text{C}$ починає розкладатися. Не має негативного впливу на людину. Розчинність в воді, г/100 мл., при $20\text{ }^\circ\text{C}$: 9,6 г [84];

- хлорид амонію (NH_4Cl);

- хлорид кальцію (CaCl_2);

- карбонат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), безбарвний кристал, (рисунок 1.10.б). Не стійкий як на повітрі так і у розчині. Негорючий. При температурі $60\text{ }^\circ\text{C}$ починає розкладатися. Розчинність в воді, г/100 мл., при $15\text{ }^\circ\text{C}$: 100,1 г., [83].

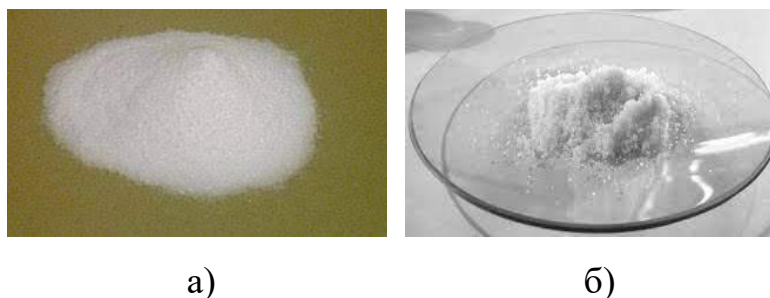
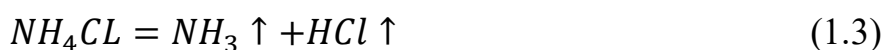
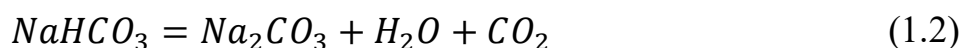
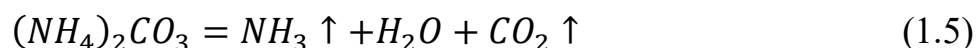


Рисунок 1.10 – Модифікувальні добавки третього типу: а) NaHCO_3 ; б) $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

При хімічному розкладанні зазначених солей виділяються гази, які мають розбавляючі та інгубуючі властивості під час процесу горіння у газовій фазі, відповідно до рівнянь (1.2-1.5):





До четвертого типу модифікувальних добавок відносять органічні та неорганічні сполуки, що мають властивості антифризів. Але переважно використовують неорганічні сполуки, оскільки окрім зниження температури замерзання їм притаманно підвищення вогнегасної здатності речовин. Серед них виділяють [21]:

- карбонат калію (K_2CO_3), безбарвний гігроскопічний кристал (рисунок 1.11), або порошок білий порошок, не горючий. Має дратівливий вплив на шкіру, органи зору та дихання. Розчинність в воді, г/100 мл., при 20°C: 112 г., [83];
- хлорид магнію (MgCl_2);
- хлорид кальцію (CaCl_2);
- хлорид алюмінію (AlCl_3).



а)

б)

Рисунок 1.11 – Четвертий тип модифікувальних добавок: а) K_2CO_3 у кристалічному вигляді; б) K_2CO_3 у вигляді порошку

За результатом огляду виділено чотири типи модифікувальних добавок, в залежності від механізму впливу на процес горіння твердих горючих матеріалів. За агрегатним станом та фізико-хімічними властивостями зазначені типи модифікувальних добавок можуть бути застосовані у компресійній піні. Наступним кроком є аналіз наукової періодики

застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах, для подальшого використання у складі компресійній піні.

Аналіз експериментальних досліджень підвищення ефективності водних вогнегасних речовин, за рахунок модифікувальних добавок

У [84] порівнювали вогнегасну ефективність водяного туману із водою, до якої додано полімерні композитні добавки та сіль NaCl, під час гасіння рідкого палива. Автори стверджують, що найбільшу вогнегасну ефективність має водяний туман. Вода із полімерними добавками також має достатньо високу ефективність гасіння. Використання модифікувальної добавки 1 % NaCl супроводжувалось зниженням ефективності гасіння. Авторами [85] розроблено водну вогнегасна речовину із вмістом 40 % солі CuCl_2 . При гасіння пожеж легкозаймистих рідин (рисунок 1.12) встановлено, що час гасіння пожежі класу В водною вогнегасною речовини із вмістом CuCl_2 , складає 0,6 с, що є у 26 разів ефективнішим ніж гасіння водяним аерозолем.

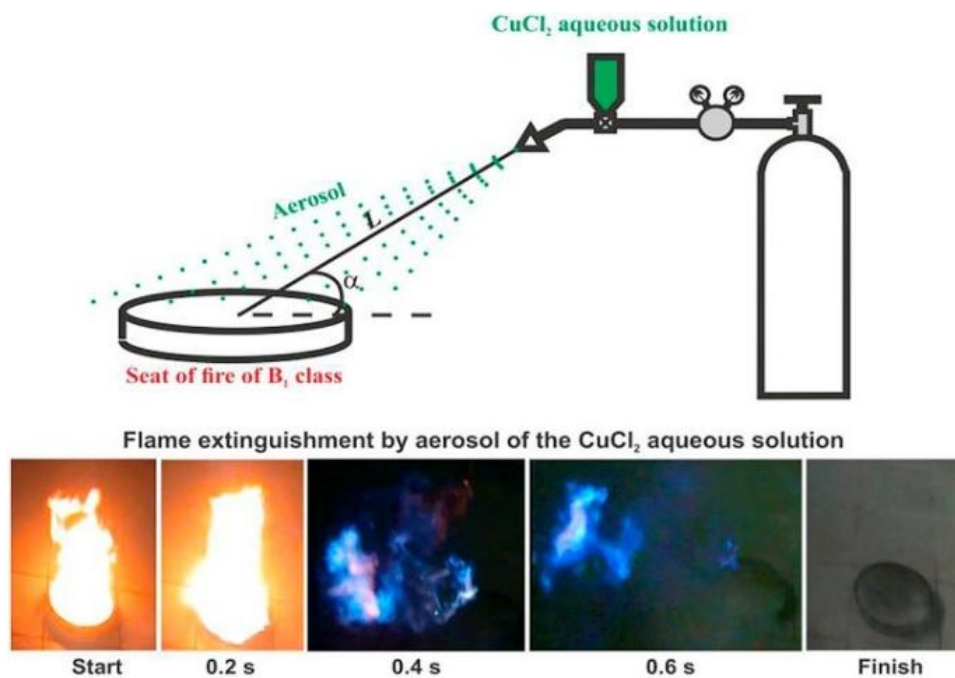


Рисунок 1.12 – Дослідження ефективності водної вогнегасної речовини із вмістом CuCl_2 [85]

У дослідженні [86] порівнювалась вогнегасна ефективність водяного туману із модифікувальними добавками KCl , KH_2PO_4 , $NH_4H_2PO_4$ та водяного туману без добавок, при гасіння метану CH_4 . У результаті встановлено, що наявність у складі водної вогнегасної речовини змінює ефективність гасіння. Вогнегасний ефект оцінено наступним чином: $KCl > KH_2PO_4 > NH_4H_2PO_4$. Автори використовували 2 % концентрацію добавок. У роботі [87] автори визначали вогнегасну ефективність водного розчину калій тетрахлокоупрату(II) різної концентрації на вуглеводневе полум'я. Показано, що нетривала дія аерозолем 40% водного розчину комплексної солі купруму(II) – $K_2(CuCl_4)$ на фронт вуглеводневого полум'я зумовлює його ефективне придушення, аж до повного гасіння. Мінімальний об'єм витрат 40% водного розчину калій тетрахлокоупрату (II) на гасіння осередку займання (вогнища класу B2) становить $(1,1 \text{ л/м}^2)$. Встановлено, що у разі гасіння займань різних вуглеводнів за допомогою водного аерозолу 40% $K_2[CuCl_4]$ витрати цієї водної вогнегасної речовини у 4,2 раза (для моноетаноламінового полум'я) та у 3,2 раза (для гексанового полум'я) менші за нормативні витрати водним аерозолем. Дослідження [88, 89] присвячено визначенню впливу модифікувальних добавок на основі силікату натрію та карбонату калію у складі води на її вогнегасну ефективність при гасіння твердих горючих речовин. Експериментальним шляхом порівняно ефективність гасіння стандартного модельного вогнища класу А водою та водою з модифікувальними добавками. Час гасіння модельного вогнища водою з 1 % вмістом Na_2SiO_3 та K_2CO_3 на 28-31 % менший ніж для води без цільових добавок. На гасіння потрібно було на 18 % менше об'єму води із цільовими добавками ніж при застосуванні води без домішок. Проведено експериментальні дослідження щодо впливу цільових добавок рідинного натрієвого скла Na_2SiO_3 та карбонату калію K_2CO_3 на гідравлічні характеристики та вогнегасну ефективність системи спринклерного пожежогасіння. У результаті дослідження виявлено, що при застосуванні води з вмістом 1 % Na_2SiO_3 та K_2CO_3 у діапазоні тиску 0,15-0,35 МПа витрата

спринклерного зрошувача на 10 % вище, ніж витрата води без цільових добавок, що свідчить про зниження гідравлічних втрат у трубопроводі системи пожежогасіння. При цьому час гасіння системою пожежогасіння заповненої водою із модифікувальними добавками на 30 % менший порівнянні з водою без добавок. Але, у дослідженні не порівняно вогнегасну ефективність системи пожежогасіння, що заповнена компресійною піною, у тому числі із вмістом модифікувальних добавок. Автори [90] досліджували вплив модифікувальних добавок NaCl, KCl або KHCO_3 на ефективність гасіння пожежі дрібнодисперсними водяними струменями. Додавання зазначених неорганічних сполук приводило до значного підвищення ефективності водяного туману. Найбільш значний ефект проявили солі калію, зокрема при використанні розчину KHCO_3 час гасіння був на 96 % менший відносно до води без добавок. Інші досліджені добавки, а саме MnCl_2 , ZnCl_2 і CuCl_2 , мають не достатньо високу різницю порівняно з водою. Інші зразки $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ і $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ фактично збільшували час, необхідний для гасіння полум'я. Для підвищення ефективності водяного туману автори [91] використовували модифікувальні добавки $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, NH_4HCO_3 і $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Для порівняння вогнегасної ефективності були обрані також добавки KCl та KH_2PO_4 . У результаті встановлено, що при використанні низьких концентрацій $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ та $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ має місце підвищення ефективності гасіння. Стосовно добавки NH_4HCO_3 цього не спостерігалось. При застосуванні $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ має місце найбільша вогнегасна ефективність з концентрацією (приблизно 0,01 моль л^{-1} при горінні н-гептану і 0,03 моль л^{-1} при горінні етанолу). Крім того, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (0,03 моль л^{-1}) більш ефективний ніж , KH_2PO_4 , при гасінні етанолу, і за показниками ефективності гасіння близький до KCl (0,067 моль л^{-1}).

У роботі [92], проведено порівняння вогнегасної ефективності водяного туману із вмістом добавок, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$, K_2CO_3 , KNO_3 , CH_3COOK , KCl, KHCO_3 та K_2SaO_4 (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Результати експерименту [92]

Модифікувальна добавка	Концентрація, %	Час гасіння, с	Вогнегасна ефективність, %
K_2CO_3	5	35.69	44.85
$K_2C_2O_4$	5	31.95	50.62
K_2SO_4	5	56.86	12.13
$KHCO_3$	5	48.90	24.43
KCl	5	44.61	31.05
CH_3COOK	5	44.00	31.99
KNO_3	5	38.48	40.52
$K_2C_2O_4(M1)-K_2CO_3(M2)$	5 % (M1:M2=1:1)	34.15	47.21
$K_2C_2O_4(M1)-KNO_3(M2)$		40.01	38.15
$K_2C_2O_4(M1)-CH_3COOK(M2)$		41.21	36.29
$K_2C_2O_4(M1)-KCl(M2)$		37.43	42.13
$K_2C_2O_4 (M1)-K_2SO_4(M2)$		30.10	53.47
$K_2C_2O_4 (M1)-KHCO_3(M2)$		42.92	33.65
$K_2CO_3(M1)-KNO_3(M2)$		39.27	39.29
$K_2CO_3 (M1)-CH_3COOK(M2)$		32.75	49.36
$K_2CO_3 (M1)-KCl(M2)$		33.10	48.83
$K_2CO_3 (M1)-K_2SO_4(M2)$		45.50	29.66
$K_2CO_3 (M1)-KHCO_3(M2)$		46.02	28.86
$KNO_3(M1)-CH_3COOK(M2)$		44.69	30.91
$KNO_3(M1)-KCl(M2)$		33.34	48.45
$K_2SO_4(M1)-KNO_3(M2)$		35.49	45.14
$KNO_3(M1)-KHCO_3(M2)$		48.47	25.06
$CH_3COOK(M1)-KCl(M2)$		46.55	28.04
$CH_3COOK(M1)-K_2SO_4(M2)$		36.78	43.14
$CH_3COOK(M1)-KHCO_3(M2)$		53.74	16.92
KCl(M1)- $K_2SO_4(M2)$		47.94	25.89
KCl(M1)- $KHCO_3(M2)$		57.70	10.81
$KHCO_3(M1)-K_2SO_4(M2)$	55.48	14.24	

Автори стверджують, що змішування солей калію в рівних пропорціях супроводжується виникненням синергетичного ефекту інгібування процесу горіння. Дослідження [93] присвячено вивченню ефективності гасіння гептану водяним туманом із добавкою КСІ. Досліджувались концентрації розчину КСІ (5 %, 10 %, 15 %, 20 %). У результаті найбільша вогнегасна ефективність спостерігалась для розчину КСІ із концентрацією 20 %, при тиску 0,6 МПа. Збільшення концентрації супроводжувалося зниженням швидкості випаровування гептану. Також спостерігалось зниження висоти полум'я. Автори [94] вивчали інгібуючу дію водяного туману із вмістом 0, 22 % FC4430, 0,2 % ТЕОА, 0,32 % карбаміду та 2 % КСІ, при гасіння літій-іонних акумуляторів. Був визначений оптимальний состав добавки із концентрацією 0,17 % FC-4430, 0,2 % ТЕОА, 0,32 % карбаміду та 2,5 % КСІ. Результати свідчать про синергетичний ефект, який значно підвищує здатність водяного туману гасити загорання у літій-іонних акумуляторах. У роботі [95] проведено дослідження вогнегасної ефективності водної вогнегасної із різним вмістом добавок (рисунок 1.13) з варіюванням концентрацій $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, та органічних сполук.

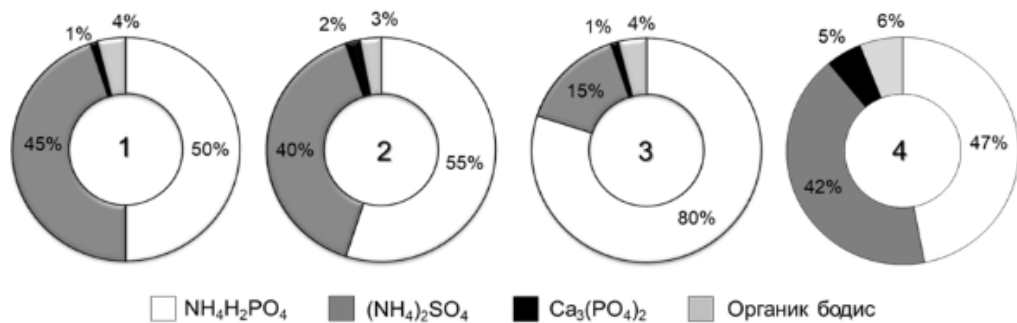


Рисунок 1.13 – Чотири типи зразків дослідження

У результаті зразок з вмістом 50 % $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, як основного компоненту та $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, і других неорганічних та органічних сполук на 50 %, мав найбільшу вогнегасну ефективність по відношенню до інших зразків. Авторами [96] досліджувалась інгібуюча дія модифікувальних

добавок Zn/Mg/Al-CO₃, диамонійфосфат ((NH₄)₂HPO₄), фосфат натрію (Na₃PO₄) та хлорид магнію (MgCl₂). Відповідно до результатів диференційованої скануючої калориметрії, інфрачервоної спектроскопії та кінетичного аналізу добавки Zn/Mg/Al-CO₃ та (NH₄)₂HPO₄ мають суттєву інгібуючу дію на самозаймання антрациту та коксового вугілля. В свою чергу MgCl₂ сприяє реакції горіння, що підвищує ризик самозаймання. У [97] досліджувався вогнезахист деревини із модифікувальною добавкою (NH₄)₂HPO₄. Встановлено, що просочування цією добавкою целюлозних матеріалів значно підвищує її вогнестійкість. Спостерігалось самозатухання експериментальних зразків після 3 секунд горіння. При цьому не спостерігалось спалахування при впливі теплового потоку 35 кВт/м². У роботі [98, 99] досліджено піноутворення при додаванні цільових добавок NaHCO₃ + Al₂(SO₄)₃ та (NH₄)₂CO₃ + Al₂(SO₄)₃ у склад піноутворювачів ПУ-6 ОСТ і ТЭАС концентрацією 6 %. Також визначено вплив складу піноутворюючої системи на кратність і стійкість піни. Відповідно встановлено, що концентрація піноутворювачів має досить низький вплив на кратність піни, яка генерується. З підвищенням концентрації піноутворювача має місце зростання стійкості піни. Із використання добавки (NH₄)₂CO₃ + Al₂(SO₄)₃ отримано піну з більшою кратністю і стійкістю, ніж при додаванні NaHCO₃ + Al₂(SO₄)₃. За деяких концентрацій добавок кратність піни перевищує 10 і стійкість більше ніж 10 хвилин. Також автори пропонують використання бінарних вогнегасних систем, як альтернативу повітряно-механічній піні. Для використовують, як лужну частину піноутворювач, у складі якого є цільова добавка гідрокарбонат натрію NaHCO₃. У кислотній частині використовується розчини солей Fe₂(SO₄)₃ або Al₂(SO₄)₃. У результаті отримано шар піни, яка має стійкість більше ніж 10 хвилин. Автори стверджують, що така піна має властивості утримуватися на вертикальних поверхнях, за умов, що товщина шару, не перевищує 3 см.

За результатами огляду встановлено, що для підвищення ефективності водних вогнегасних речовин набули поширення фосфати амонію

[102,106,107,111-112], карбонати амонію [106,107], хлориди та карбонати калію [102,106-109]. За ствердженням авторів не має єдиного погляду, а іноді результати суперечливі, щодо вогнегасної ефективності зазначених модифікувальних добавок.

Відповідно у складі компресійної піни планується застосування наступних модифікувальних добавок:

- гідрофосфат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$;
- дигідроортофосфат амонію $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$;
- карбонат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$;
- карбонат калію (K_2CO_3) ;
- хлорид калію (KCl) .

Подальшим напрямком досліджень є визначення впливу обраних модифікуючих добавок на властивості компресійної піни та експериментальне визначення вогнегасної ефективності під час гасіння твердих горючих речовин.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз водних вогнегасних речовин, які застосовують для гасіння пожеж. Деяким ВВР притаманні властивості комплексної вогнегасної дії, але переважна більшість ВВР є дослідними зразками та не отримали широкого впровадження на практиці, що зумовлено складністю, яка полягає у технології застосування та економічною не вигідністю. На сьогодні вода залишається найбільш поширеною вогнегасною речовиною для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів. Альтернативним засобом є компресійна піна, яка має низку переваг у порівнянні з іншими водними вогнегасними речовинами, зокрема на водою. Недоліком вогнегасної властивості компресійної піни є дія лише за двома механізмами припинення горіння. Ця проблема може бути вирішена шляхом додавання до її складу модифікувальних добавок.

2. Проведено аналіз наукових публікацій, присвячених використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності. Виявлено, що переважна кількість досліджень спрямована на вивчення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні легкозаймистих рідин. У свою чергу є дослідження спрямовані на вивчення вогнегасних властивостей компресійної піни, зокрема з різною концентрацією та типами піноутворювачів, та газорідним складом при гасінні пожеж твердих горючих матеріалів. На сьогодні відсутні дослідження спрямовані на підвищення ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікувальних добавок.

3. Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей модифікувальних добавок та особливостей вогнегасної дії. За результатами аналізу виділено чотири типи модифікувальних добавок, в залежності від механізму впливу на процес горіння твердих горючих матеріалів. Проаналізовано експериментальні дослідження, щодо вивчення вогнегасної ефективності водних речовин у складі яких є модифікувальні добавки. Найбільше поширення набули фосфати та карбонати амонію, хлориди та карбонати калію. Враховуючи результати отримані авторами та хімічні властивості модифікуючих добавок, для застосування у складі компресійної піни обрано наступні: гідрофосфат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$, дигідроортофосфат амонію $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, карбонат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$, карбонат калію (K_2CO_3) ; хлорид калію (KCl).

Подальшим напрямком досліджень є визначення впливу обраних модифікуючих добавок на властивості компресійної піни та експериментальне визначення вогнегасної ефективності під час гасіння твердих горючих речовин.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ВЛАСТИВОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

2.1. Розробка лабораторного зразка для дослідження властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі

При дослідженні вогнегасної ефективності засобів пожежогасіння, зокрема компресійної піни, застосовують стандартизовані модельні вогнища пожеж певних класів, серед яких і клас А [80,100]. Також у науковій практиці поширення набуло використання лабораторних осередків пожеж твердих горючих матеріалів, що за розміром та площею є меншими від стандартизованих [101,102]. При використанні наявних зразків для отримання компресійної піни постає проблема, що полягає в обмежених можливостях регулювання подавання компресійної піни (інтенсивність та витрати водного розчину піноутворювача/повітря), за яких можливе її застосування із модифікувальними добавками при гасінні лабораторних осередків пожеж твердих горючих матеріалів, та відсутності плавного регулювання її подачі.

Проведений аналіз дозволив визначити найбільш поширені виробники систем генерування та подавання компресійної піни та їх технічні параметри:

1. Фірма «HNE Technologie AG» [103], що спеціалізується на розробці та виготовленні устаткування з виробництва компресійної піни. Головною продукцією фірми є:

- ранцеві автономні CAFS серії VARIO з об'ємом вогнегасної речовини 9 та 13 літрів. Робочий тиск у системах передбачено до 38 бар, дальність подавання струменя – до 21 метра. Діапазон витрат піни – до 18 л/хв;

- пересувне устаткування AviationCAFS з об'ємом вогнегасної речовини до 50 літрів, робочим тиском до 22 бар, із дальністю струменя до 10 метрів. Діапазон витрат піни – до 38,5 л/хв;

- установка MFU 50-150 із дальністю подачі струменя до 32 м, шириною розпилення до 10 м, витратою піни 40–130 л/хв.

2. Фірма «Rosenbauer Österreich GmbH» [43] завдяки універсальному асортименту продукції має відповідні рішення для будь-яких вимог, якими можуть оснащуватися як муніципальні малі пожежні машини, так і промислові великогабаритні пожежні машини. Серед продукції представлені:

- автономні ранцеві системи RFC Portex із діапазоном витрати піни 9–11 л/хв при тиску в системі 9 бар із дальністю подавання струменя від 8 до 12 метрів;

- пересувна система RFC POLY Trolley із витратою 31–38 л/хв при тиску 9 бар із дальністю струменя 10–16 метрів;

- CAFS Mobile – мобільна установка, у якій передбачено генерування компресійної піни із робочим діапазоном кратності від 4 до 20. Процес генерування піни відбувається шляхом встановлення установки в рукавну лінію, прокладання якою здійснюється від відцентрового пожежного насоса автоцистерни. Продуктивність установки у вигляді готової компресійної піни становить від 400 до 1600 л/хв. Нагнітання повітря у робочий розчин піноутворювача, що транспортується по рукавній лінії передбачено із балонів зі стиснутим повітрям, що встановлені на модулі установки;

- CONTI & FLASH CAFS 400-2400 – стаціонарна система, що змонтована на базовому шасі пожежних автомобілів. В системі забезпечено регулювання кратності в діапазоні від 4 до 15. Продуктивність системи по готовій компресійній піни знаходиться в межах від 1600 до 9600 л/хв. Продуктивність установки залежить від технічних характеристик насоса автоцистерни;

- FLASH CAFS AR 30-400 – система генерування та подавання компресійної піни, передбачена для гасіння пожеж на аеродромах. Монтується на базове шасі аеродромних автомобілів. Слід відмітити, що продуктивність системи по готовій піни можлива до 64000 л/хв при кратності 8.

3. Фірма «One Seven» [41], запатентована технологія генерування компресійної піни. Виробником переважно пропонується виготовлення стаціонарних систем. Характерною рисою технології є використання низької

концентрації піноутворювача від 0,3 до 1 %. Зокрема у назві фірми «One seven» відображено співвідношення водний розчин піноутворювач/повітря, як 1:7. Серед інших продуктів компаній слід зазначити такі системи генерування та подавання компресійної піни:

- Stored Energy System – автономна система, із заздалегідь визначеним об'ємом водного розчину піноутворювача, що знаходиться під тиском. Тривалість генерування піни при гасінні пожеж до 10 хвилин;

- Maxi-Xtinguisher – малогабаритна стаціонарна установка із готовим робочим розчином піноутворювача. Генерування піни передбачено за рахунок повітря, що під тиском закачане до ємності із робочим розчином. Серед переваг слід відмітити низьку тривалість приведення в дію системи;

- Wandhydrant WXS – система генерування та подавання компресійної піни, що є альтернативою системі внутрішнього пожежогасіння (кран-комплекти + трубопроводи). Довжина робочої лінії рукава становить 60 м. У системі передбачено запас кількості піноутворювача та повітря на роботу протягом 20 хвилин. При цьому дальність подавання струменя готової піни від ствола до 15 м.

4. Компанія «Waterous» пропонує технологічне рішення «ONE STEP CAFSystem» [44]. Особливістю є модуль регулювання тиску, який забезпечує підтримання постійного дозування піноутворювача та повітря у камеру змішування системи. Фірма виготовляє низку продукції, зокрема:

- насосну установку на автоцистерні з інтегрованою системою генерування компресійної піни 150-OS ONE STEP CAFSystem. Передбачено отримання піни різної кратності, в залежності від умов застосування, як суху, так і мокру з робочою концентрацією піноутворювача (0,1; 1,3; 6 % відповідно). Нагнітання повітря здійснюється за рахунок роботи вбудованого компресора із продуктивністю до 4,25 м³/хв при тиску 8,6 бар;

- Eclipse CAFSystem – модульна система генерування та подавання компресійної піни, у складі якої насосна установка та компресор. Продуктивність системи по готовій піні до 9000 л/хв при тиску 15 бар;

– модулі установки 70-35-GP, 100-50-DS, 200-100-DS, 100-50-OS, 200-100-OS із відцентровим насосом, компресором та пінодозувальним пристроєм. Продуктивність систем, в залежності від моделей до 800 л/хв по готовій піни із максимальним напором 35, 50 та 100 м вод. ст.

За результатами аналізу продукції виробників та наявних зразків встановлено, що при виготовленні систем керуються певними вимогами щодо їх технічних параметрів (інтенсивність та витрати водного розчину піноутворювача / повітря). Тому актуальним завданням є розробка системи із такими технічними параметрами, які дозволять забезпечити умови подавання піни (інтенсивність та витрати водного розчину піноутворювача / газової фази), що відповідають розмірам (площі) лабораторних осередків пожеж класу А та дозволять провести дослідження властивостей піни із модифікувальними добавками при зміні складу рідкої та газової складових.

Вимоги до системи, що розроблялась, подано у таблиці 2.1. На рисунку 2.1 представлено запропоновану пневмогідравлічну схему генерування компресійної піни у лабораторному зразку системи.

Таблиця 2.1 – Вимоги до системи, що розроблялась

№	Вимоги до системи	Параметри
1	Діапазон зміни кратності піни	4–20
2	Плавне регулювання витрат водного розчину піноутворювача, л/хв	від 2 до 20
3	Тиск у системі, бар	4–8
4	Плавне регулювання витрат газової фракції, л/хв	від 8 до 450
5	Робота в залежному та автономному режимах	+
6	Регулювання інтенсивності подавання піни за допомогою сопел різних діаметрів	+
7	Регулювання порозності пористого тіла у піногенераторі	+
8	Вимірювання витрати рідинної та газової фази у режимі реального часу	+

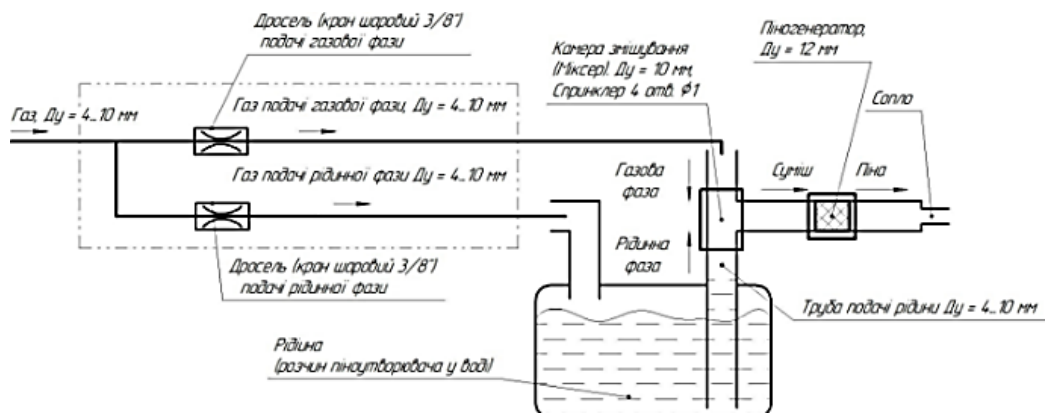
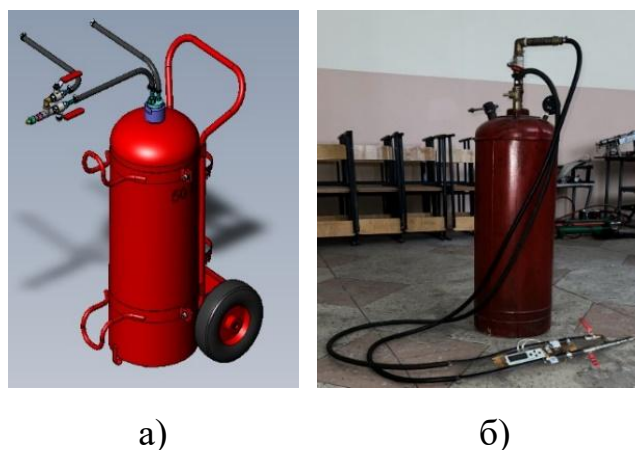


Рисунок 2.1 – Розроблена пневмогідрравлічна схема генерування компресійної піни у системі

Для попереднього визначення числових параметрів системи, що відповідають висунутим вимогам, було проведено моделювання генерування піни за допомогою математичної моделі [104,105]. Застосування таких моделей передуює проектуванню різних конструкцій, особливо складних, побудованих на внутрішніх взаємодіях окремих структурних одиниць. Використана математична модель дає змогу аналітично отримати оптимальні геометричні та технологічні параметри системи із виявленням впливу технологічних параметрів на процес генерування піни.

На рисунку 2.2 подано 3D-модель та фото розробленої системи генерування та подавання компресійної піни із оригінальним стволом для гасіння лабораторних модельних вогнищ.



а)

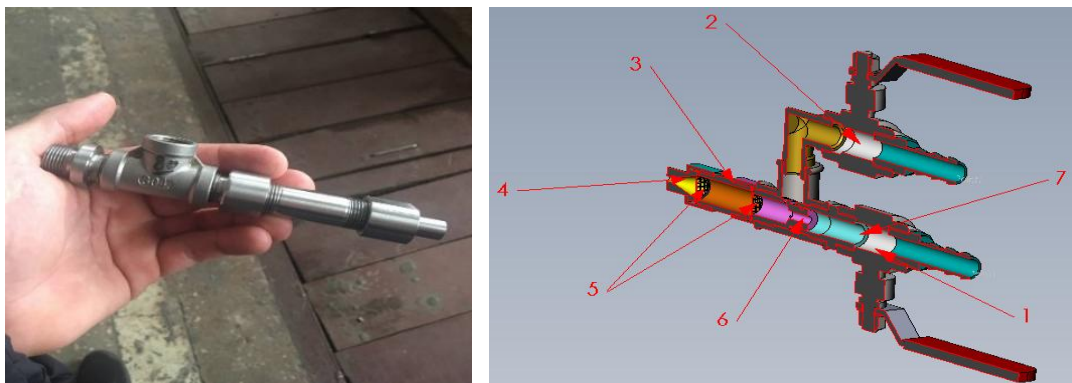
б)

Рисунок 2.2 – Система генерування та подавання компресійної піни для гасіння лабораторних модельних вогнищ: а) 3D-модель; б) фото зразка

Процес генерування піни у системі полягає в наступному: створення тиску передбачається від зовнішнього джерела (компресор або балон зі стиснутим повітрям).

Зовнішнє джерело з'єднується з системою у такий спосіб, щоб забезпечити подавання стиснутого повітря одразу до ємності з водним розчином піноутворювача (у попередньо встановленій пропорції) та камери змішування водного розчину піноутворювача (рідинна фаза) зі стиснутим повітрям (газова фаза). Кратність (співвідношення витрат рідинної та газової фази) регулюється за допомогою дроселів. Після змішування водного розчину піноутворювача зі стиснутим повітрям суміш потрапляє до камери змішування, яка забезпечує отримання високодисперсної однорідної піни. Після проходження через камеру змішування вже генерована піна потрапляє до сопла.

На рисунку 2.3 зображено 3D-модель та фото оригінального ствола.



а)

б)

Рисунок 2.3 – Ствол для генерування та подавання компресійної піни: а) фото зразка; б) 3D-модель ствола у розрізі, де: 1 – дросель регулювання витрати водного розчину піноутворювача; 2 – дросель регулювання витрати стиснутого повітря; 3 – піногенератор; 4 – сопло; 5 – пакети сіток; 6 – змішувач; 7 – втулка

Змішування повітря із розчином піноутворювача передбачено через 3 отвори діаметром 1 мм, розташованих по діаметру змішувача з кроком 120

градусів, за T-подібним способом генерування. Для варіювання інтенсивності подавання піни у стволі передбачені змінні конусоподібні сопла з вхідним діаметром 11 мм та вихідними діаметрами 0,8 мм, 1 мм, 1,5 мм, 2 мм. Для отримання високодисперсної однорідної піни встановлюються сітки з розміром квадрата у світлі $1 \times 1 - 2 \times 2$ мм, із діаметром дроту 0,32–0,66 мм. Для спінювання суміші водного розчину піноутворювача та повітря використовується пористий елемент. Порозність пористого елемента впливає на якісні показники піни (це розмір бульбашок, однорідність розмірів бульбашок та стійкість піни) та кількісні показники функціонування установки (продуктивність, л/хв, споживана потужність, кВт). Величина порозності пористого елемента регулюється зміною його об'ємної щільності у корпусі піногенератора. На рисунку 2.4 подано фотографії елементів оригінального ствола та його 3D-моделі.



Рисунок 2.4 – Елементи розробленого ствола: а) фото виготовлених деталей;
б) елементи у 3D-виді

Також розроблено систему вимірювання витрати водного розчину та повітря (рисунок 2.5). Система є апаратно-програмним комплексом, який може використовуватися для вимірювання питомої витрати водного розчину та повітря. Система дозволяє зберігати результати вимірювань на ПК у вигляді електронних таблиці для подальшої побудови залежностей.

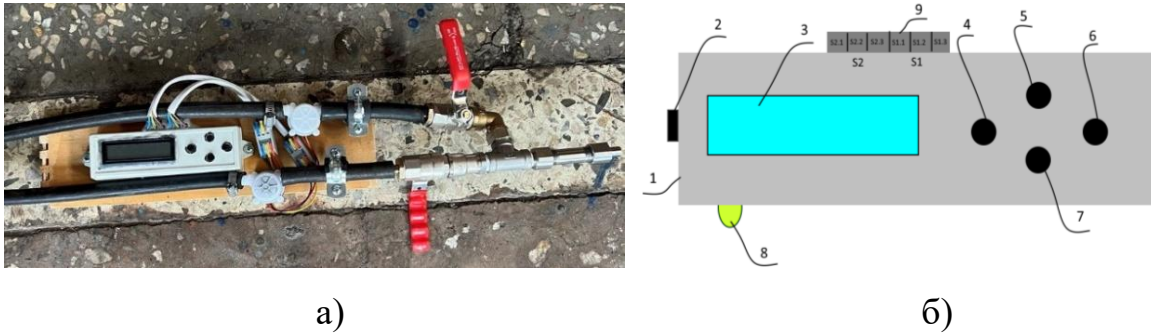


Рисунок 2.5 – Апаратно-програмний комплекс контролю витрат: а) фото зразка; б) загальний вигляд системи, де: 1 – корпус; 2 – роз’єм micro-USB; 3 – LCD-дисплей; 4 – кнопка «Назад»; 5 – кнопка «Вгору»; 6 – кнопка «Вперед»; 7 – кнопка «Вниз»; 8 – RGB-світлодіод; 9 – роз’єм для підключення датчиків

Система дає змогу одночасно в режимі реального часу виводити на екран дисплея та на персональний комп’ютер витрату водного розчину піноутворювача та повітря.

Використання імпульсних датчиків та здатність живлення від джерела напруги 5 В розширює спектр можливостей системи вимірювання, роблячи її ефективним і універсальним засобом вимірювання.

2.2. Результати експериментального дослідження властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі та доцільності їх застосування

Об’єктом дослідження були властивості компресійної піни із застосуванням модифікувальних добавок: стійкість та кратність.

Основна гіпотеза полягала в тому, що використання модифікувальних добавок у складі компресійної піни буде впливати на її стійкість та кратність.

Згідно з методикою ДСТУ EN 16327:2018 «Напірні пінозмішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS)» [106] було використано обладнання, що подано на рисунку 2.6.

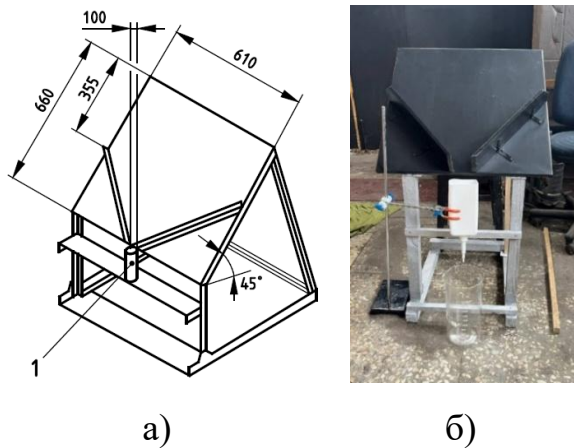


Рисунок 2.6 – Обладнання для проведення дослідів з вимірювання стійкості та кратності піни: а) піноприймач: 1 – пінозбирач зі зливним пристроєм; б) фото розробленого станду

Розміщення ствола для подавання піни на вимірювальний стенд (рисунок 2.7, а), відповідали вимогам ДСТУ EN 16327:20. Під час досліджень використано оригінальний розроблений зразок системи генерування та подавання КП (рисунок 2.7, б) [7].

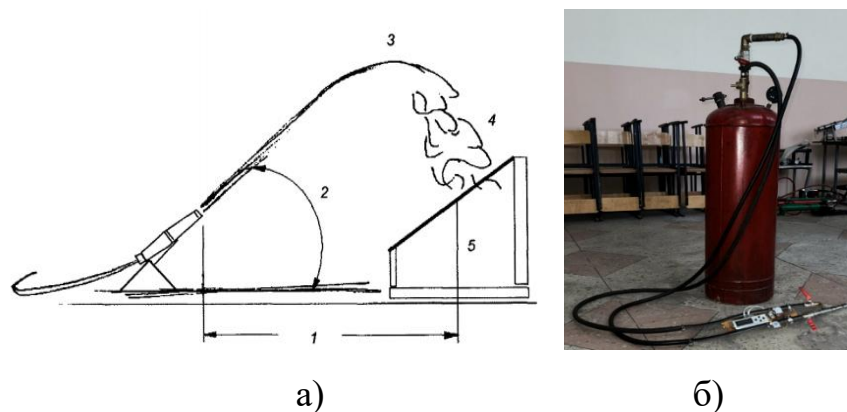


Рисунок 2.7 – Обладнання та умови дослідження: а) вимоги розміщення ствола та станду згідно ДСТУ EN 16327:2018; б) фото розміщення дослідного зразка та станду; в) фото системи генерування та подавання КП оригінального зразка [7]

Умови проведення дослідів відповідали вимогам методики. Температура повітря та робочого розчину піноутворювача становила

(20±2) °С. Робочий розчин піноутворювача готували, дотримуючись рекомендованих виробником концентрації. Для приготування розчину піноутворювача використовували модель прісної води.

Під час подавання піни робочий тиск у системі становив 6 бар [107], при цьому висота та відстань ствола була налаштована таким чином, щоб піна потрапляла в центральну частину піно приймача, при цьому було забезпечено стабілізацію струменя. Перед початком подавання піни згідно рекомендацій пінозбирач було змочено і зважено. Після закриття зливного пристрою пінозбирач заповнювався піною таким чином, щоб у ємності були відсутні порожнини. Після повного заповнення пінозбирача припинялося подавання піни. Після цього зважували пінозбирач і реєстрували його масу. Отриману кратність піни розраховували за формулою:

$$E = \frac{V}{M_2 - M_1} \quad (2.1)$$

де

V – об'єм пінозбирача у літрах;

M_1 – маса порожнього пінозбирача у кілограмах;

M_2 – маса пінозбирача, заповненого піною, у кілограмах.

Щодо визначення стійкості зазначена методика [106] передбачає вимірювання тривалості витіканні 25 % і 50 % рідини. Але діючим наразі стандартом [107] термінологія щодо показника стійкості піни визначає його як проміжок часу, протягом якого з піни виділиться 50 % рідини, витраченої на її утворення. Тому під час дослідження визначався саме проміжок часу, за який витікає 50 % рідини.

Пристрій для вимірювання часу вмикали згідно рекомендацій [106], після того, як пінозбирач було заповнено. Тривалість витікання визначали шляхом встановлення пінозбирача на ваги і фіксували втрату його маси. При

цьому зливний пристрій був відрегульований таким чином, щоб забезпечити витікання розчину піноутворювача, без витікання піни. Для кожної проби дослід повторювали тричі. Після цього розраховували середнє значення кратності піни, а також тривалості витікання з неї рідини (стійкості).

У дослідженні використовували наступні модифікувальні добавки згідно проведеного аналізу [4]: гідрофосфат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$); дигідроортофосфат амонію ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$); карбонат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$); карбонат калію (K_2CO_3); хлорид калію (KCl). Концентрація МД у складі компресійної піни варіювалася в межах від 1 % до 5 % із урахування аналізу [4].

Для проведення дослідів використовували піноутворювач загального призначення «Барс S-1», з концентрацією 6 % у водному розчині. Піноутворювачі загального призначення (піноутворювачі типу «S») виготовляються із синтетичних вуглеводневих ПАР та добавок, до їх складу, як правило, не входять фторвмісні речовини. Вони придатні для генерування піни низької, середньої та високої кратності з робочих розчинів, а також приготування змочувальних розчинів. Такі піноутворювачі призначені для гасіння пожеж класів А та В згідно з [107], тобто твердих горючих речовин і матеріалів (за винятком тих, які вступають до хімічної взаємодії з водою) та водонерозчинних горючих рідин.

Перевірку кратності отриманої піни без додавання МД було здійснено шляхом триразового повторення заповнення піноприймача, з метою перевірки відповідності регулювання вентилів подачі водного розчину піноутворювача та повітря. Після здійснювали подавання піни із вимірювання кратності та стійкості піни.

Розчин ПУ (94% води і 6 % ПУ) із МД готувався для кожного дослід в об'ємі 1 л. Відповідно до пропорцій концентрації МД в межах від 1–5 % було визначено їх необхідну масу, яка вимірювалась із застосуванням електронних ваг. Розрахункові маси МД подано у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахункові маси МД

Концентрація МД С, %	Маса МД m , г				
	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	K_2CO_3	KCl
1	10	10	10	10	10
2	20	20	20	20	20
3	30	30	30	30	30
4	40	40	40	40	40
5	50	50	50	50	50

Процес приготування робочого розчину із МД подано на рисунку 2.8.

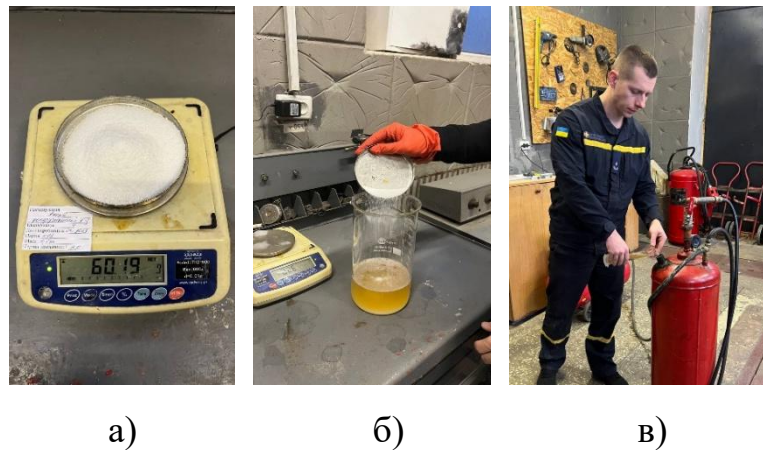


Рисунок 2.8 – Процес приготування розчину: а) контрольне зважування МД; б) приготування розчину ПУ із МД в заданих пропорціях; в) заповнення ємності системи генерування та подавання КП

Стандарт Guide for the Use of Class A передбачає три типи КП за кратністю: «мокра (wet)» від 1 до 5; «рідка (fluid)» від 5 до 10; «суха, або жорстка (dry or stiff)» від 10 до 20. Кратність КП регулюється співвідношення витрат водного розчину ПУ та повітря і тиском в системі. Враховуючи зазначене, тиск в системі був постійний та дорівнював 6 бар. Вентилі ствола системи генерування та подавання КП регулювались таким чином, щоб забезпечити 4 режими (М1–М4) співвідношення водного розчину ПУ/повітря, що відповідають кратності 5 для режиму М1, 10 для М2, 15 для М3 і 20 для М4 для компресійної піни без добавок. На рисунку 2.9 подано фото процесу дослідження.

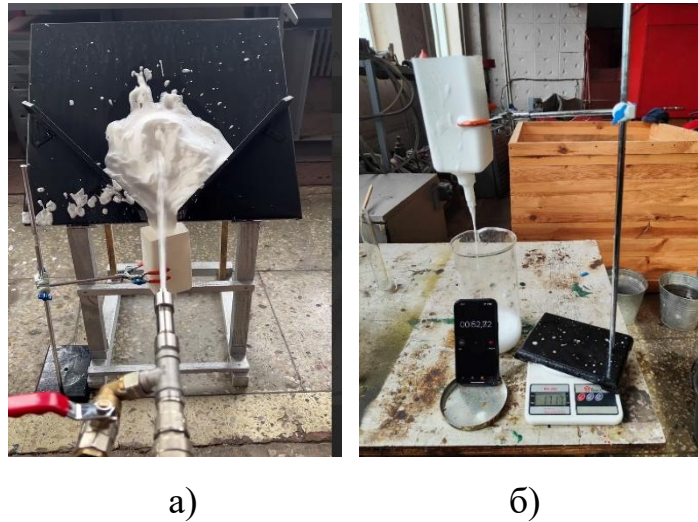


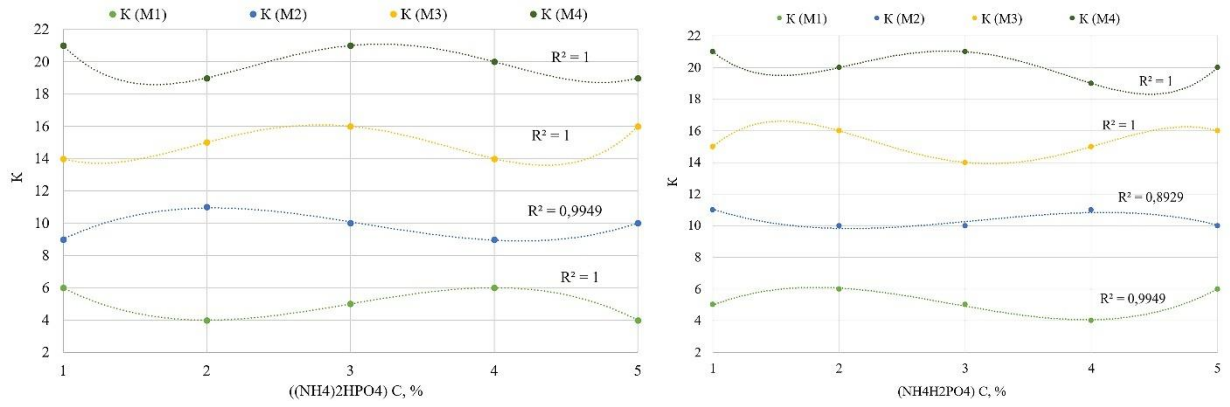
Рисунок 2.9 – Фото процесу дослідження: а) подавання КП на стенд;
б) вимірювання кратності та стійкості КП

У таблиці 2.3 подано зведені результати (середні розрахункові значення) дослідження впливу фосфатів амонію з концентрацією в межах 1-5 % на властивості КП.

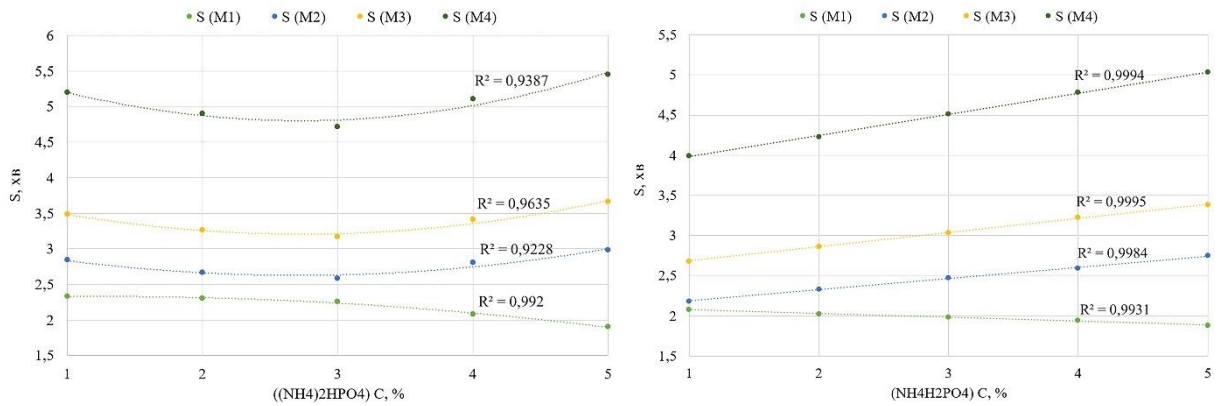
Таблиця 2.3 – Вплив фосфатів амонію на кратність та стійкість КП

МД	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$					$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$				
<i>C</i> , %	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<i>M1</i>	(5)									
<i>K</i>	6	4	5	6	4	5	6	5	4	6
<i>S</i> , хв	2,33	2,3	2,26	2,08	1,9	2,08	2,02	1,98	1,94	1,88
<i>M2</i>	(10)									
<i>K</i>	9	11	10	9	10	11	10	10	11	10
<i>S</i> , хв	2,84	2,67	2,58	2,81	2,98	2,18	2,33	2,47	2,59	2,75
<i>M3</i>	(15)									
<i>K</i>	14	15	16	14	16	15	16	14	15	16
<i>S</i> , хв	3,49	3,26	3,17	3,41	3,66	2,68	2,86	3,03	3,22	3,38
<i>M4</i>	(20)									
<i>K</i>	21	19	21	20	19	21	20	21	19	20
<i>S</i> , хв	5,20	4,90	4,72	5,11	5,45	3,99	4,23	4,51	4,78	5,03

На рисунку 2.10 подано залежність впливу фосфатів амонію в межах концентрації від 1÷5 % у водному розчині ПУ на властивості КП.



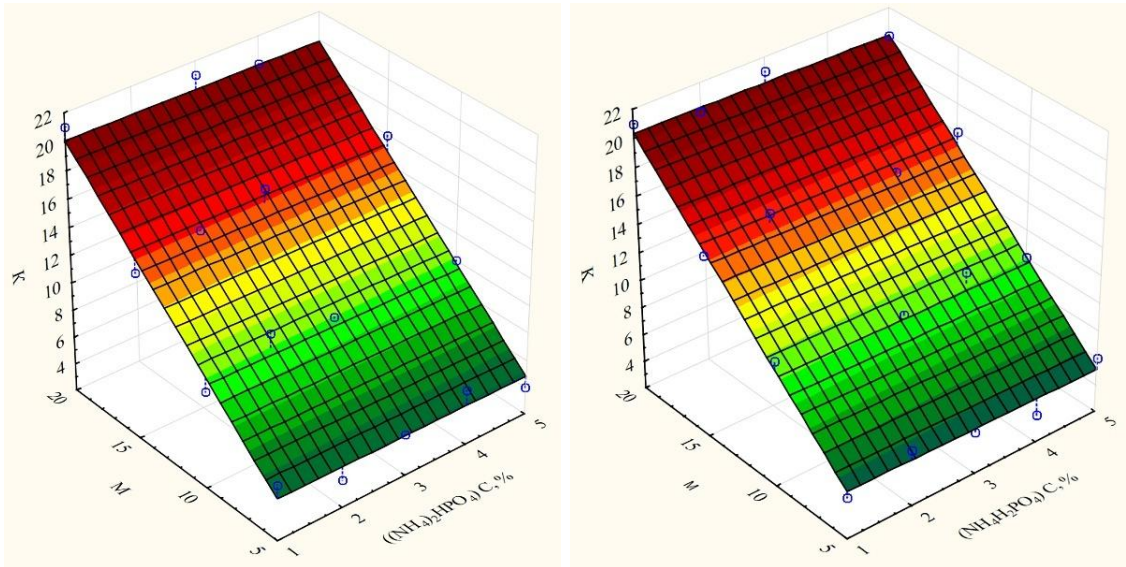
а)



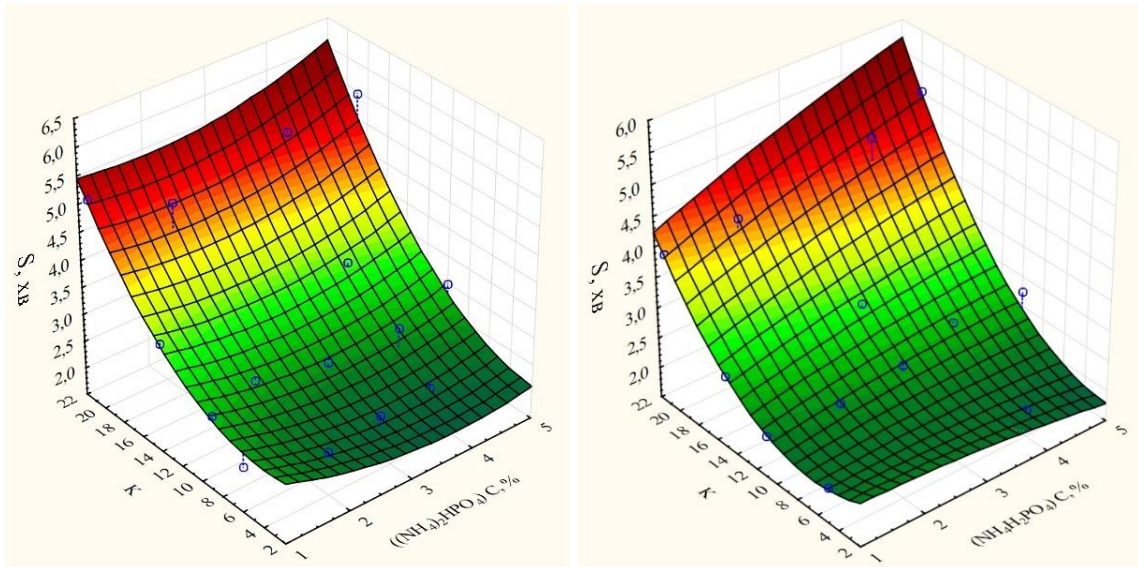
б)

Рисунок 2.10 – Вплив концентрації фосфатів амонію у водному розчині ПУ на властивості КП: а) кратність в режимах М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; б) стійкість із урахуванням кратності, отриманої при режимах М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

На рисунку 2.11 подано поверхні залежності властивостей КП від концентрації фосфатів амонію 1÷5 %.



а)



б)

Рисунок 2.11 – Залежності властивостей КП для: а – кратності із урахуванням режимів М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; б – стійкості із урахуванням кратності, отриманої при режимах М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Рівняння (2.2), (2.3) площин, які відображають залежність властивостей КП від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та рівняння (2.4), (2.5) площин, що відображають залежність властивостей КП від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ подано нижче:

$$K = 0.05 - 0.05 \cdot C + 1.004 \quad (2.2)$$

$$S = 3,2637 - 0,6402 \cdot C - 0,0903 \cdot K + 0,081 \cdot C^2 + 0,0143 \cdot C \cdot K + 0,0091 \cdot K^2 \quad (2.3)$$

$$K = 0,525 - 0,075 \cdot C + 0,996 \cdot M \quad (2.4)$$

$$S = 2,5393 - 0,0533 \cdot C - 0,1571 \cdot K - 0,0169 \cdot C^2 + 0,0241 \cdot C \cdot K + 0,0097 \cdot K^2 \quad (2.5)$$

У таблиці 2.4 подано зведені результати (середні розрахункові значення) дослідження впливу карбонатів амонію, калію та хлориду калію із концентрацією в межах 1–5 % на властивості КП.

Таблиця 2.4 – Вплив карбонатів калію, амонію та хлориду калію на кратність та стійкість КП

МД	$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$					$\text{K}_2\text{CO}_3; \text{KCl}$				
C, %	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
M1	(5)									
K	6	5	4	4	5	Піна не утворюється				
S, хв	1,78	1,71	1,63	1,58	1,55					
M2	(10)									
K	10	10	8	9	10	Піна не утворюється				
S, хв	2,57	2,44	2,31	2,36	2,4					
M3	(15)									
K	16	14	15	15	14	Піна не утворюється				
S, хв	3,16	2,97	2,84	2,91	2,95					
M4	(20)									
K	20	20	21	19	20	Піна не утворюється				
S, хв	4,71	4,49	4,23	4,33	4,39					

На рисунку 2.12 подано залежність впливу карбонату амонію в межах концентрації від 1 до 5 % у водному розчині ПУ на властивості КП.

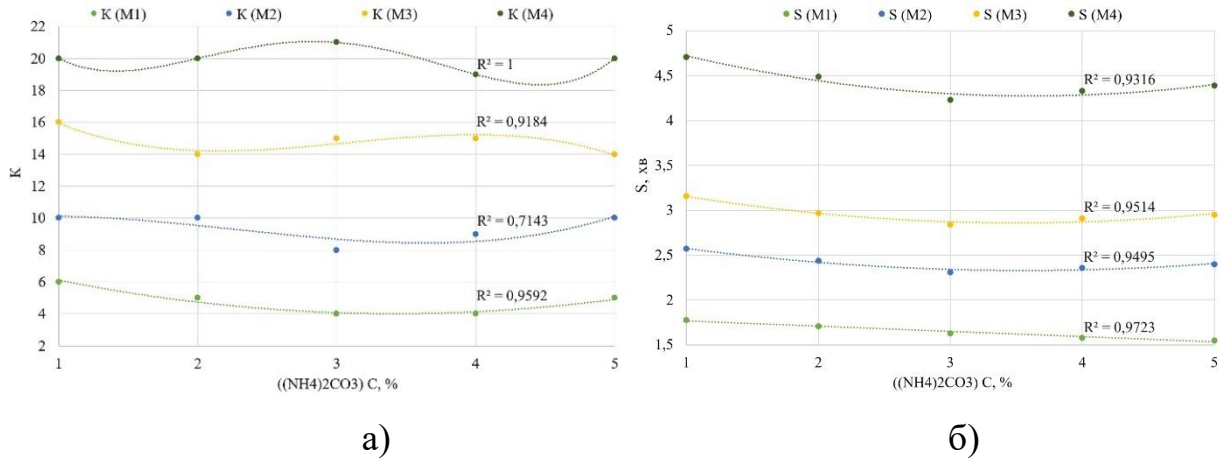


Рисунок 2.12 – Вплив концентрації карбонату амонію у водному розчині піноутворювача на властивості компресійної піни: а) кратність із урахуванням режимів М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$; б) стійкість із урахуванням кратності, отриманої при режимах М1–М4 із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

На рисунку 2.13 подано поверхні залежності властивостей КП від концентрації карбонату амонію 1÷5 %.

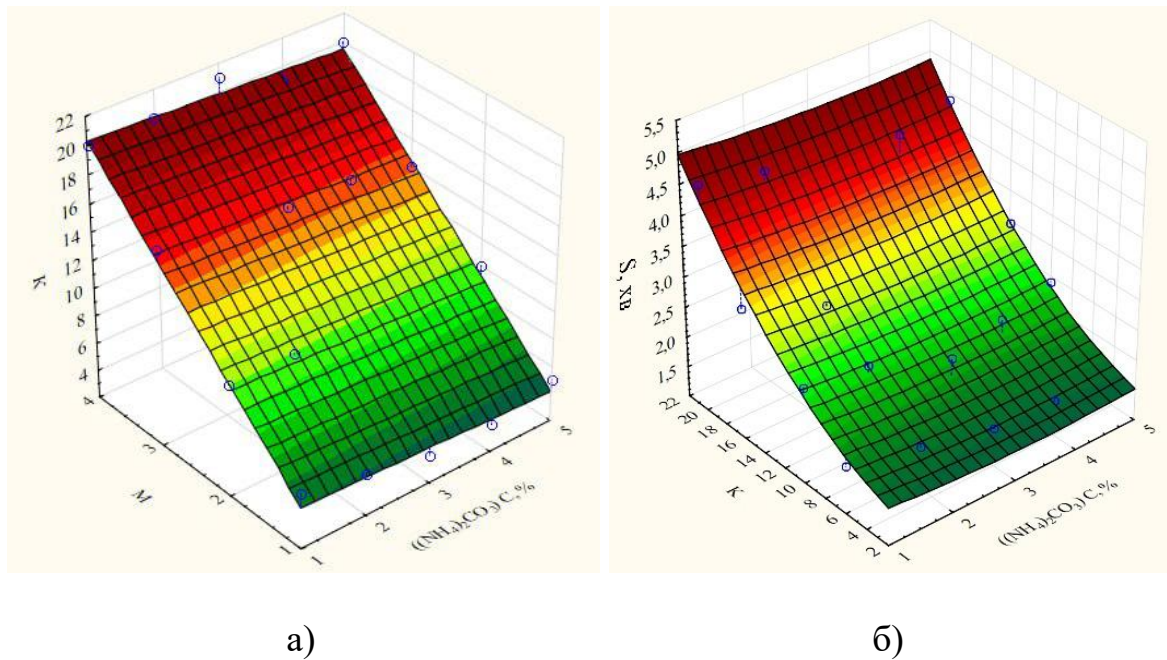


Рисунок 2.13 – Залежності властивостей КП для: а) кратності із урахуванням режимів М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$; б) стійкості із урахуванням кратності, отриманої при режимах М1–М4 з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

Рівняння (2.6), (2.7) площин, які відображають залежність властивостей КП від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, подано нижче:

$$K = 0,1 - 0,2 \cdot C + 1,02 \cdot M \quad (2.6)$$

$$S = 1,6505 - 0,1468 \cdot C + 0,0333 \cdot K + 0,0206 \cdot C^2 - 0,0002 \cdot C \cdot K + 0,0056 \cdot K^2 \quad (2.7)$$

Таким чином, стійку компресійну піну вдалося отримати тільки з добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

При аналізі отриманих результатів впливу модифікувальних добавок на стійкість та кратність компресійної піни встановлено наступне.

Застосування модифікувальних добавок дигідроортофосфату амонію $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, гідрофосфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та карбонату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі компресійної піни не має негативного впливу на її кратність в межах 1–5 %. Під час дослідження впливу карбонату калію K_2CO_3 та хлориду калію KCl встановлено, що застосування модифікувальних добавок в межах концентрації 1 % до 5 % має негативний вплив на можливість отримання компресійної піни. Зокрема при жодних режимах (M1–M4) не вдалося отримати піну кратністю ≥ 5 . Отриманий водо-пінний розчин не мав характерних ознак піни. Це можна пояснити різними властивостями катіонів амонію (NH_4^+) та катіонів калію (K^+). Катіони амонію є слабкою кислотою, що знижує рН водного розчину та приводить до адсорбції іонів на поверхні бульбашок піни, підвищує в'язкість розчину та знижує поверхневий натяг, позитивно впливаючи на стійкість піни. В той же час, катіони калію є катіонами лужного металу, які не утворюють водневих зв'язків і не впливають суттєво на поверхневий натяг. До того ж, аніони карбонату (CO_3^{2-}) і хлориду (Cl^-) також не мають властивостей, що сприяють піноутворенню.

Щодо стійкості піни, визначено, що із застосуванням $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$:

– при режимі M1 спостерігається зниження стійкості піни на 19 % при

підвищенні концентрації добавки від 1 % до 5 %;

– при режимах М2–М4 із підвищенням концентрації добавки від 1 % до 3 % характерне зниження для стійкості піни на 10 %, при подальшому збільшенні концентрації добавки до 4–5 % спостерігається підвищення стійкості. За умови застосування добавки в концентрації 5 % стійкість піни є на 5 % вищою порівняно зі стійкістю піни за концентрації 1 %

Щодо стійкості піни, визначено, що із застосуванням $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$:

– при режимі М1 спостерігається зниження стійкості піни на 10 % при підвищенні концентрації добавки від 1 % до 5 %;

– при режимах М2–М4 із підвищенням концентрації добавки від 1 % до 5 % характерне підвищення стійкості піни на 26 %.

Для обох добавок підвищення стійкості піни з підвищенням концентрації добавок може бути пояснено підвищенням кількості аніонів фосфату, що можуть утворювати комплекси з металами та іншими іонами, які можуть бути присутніми в розчині піноутворювача, тим самим стабілізуючч піну. Різниця в зміні стійкості піни на режимі М1 та режимах М2–М4 потребує додаткового теоретичного та експериментального дослідження.

Щодо стійкості піни, визначено, що із застосуванням $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$:

– при режимі М1 спостерігається зниження стійкості піни на 13 % при підвищенні концентрації добавки від 1 % до 5 %;

– при режимах М2–М4 із підвищенням концентрації добавки від 1 % до 5 % характерне зниження для стійкості піни на 7 %.

Зниження стійкості піни при додаванні $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у порівнянні з $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ може пояснюватись наявністю аніонів карбонату, ефективність яких щодо піноутворення нижча, у порівнянні з фосфатами.

Наступним кроком було визначення залежності стійкості КП від її кратності, без додавання МД з метою подальшого порівняння властивостей піни.

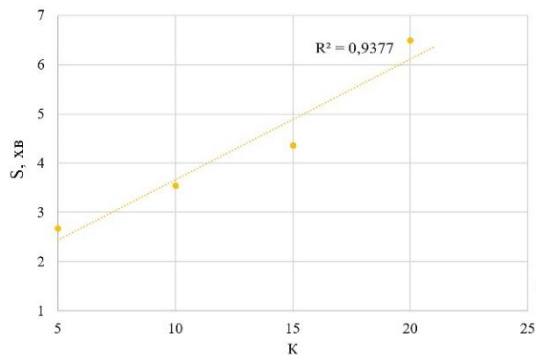
2.3. Результати порівняння властивостей компресійної піни з модифікувальними добавками з компресійною піною традиційного складу

З метою порівняння впливу типів та концентрації МД між собою та КП традиційного складу було визначено взаємозв'язок між стійкістю та кратністю КП для режимів М1–М4. У таблиці 2.5 подано результати визначення кратності та стійкості генерованої КП без додавання МД.

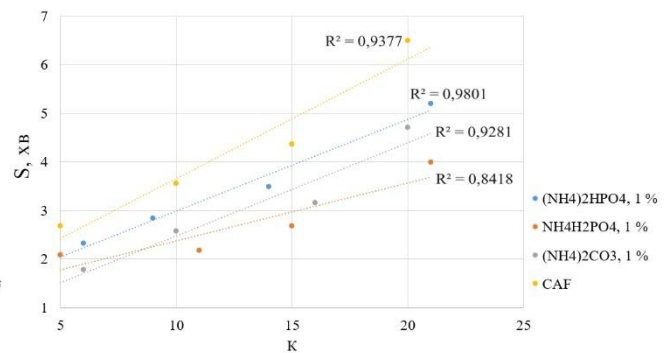
Таблиця 2.5 – Кратність та стійкість генерованої піни без додавання МД

М	К	S, min
1	5	2,68
2	10	3,55
3	15	4,36
4	20	6,5

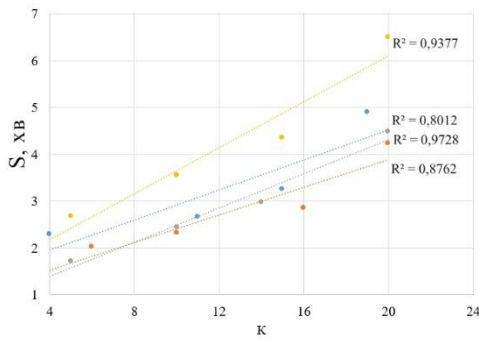
Порівняння властивостей КП піни з МД між собою проводили окремо для кожної концентрації (1; 2; 3; 4; 5). Отримані графічні залежності подані на рисунку 2.14.



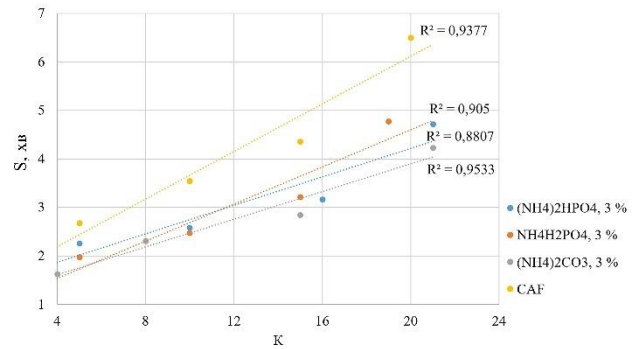
а)



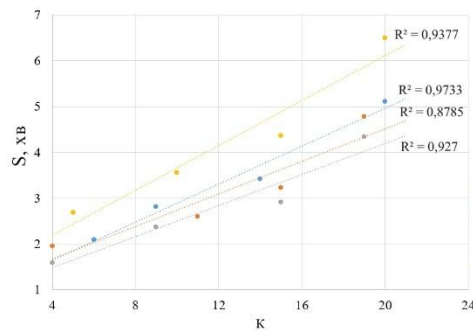
б)



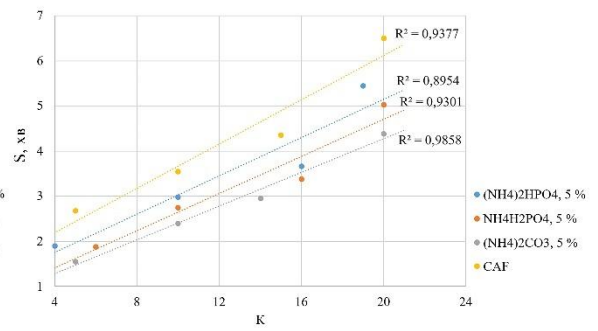
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.14 – Порівняння властивостей КП із МД між собою та з КП традиційного складу: а) КП без МД; б) концентрація МД 1 % ; в) концентрація МД 2 %; г) концентрація МД 3 %; д) концентрація МД 4 %; е) концентрація МД 5 %

При порівнянні властивостей (рисунок 2.14, б–е) компресійної піни із модифікувальними добавками між собою та компресійною піною традиційного складу встановлено наступне:

– при порівнянні між собою модифікувальних добавок $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ виявлено характерну залежність стосовно впливу на кратність піни, а саме наявність концентрації від 1 % до 5 % має однаковий характер. При режимах М1–М4 вдається забезпечити необхідну кратність піни в межах від 1 до 20. Це також корелюється з попередніми припущеннями про позитивний вплив катіонів амонію на піноутворення і відсутність деструктивної дії інших іонів;

– при порівнянні між собою модифікувальних добавок $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ виявлено особливості впливу концентрації та типу

модифікувальної добавки у компресійній піні на її стійкість. Таким чином найбільша стійкість характерна для трьох типів добавок із застосуванням режиму генерування М4 ($K \approx 20$). Найвищий зафіксований показник стійкості встановлено для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, а саме 5,45 хв, для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ стійкість нижча на 8 %, для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ стійкість нижча на 20 %. Це пояснюється більш сильним впливом на піноутворення кількості аніонів фосфату, що стабілізують піну та, з іншого боку, менш значним впливом аніонів карбонату;

– при порівнянні впливу $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі компресійної піни із піною без вмісту модифікувальних добавок виявлено, що необхідний діапазон кратності (5–20) вдається забезпечити. Щодо стійкості піни, то для зазначених добавок характерне отримання піни із меншою стійкістю, відносно до піни традиційного складу. Таким чином для режиму М4 стійкість піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ є нижчою на 17 %, з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ – на 23 %, а з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ – на 33 %. Хоча зазвичай солі амонію підвищують стабілізацію піни і її стійкість, отримані результати можна пояснити надмірним впливом на в'язкість, значне підвищення якої призводить до утворення неоднорідної піни, що швидко руйнується. Крім цього, солі амонію можуть взаємодіяти з іншими компонентами у складі піноутворювача загального призначення «Барс S», тим самим інгібуючи їхню дію і знижуючи ефективність піноутворення. Тому доцільним у подальшому буде проведення аналогічних дослідів з іншими піноутворювачами.

Порівняння властивостей піни з K_2CO_3 та KCl не здійснювалось, оскільки генерування компресійної піни неможливе, що зумовлено негативним впливом зазначених добавок на розчин піноутворювача та піноутворюючу здатність. Застосування їх у складі компресійної піни недоцільне.

Як обмеження проведеного дослідження слід враховувати, що не було визначено впливу типів та концентрацій модифікувальних добавок на

дисперсність та однорідність бульбашок компресійної піни. Зазначені властивості також впливають на її вогнегасну ефективність, зокрема стійкість.

До недоліків даного дослідження слід віднести, що результати вивчення впливу типів та концентрацій модифікувальних добавок проводились з використанням одного типу піноутворювача «Барс-S». У разі використання інших типів піноутворювачів вплив зазначених модифікувальних добавок може здійснювати інший ефект.

Висновки до розділу 2

1 Запропоновано систему компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють. Попередньо розроблено пневмогідрравлічну схему, що використовувалась як підґрунтя для врахування особливостей фізичних процесів, які відбуваються при генеруванні піни у зразку, що виготовлявся. На підставі результатів математичного моделювання визначено необхідні технічні параметри системи, які задовольняють вимоги, що висувались до дослідного зразка. Розроблена система має наступні параметри: кратність – 4–20; робочий тиск системи – 4–8 бар; плавне регулювання витрат водного розчину / піноутворювача – 2–20 л/хв; плавне регулювання витрат газової фракції – 8–450 л/хв. Зокрема передбачено можливість регулювання витрат водного розчину піноутворювача та повітря, роботу в залежному та автономному режимах, регулювання інтенсивності подавання піни за допомогою сопел різних діаметрів, регулювання порозності пористого тіла у піногенераторі. Розроблено систему вимірювання витрати водного розчину та повітря, яка являє собою апаратно-програмний комплекс. Система дає змогу зберігати результати вимірювань на персональний комп'ютер у вигляді таблиці Excel для подальшої побудови залежностей та одночасно в режимі реального часу виводити на екран дисплея та на персональний комп'ютер

витрату водного розчину піноутворювача та повітря.

2. Експериментальним шляхом визначено властивості компресійної піни (стійкість та кратність) з модифікувальних добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, K_2CO_3 , KCl у складі водного розчину піноутворювача з концентрацією в межах від 1 % до 5 %. Визначено, що наявність добавок $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у визначених межах не має негативного впливу на кратність компресійної піни. При застосуванні (K_2CO_3) (KCl) з концентрацією в межах від 1 % до 5 % піну отримати не вдалося. Визначено кількісні показники стійкості компресійної піни із добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі водного розчину піноутворювача.

3. Порівняно властивості компресійної піни із модифікувальними добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ із їх концентрацією у водному розчині піноутворювача в межах від 1 % до 5 % між собою та з компресійною піною традиційного складу. Визначено, що наявність зазначених добавок в складі компресійної піни не впливає на її кратність. Щодо стійкості піни, найвищий зафіксований показник стійкості має піна зі вмістом $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (5,45 хв), для піни зі вмістом $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ стійкість нижча на 8 %, а для піни з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ стійкість нижча на 20 %. Порівнюючи стійкість піни з модифікувальними добавками з піною традиційного складу встановлено, що наявність модифікувальних добавок $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі компресійної піни знижує її показник стійкості на 17 %, 23 % та 33 %, відповідно.

Незважаючи на негативний вплив модифікувальних добавок на стійкість піни, зазначена властивість є домінуючою під час гасіння легкозаймистих рідин, оскільки від неї залежить здатність ізолювати поверхню горючої рідини від доступу кисню протягом певного часу. У свою чергу під час застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин та матеріалів домінуючою властивістю є саме охолодження. Окрім того, модифікувальні добавки мають здатність інгібувати реакцію горіння та

створювати захисну плівку на поверхні матеріалу.

Отже, розвиток дослідження у подальшому полягає у визначенні вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальними добавками під час гасіння лабораторних осередків твердих горючих матеріалів у порівнянні з традиційним складом КП.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКУВАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ВОГНЕГАСНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

Об'єктом дослідження є вогнегасна ефективність компресійної піни із застосуванням модифікувальних добавок.

Основна гіпотеза полягає в тому, що використання модифікувальних добавок у складі компресійної піни буде впливати на її вогнегасну ефективність при гасіння твердих горючих матеріалів.

На підставі результатів попередніх досліджень [10] обрано наступні модифікувальні добавки: дигідроортофосфат амонію $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, гідрофосфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, карбонат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. Для генерування піни використано піноутворювача загального призначення «Барс S», з концентрацією 6 % у водному розчині згідно з рекомендаціями виробника.

Концентрація МД у складі КП варіювалася в межах від 1 % до 5 % з урахуванням аналізу досвіду попередників, викладених у [4]. Кратність компресійної піни варіювалася відповідно до стандарту Guide for the Use of Class A [51] в межах від 5 до 25.

Вогнегасну ефективність компресійної піни із модифікувальними добавками оцінено шляхом розрахунку показника ефективності гасіння Pe.g [79] за формулою 3.1:

$$\text{Pe.g.} = \frac{S_n}{m_p t}, \quad (3.1)$$

де

S_n – площа вогнища;

m_p – маса водного розчину піноутворювача, з якого отримана піна;

t – час гасіння вогнища.

Під час дослідження використано розроблений дослідний зразок системи генерування та подавання компресійної піни [6], та лабораторні

вогнища пожежі класу А, які широко застосовуються під час визначення показника вогнегасної здатності різних вогнегасних засобів [101, 102, 108]. Лабораторне вогнище має наступні параметри: 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 м². Відкрита поверхня горіння вогнища (після віднімання площ перекриття брусків) становить 0,32 м². На рисунку 3.1 подано обладнання, що використано в експерименті.

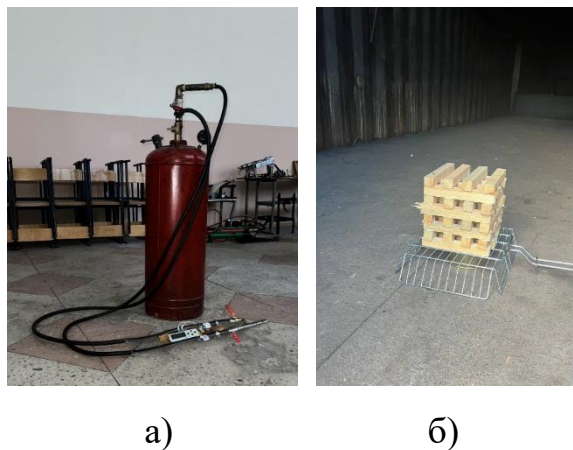


Рисунок 3.1 – Обладнання для дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни: а) лабораторний зразок системи генерування та подавання компресійної піни; б) фото лабораторного вогнища.

Експериментальне дослідження виконується за наступним алгоритмом дій:

1) Відповідно до ідеї крокового пошуку на першому етапі провести експериментальні дослідження за планом 1-го порядку і описати отримані залежності лінійною моделлю (поліномом першого ступеню). У разі адекватності лінійних моделей продовжити рух до галузі оптимуму.

2) Провести експериментальні дослідження за планом 2-го порядку і описати отримані залежності квадратичною моделлю (поліномом другого ступеню). У разі адекватності квадратичних моделей обрати найбільш ефективні умови генерування піни (концентрація МД, кратність піни) і

експериментально їх перевірити.

На першому етапі дослідження проводили за планом першого порядку, для отримання лінійних функцій, як мають наступний вигляд:

$$y = f(x_1, x_2); z = f(x_1, x_2) \quad (3.2)$$

де

$y = m$ – маса водного розчину піноутворювача компресійної піни із модифікувальними добавками, витраченого на гасіння модельного вогнища;

$z = t$ – час гасіння модельного вогнища компресійною піною із модифікувальними добавками;

x_1 – концентрація модифікувальної добавки у водному розчині піноутворювача компресійної піни;

x_2 – кратність компресійної піни.

Експеримент було сплановано за рекомендаціями викладеними у [109]. Проведено кодування чинників для побудови стандартного ортогонального плану-матриці експерименту. У таблиці 3.1 подано кодове значення чинників із встановлення інтервалів варіювання.

Таблиця 3.1 – Кодування чинників

Інтервал варіювання та рівень чинників	Концентрація модифікувальних добавок С, %	Кратність компресійної піни k
Нульовий рівень $x_i = 0$	3	15
Інтервал варіювання δ_i	2	10
Нижній рівень $x_i = -1$	1	5
Верхній рівень $x_i = +1$	5	25
Кодове позначення	x_1	x_2

Зв'язок між кодованим і натуральним виразом чинника заданий

формулою [109]:

$$\dot{x}_i = \frac{\dot{X}_i - x_{i0}}{\delta_i}, \quad (3.3)$$

де

X_i – натуральне значення чинника;

x_{i0} – значення i -го чиннику на нульовому рівні;

δ_i – інтервал варіювання i -го чиннику.

Складання плану-матриці експерименту здійснювалось наступним чином: для x_1 рівні чергувались в кожному досліді, для x_2 – через два досліді.

Ортогональний план експерименту першого порядку подано у таблиці 3.2. Наведений план експерименту є розширеною матрицею, так як введений стовпець $x_1 x_2$, який дозволяє здійснити оцінку коефіцієнтів регресії при взаємодії чинників.

Таблиця 3.2 – План-матриця ПЧЕ типу кодованого вигляду 2^k

Дослід	(x_0)	(x_1)	(x_2)	$(x_1 x_2)$	(y)	(z)
1	+1	-1	-1	+1	y_1	z_1
2	+1	+1	-1	-1	y_2	z_2
3	+1	-1	+1	-1	y_3	z_3
4	+1	+1	+1	+1	y_4	z_4

На вогнегасну ефективність компресійної піни мають вплив не тільки x_1 та x_2 , на цей процес може впливати також низка некерованих або латентних чинників, які можуть бути взагалі невідомі. Паралельні досліді передбачаються для оцінки відтворюваності процесу і проведення статистичних оцінок.

Враховуючи, що поблизу екстремуму поверхня відгуку має суттєву кривизну і не може бути адекватно описана лінійним рівнянням навіть у вузькій області [109] для побудови рівняння другого ступеню за методом

Бокса-Вілсона [109], використовували план першого порядку (таблиця 3.2) в якості ядра, на якому побудовано конструкцію плану другого порядку. Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі, обраний згідно [109] подано у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Ортогональний план другого порядку в кодованому виразі

Дослід	x_0	x_1	x_2	$x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x_2^2 - \frac{2}{3}$	$x_1 x_2$	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

На підставі плану експерименту було проведено вимірювання таких параметрів, як маса витраченого на гасіння водного розчину ПУ з МД та тривалість ліквідації лабораторного вогнища. Зазначені параметри є необхідним для визначення показника ефективності гасіння КП. Під час гасіння тиск в системі генерування та подавання КП дорівнював 6 бар та не змінювався. Вентилі ствола системи було відрегулювало таким чином, щоб забезпечити співвідношення водного розчину ПУ/повітря, відповідно 1:5; 1:15; 1:25, що відповідає кратності 5;15;25 згідно з планом. Концентрація МД у складі КП дорівнювала 1 %; 3 %; 5 %. Водний розчину ПУ із відповідною концентрацією МД готувався попередньо за методом [10].

За допомогою відрегульованого ствола здійснювали гасіння вогнища пожежі. Струмінь компресійної піни спочатку спрямовували на фронтальну поверхню лабораторного вогнища. Далі, згідно порядку проведення випробувань [110], продовжували гасіння, спрямовуючи струмінь на верхню,

нижню й бічну поверхні (за винятком тильної). Згідно [110] 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 короточасних спалахів протягом зазначеного часу після закінчення гасіння не бралась до уваги. На рисунку 3.2 подано фото процесу робочих моментів під час експерименту.



а)

б)

Рисунок 3.2 – Робочі моменти експерименту: а) процес гасіння;
б) вимірювання необхідних параметрів

3.1. Результати експериментальних досліджень визначення вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальними добавками у її складі

3.1.1. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ за планом першого порядку

У таблиці 3.4 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піною із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

Таблиця 3.4 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

N	C, %	K	Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
			1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,67	0,73	0,7	69	67	68
2	5	5	0,66	0,73	0,695	72	77	74,5
3	1	25	0,4	0,45	0,425	54	55	54,5
4	5	25	0,38	0,43	0,405	55	57	56

Згідно методики викладеної у [109], на першому етапі перевірено відтворюваність дослідів. Враховуючи, що під час експерименту виконувалась однакова кількість паралельних дослідів на кожному із співвідношень рівнів чинників, відтворюваність процесу перевірено за критерієм Кохрена [109]:

$$G = \frac{s_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0,05;f_b;f_u)} \quad (3.4)$$

де

$s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - \bar{y}_u)^2}{m-1}$ – дисперсія, яка характеризує розсіювання

результатів дослідів на u -му рівні чинників;

$p=1,2,\dots,$

m – кількість паралельних дослідів;

$s_{u\max}^2$ – 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.

Під час експерименту виконано по два повторних визначення маси водного розчину піноутворювача з МД та часу, необхідного для успішного гасіння модельного вогнища. Таким чином оцінка дисперсії в кожній точці

плану розраховано за формулою [109]:

$$S_u^2 = \frac{\Delta^2}{2} \quad (3.5)$$

де

Δ - різниця між паралельними дослідями

Узагальнені результати розрахунків дисперсії за формулою (3.5) подано у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

Номер дослідів, N	Відхилення результату дослідів від середнього		Квадрат відхилення результату дослідів від середнього		Дисперсія кожного дослідів в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,06	-2	0,0036	4	0,0018	2
2	-0,07	-5	0,0049	25	0,00245	12,5
3	-0,05	-1	0,0025	2	0,00125	1
4	-0,05	-2	0,0025	4	0,00125	0,5

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = \frac{0,00245}{0,0018 + 0,00245 + 0,00125 + 0,00125} = 0,36296 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065$$

$$G_z = \frac{12,5}{12,5 + 2 + 0,5 + 2} = 0,11765 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3.4) виконується. При цьому дисперсія відтворюваності (похибка дослідів) розрахована за наступною формулою [109]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n S_u^2}{n} \quad (3.6)$$

Таким чином:

$$S_y^2 = \frac{0,0018 + 0,0025 + 0,00125 + 0,00125}{4} = 0,00169$$

$$S_z^2 = \frac{12,5 + 2 + 0,5 + 2}{4} = 4,25$$

Наступним кроком за рекомендаціями розраховано коефіцієнти регресії, оскільки процес є відтворюваним, за наступними формулами [109]:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n} \quad (3.7)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n} \quad (3.8)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n} \quad (3.9)$$

Для нашого випадку отримані наступні коефіцієнти регресії:

$$b_{y0} = \frac{0,7 + 0,695 + 0,425 + 0,405}{4} = 0,55625$$

$$b_{y1} = \frac{-0,7 + 0,695 - 0,425 + 0,405}{4} = -0,00625$$

$$b_{y2} = \frac{-0,7 - 0,695 + 0,425 + 0,405}{4} = -0,14125$$

$$b_{y12} = \frac{0,7 - 0,695 - 0,425 + 0,405}{4} = -0,0375$$

$$b_{z0} = \frac{68 + 74,5 + 54,5 + 56}{4} = 63,25$$

$$b_{z1} = \frac{-68 + 74,5 - 54,5 + 56}{4} = 2$$

$$b_{z2} = \frac{-68 - 74,5 + 54,5 + 56}{4} = -8$$

$$b_{z12} = \frac{-68 - 74,5 - 54,5 + 56}{4} = -1,25$$

Згідно з рекомендаціями методики [109] оцінено значимість отриманих коефіцієнтів за наступною нерівністю:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f_y)} \frac{S_y}{\sqrt{n}} \quad (3.10)$$

де

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

$$t = 2,7764;$$

Таким чином для оцінки отримано наступні значення Δb :

$$\Delta b_y = 2,7764 \frac{\sqrt{0,00169}}{\sqrt{4}} = 0,057 \quad \Delta b_z = 2,7764 \frac{\sqrt{4,25}}{\sqrt{4}} = 2,86$$

Результати оцінки значень отриманих коефіцієнтів регресії:

$$\begin{array}{ll} |0,55625| \geq 0,057 & |63,25| \geq 2,86 \\ |-0,00625| \leq 0,057 & |2| \leq 2,86 \\ |-0,14125| \geq 0,057 & |-8| \geq 2,86 \\ |-0,00375| \leq 0,057 & |-1,25| \leq 2,86 \end{array}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y1} = -0,00625$, $b_{y12} = 0,00375$, $b_{z1} = 2$, $b_{z12} =$

-1,25

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні лінійні моделі:

$$y = 0,55625 - 0,14125x_2 \quad (3.11)$$

$$z = 63,25 - 8x_2 \quad (3.12)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, при виконанні наступної нерівності [109]:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05;f_{ad};f_y)} \quad (3.13)$$

де

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n - k - 1};$$

y_u – розрахункове значення відгуку в u -му досліді;

$F_{(0,05;f_{ad};f_y)}$ – критерій Фішера при 5%-му рівні значимості;

$f_{ad}=n-k-1$ – число ступенів вільності дисперсії адекватності;

f_y – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

Для визначення розрахункових даних використано отримані рівняння регресії (3.11) та (3.12) із урахуванням значень чинників у кодованому вигляді за табл. 3.2:

$$\begin{array}{ll} y_1 = 0,55625 - 0,14125 \cdot (-1) = 0,6975 & z_1 = 63,25 - 8 \cdot (-1) = 71,25 \\ y_2 = 0,55625 - 0,14125 \cdot 1 = 0,415 & z_2 = 63,25 - 8 \cdot (-1) = 71,25 \\ y_3 = 0,55625 - 0,14125 \cdot (-1) = 0,6975 & z_3 = 63,25 - 8 \cdot 1 = 55,25 \\ y_4 = 0,55625 - 0,14125 \cdot 1 = 0,415 & z_4 = 63,25 - 8 \cdot 1 = 55,25 \end{array}$$

У таблиці 3.6 подано розрахункові значення m_p та t по отриманим лінійним рівнянням (3.11) та (3.12).

Таблиця 3.6 – Перевірка адекватності моделі

Номер досліджу	$\bar{y}_{експ.}$	$y_{розр.}$	$\bar{z}_{експ.}$	$z_{розр.}$	$(\bar{y}_{експ.} - y_{розр.})^2$	$(\bar{z}_{експ.} - z_{розр.})^2$
1	0,7	0,6975	68	71,25	0,00000625	10,5625
2	0,695	0,415	74,5	71,25	0,00000625	10,5625
3	0,425	0,6975	54,5	55,25	0,0001	0,5625
4	0,405	0,415	56	55,25	0,0001	0,5625

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13):

для рівняння 3.11
$$s_{адоу}^2 = \frac{0,0000625 + 0,0000625 + 0,0001 + 0,0001}{4 - 2 - 1} = 0,0002125$$

для рівняння 3.12
$$s_{адоz}^2 = \frac{10,5625 + 10,5625 + 0,5625 + 0,5625}{4 - 2 - 1} = 22,25$$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = \frac{0,0002125}{0,00169} = 0,125925926 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086$$

$$F_z = \frac{22,25}{4,25} = 5,23 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.11) та (3.12) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Із використання формули (3.3) рівняння (3.11) та (3.12) приводимо до натуральних змінних:

$$m_p = 0,55625 - 0,14125 \cdot \frac{k - 15}{10} = 0,7681125 - 0,014125 \cdot k$$

$$t = 63,25 - 8 \cdot \frac{k - 15}{10} = 75,25 - 0,8 \cdot k$$

На рисунку 3.3 подано залежності впливу кратності піни на витрату водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

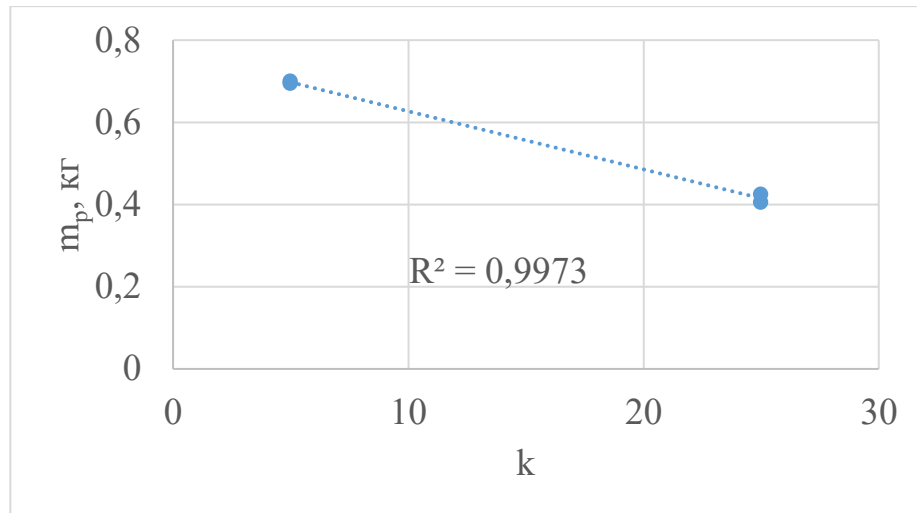


Рисунок 3.3 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі в залежності від кратності піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

У результаті оцінки значимості коефіцієнтів регресії, встановлено, що наявність та вплив модифікувальної добавки $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ не має суттєвого впливу на витрату водного розчину піноутворювача на гасіння. Це можна пояснити низьким вмістом МД у водному розчині піноутворювача, який майже не змінює загальну масу. Кратність піни має суттєвий вплив на зниження витрати водного розчину піноутворювача із підвищенням кратності, оскільки відбувається зниження маси рідкої фази та підвищення кількості повітря в піні що генерується. Встановлено лінійну залежність, що подано формулою (3.14):

$$m_p = 0,7681125 - 0,014125 \cdot k \quad (3.14)$$

На рисунку 3.4 подано залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

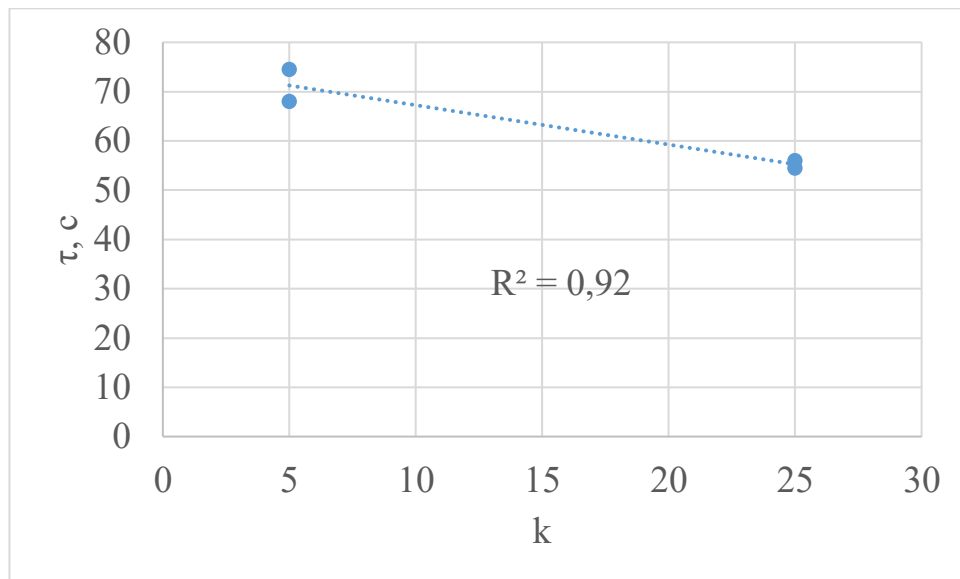


Рисунок 3.4 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Отже за результатами регресійного аналізу встановлено, що на час гасіння має вплив кратність компресійної піни. Вплив наявності та концентрації модифікувальної добавки $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ на час гасіння несуттєвим, про що свідчить оцінка коефіцієнтів регресії. Це можна пояснити недостатністю експериментальних результатів, оскільки експеримент було проведено лише на верхніх та нижніх значеннях чинників, без додаткових дослідів на нульовому рівні. Зі збільшенням кратності піни зменшується час гасіння, при цьому характерна лінійна залежність, що подано формулою (3.15):

$$\tau = 75,25 - 0,8 \cdot k \quad (3.15)$$

3.1.2 Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ за планом другого порядку

У таблиці 3.7 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піною із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Таблиця 3.7 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

N	C, %	K	Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
	x_1	x_2	1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,67	0,73	0,7	69	67	68
2	5	5	0,66	0,73	0,695	72	77	74,5
3	1	25	0,4	0,45	0,425	54	55	54,5
4	5	25	0,38	0,43	0,405	55	57	56
5	1	15	0,49	0,51	0,5	41	39	40
6	5	15	0,52	0,49	0,505	38	37	37,5
7	3	5	0,63	0,62	0,625	64	65	64,5
8	3	25	0,39	0,41	0,4	46	47	46,5
9	3	15	0,51	0,49	0,5	32	34	33

Узагальнені результати розрахунків дисперсії за подано у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

N	Відхилення результату дослідів від середнього		Квадрат відхилення результату дослідів від середнього		Дисперсія кожного дослідів в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,06	2	0,0036	4	0,0018	2
2	-0,07	-5	0,0049	25	0,00245	12,5
3	-0,05	-1	0,0025	1	0,00125	0,5
4	-0,05	-2	0,0025	4	0,00125	2
5	-0,02	2	0,0004	4	0,0002	2
6	0,03	1	0,0009	1	0,00045	0,5
7	0,01	-1	0,0001	1	0,00005	0,5
8	-0,02	-1	0,0004	1	0,0002	0,5
9	0,02	-2	0,0004	4	0,0002	2

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = 0,312 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639 \quad G_z = 0,555 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3.4) виконується.

При цьому дисперсія відтворюваності (похибка дослідів) розрахована за формулою (3.6):

$$S_y^2 = 0,000872222 \quad S_z^2 = 2,5$$

Коефіцієнти регресії розраховані за наступною формулою [109]:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} y_u}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2} \quad (3.16)$$

Значення $\sum_{u=1}^n x_{iu}^2$ обрано згідно [109] для ортогональних планів другого порядку ($x_0 = 9; x_i = 6; x_{ij} = 4; x_i^{2-\phi} = 2$).

Для нашого випадку отримані наступні коефіцієнти регресії за формулою (3.16) (з урахуванням даних з табл. 3.7,3.8):

$$\begin{array}{ll} b_{y0} = 0,528 & b_{z0} = 52,72 \\ b_{y1} = -0,00333 & b_{z1} = 0,92 \\ b_{y2} = -0,13167 & b_{z2} = -8,33 \\ b_{y1}^2 = -0,03 & b_{z1}^2 = 7,08 \\ b_{y2}^2 = 0,04 & b_{z2}^2 = 23,83 \\ b_{y12} = -0,02 & b_{z12} = -1,25 \end{array}$$

Значимість отриманих коефіцієнтів регресії оцінено за нерівністю (3.10), при $t_{(0,05;9)} = 2,26, \Delta b_y = 0,02, \Delta b_z = 1,19$:

$$\begin{array}{ll}
|0,528333| \geq 0,02 & |52,72| \geq 1,19 \\
|-0,00333| \leq 0,02 & |0,92| \leq 1,19 \\
|-0,13167| \geq 0,02 & |-8,33| \geq 1,19 \\
|0,03| \geq 0,02 & |7,08| \geq 1,19 \\
|0,04| \geq 0,02 & |23,83| \geq 1,19 \\
|-0,00375| \leq 0,02 & |-1,25| \geq 1,19
\end{array}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y_1} = -0,00333, b_{y_{12}} = -0,00375, b_{z_1} = 0,92$.

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні поліноми 2-го ступеня моделі:

$$y = 0,5283 - 0,13167x_2 + 0,03x_1^2 + 0,04x_2^2 \quad (3.17)$$

$$z = 52,72 - 8,33x_2 + 7,08x_1^2 + 23,83x_2^2 - 1,25x_1x_2 \quad (3.18)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера, за формулою (3.13). У таблиці 3.9 подано розрахункові значення m_p та τ по отриманим поліномами другого ступеня (3.17) та (3.18).

Таблиця 3.9 – Перевірка адекватності моделі

N	\bar{m}	$m_{роз.}$	$\bar{\tau}$	$\tau_{роз.}$	$(\bar{m} - m_{роз.})^2$	$(\bar{\tau} - \tau_{роз.})^2$
1	0,7	0,68	68	70,10	0,00034844	4,424011111
2	0,695	0,6813	74,5	72,603	0,00018678	3,597344444
3	0,425	0,4213	54,5	55,9433	0,0000134	2,083211111
4	0,405	0,3813	56	53,44	0,00056011	6,536544444
5	0,5	0,5113	40	39,19	0,0001284	0,650711111
6	0,505	0,5113	37,5	39,193	0,00004	2,867377778
7	0,625	0,6513	64,5	64,2733	0,00069344	0,051377778
8	0,4	0,3913	46,5	47,613	0,000075	1,239511111
9	0,5	0,4813	33	32,1133	0,00034844	0,786177778

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13), з урахуванням, що $f_{ад} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}$:

$$\text{для рівняння 3.17} \quad s_{аду}^2 = 0,0007881;$$

$$\text{для рівняння 3.18} \quad s_{аоз}^2 = 7,412;$$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,802 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59, F_z = 2,96 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.17) та (3.18) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Оскільки було проведено перетворення квадратичної змінної згідно [109], з метою переходу до звичайної форми запису знайдено величину b_0 за формулою:

$$b_0 = b'_0 - \sum_{1 \leq i \leq k} \phi b_{ij} \quad (3.19)$$

Із використання формул (3.3) та (3.19) рівняння (3.17) та (3.18) приводимо до натуральних змінних:

$$m_p = 0,481 = 0,13 \cdot \frac{k-15}{10} + 0,03 \cdot \left(\frac{C-3}{2}\right)^2 + 0,04 \cdot \left(\frac{k-15}{10}\right)^2$$

$$\tau = 32,113 - 8,33 \cdot \frac{k-15}{10} + 7,08 \cdot \left(\frac{C-3}{2}\right)^2 + 23,83 \cdot \left(\frac{k-15}{10}\right)^2 + 1,25 \cdot \left(\frac{C-3}{2}\right) \cdot \left(\frac{k-15}{10}\right)$$

На рисунку 3.5 подано залежність витрату водного розчину піноутворювача КП від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}$ та кратності піни при гасінні

лабораторного вогнища пожежі класу А.

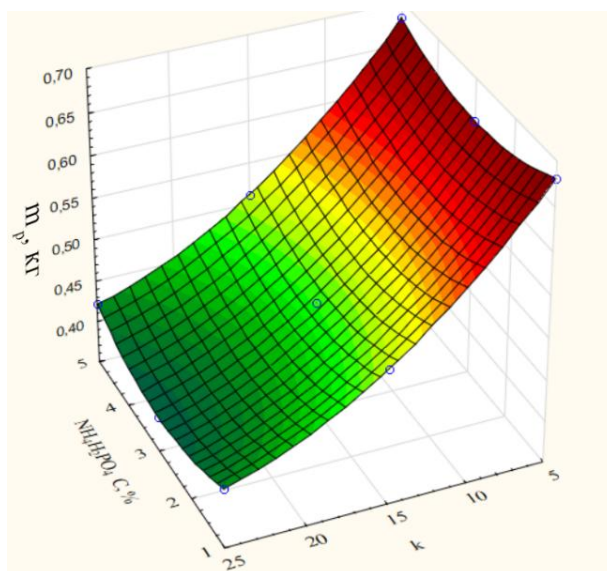


Рисунок 3.5 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні лабораторного вогнища пожежі від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни

З аналізу поверхні відгуку зрозуміло, що суттєвий вплив на зменшення маси водного розчину піноутворювача із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ має саме кратність піни. Незначний ефект має збільшення або зменшення концентрації модифікувальної добавки $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Таким чином найменша маса піноутворювача, необхідного на гасіння лабораторного вогнища спостерігається при кратності піни 25 та концентрації МД 3% і становить 0,318 кг. Це на 54 % менше за масу водного розчину ПУ, при кратності піни 5 та концентрації МД 1 %. Зазначений вплив можна пояснити саме кількістю повітря в генерованій піні, оскільки при підвищенні кратності, кількість повітря збільшується. Отримане квадратичне рівняння подано формулою (3.20):

$$m_p = 0,83 - 0,045 \cdot C - 0,025 \cdot k + 0,0075 \cdot C^2 + 0,004 \cdot k^2 \quad (3.20)$$

На рисунку 3.6 подано залежність часу гасіння лабораторного вогнища пожежі класу А компресійною піною від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни.

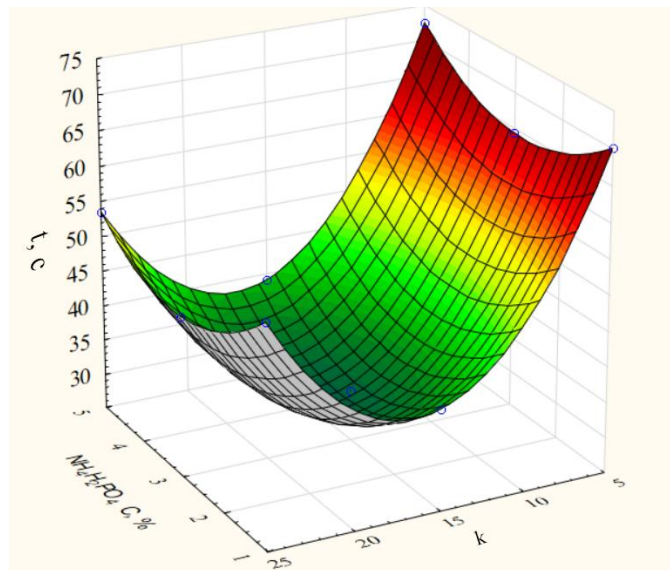


Рисунок 3.6 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни

При аналізі поверхні відгуку, що відображає саме залежність часу гасіння від концентрації модифікувальної добавки $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни, виявлено суттєвий вплив як і концентрації МД, так і кратності піни. На відміну від результатів, що отримані під час аналізу впливу концентрації МД на масу водного розчину піноутворювача, найменший час гасіння встановлено саме при концентрації добавки приблизно 3 % і кратності піни в межах 15. Від самого найнижчого показника часу гасіння, який становить 72,6 секунд, при зазначених параметрах піни ($k=5$; $C=1\%$) час гасіння зменшується на 56 %. Такий ефект може бути пояснений саме наявністю інгібуючого впливу в компресійній піні, який було отримано за рахунок додавання до її складу модифікувальної добавки певній концентрації. Отримане рівняння регресії подано формулою (3.21):

$$\tau = 111,33 - 9,67 \cdot C - 7,79 \cdot k + 1,76 \cdot C^2 + 0,238 \cdot K^2 - 0,0626 \cdot C \cdot k \quad (3.21)$$

3.1.3. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ за планом першого порядку

У таблиці 3.10 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піни із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

Таблиця 3.10 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

N	C, %	k	Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
			1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,71	0,77	0,74	73,01	70,9	71,95
2	5	5	0,7	0,77	0,735	76,19	81,48	78,83
3	1	25	0,42	0,48	0,45	57,14	58,2	57,67
4	5	25	0,4	0,46	0,43	58,2	60,31	59,25

Узагальнені результати розрахунків дисперсії подано у таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

N	Відхилення результату дослідів від середнього		Квадрат відхилення результату дослідів від середнього		Дисперсія кожного дослідів в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,06	2,11	0,0036	4,4521	0,0018	2,22605
2	-0,07	-5,29	0,0049	27,98	0,00245	13,9920
3	-0,06	-1,06	0,0036	1,1236	0,0018	0,5618
4	-0,06	2,11	0,0036	4,4521	0,0018	2,22605

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = 0,321 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065, G_z = 0,736 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3.4) виконується.

Дисперсія відтворюваності (похибка досліду) розрахована за формулою (3.5):

$$S_y^2 = 0,00196, S_z^2 = 4,75$$

Наступним кроком за рекомендаціями розраховано коефіцієнти регресії, оскільки процес є відтворюваним, за формулами (3.7-3.9):

$$\begin{aligned} b_{y0} &= 0,58875 & b_{z0} &= 66,92 \\ b_{y1} &= -0,00625 & b_{z1} &= 2,11 \\ b_{y2} &= -0,14875 & b_{z2} &= -8,46 \\ b_{y12} &= -0,00375 & b_{z12} &= -1,32 \end{aligned}$$

Згідно з рекомендаціями методики оцінено значимість отриманих коефіцієнтів за нерівністю (3.10). Таким чином для оцінки отримано наступні значення Δb :

$$\Delta b_y = 0,061 \qquad \Delta b_z = 3,025$$

Результати оцінки значень отриманих коефіцієнтів регресії:

$$\begin{aligned} |0,58875| &\geq 0,061 & |66,92| &\geq 3,025 \\ |-0,00625| &\leq 0,061 & |2,11| &\leq 3,025 \\ |-0,14875| &\geq 0,061 & |-8,46| &\geq 3,025 \\ |-0,00375| &\leq 0,061 & |-1,32| &\leq 3,025 \end{aligned}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y1} = -0,00625$, $b_{y12} = 0,00375$, $b_{z1} = 2,11$, $b_{z12} = -1,32$

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні лінійні моделі:

$$y = 0,558875 - 0,14875x_1 \quad (3.22)$$

$$z = 66,92 - 8,46x_2 \quad (3.23)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, при виконанні нерівності (3.13). У таблиці 3.12 подано розрахункові значення t_p та τ по отриманим лінійним рівнянням (3.22) та (3.23).

Таблиця 3.12 – Перевірка адекватності моделі

Номер дослідів, N	$\bar{y}_{експ.}$	$y_{розр.}$	$\bar{z}_{експ.}$	$z_{розр.}$	$(\bar{y}_{експ.} - y_{розр.})^2$	$(\bar{z}_{експ.} - z_{розр.})^2$
1	0,74	0,7375	71,955	75,395	0,00000625	11,8336
2	0,735	0,7375	78,835	75,395	0,00000625	11,8336
3	0,45	0,44	57,67	58,4625	0,0001000000	0,62805625
4	0,43	0,44	59,255	58,4625	0,0001000000	0,62805625

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13):

$$\text{для рівняння 3.22} \quad s_{a\partial y}^2 = 0,0002125$$

$$\text{для рівняння 3.23} \quad s_{a\partial z}^2 = 24,92$$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,108 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086, \quad F_z = 5,24 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.22) та (3.23) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Із використання формули (3.3) рівняння (3.22) та (3.23) приводимо до натуральних змінних.

На рисунку 3.7 подано залежності впливу кратності піни на витрату водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

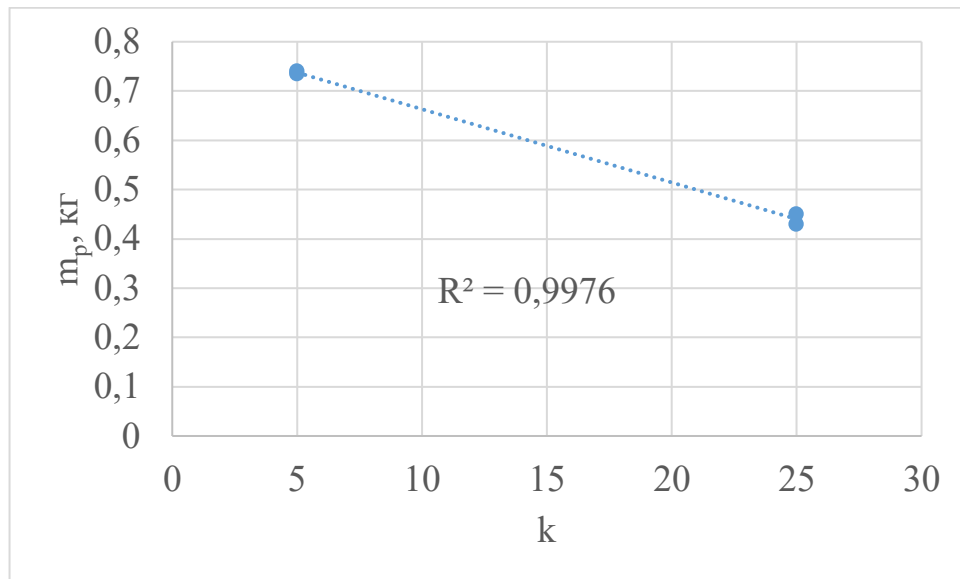


Рисунок 3.7 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі в залежності від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

Наявність та вплив $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ має аналогічний характер, як і вплив NH_4HPO_4 на витрати водного розчину піноутворювача. Це також може бути пояснено достатньо низьким вмістом МД у водному розчині піноутворювача, що не впливає на загальну масу. Щодо впливу кратності, із підвищення кількості повітря в піні що генерується, також відбувається зниженням рідкої фази. Встановлено лінійну залежність, що подано формулою (3.24):

$$m_p = 0,8119 - 0,0149 \cdot k \quad (3.24)$$

На рисунку 3.8 подано залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

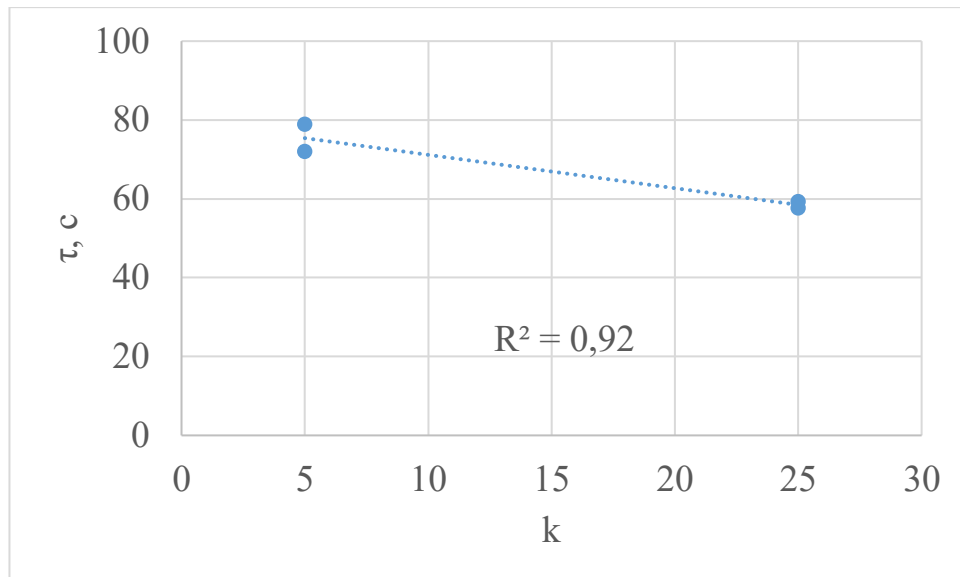


Рисунок 3.8 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

Вплив наявності та концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ на час гасіння не є суттєвим, як і для компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Це також можна пояснити недостатністю експериментальних результатів, оскільки експеримент було проведено лише на верхніх та нижніх значеннях чинників, без додаткових дослідів на нульовому рівні. Вплив кратності піни є подібним, про що свідчить характерна залежність. Із підвищення кратності піни час гасіння зменшується. Лінійна залежність, подано формулою (3.25):

$$\tau = 79,628 - 0,8466 \cdot k \quad (3.25)$$

3.1.4. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ за планом другого порядку.

У таблиці 3.13 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піною із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

Таблиця 3.13 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

N	C, %		Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
	x_1	x_2	1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,71	0,77	0,74	73,01	70,90	71,95
2	5	5	0,70	0,77	0,735	76,19	81,48	78,83
3	1	25	0,42	0,48	0,45	57,14	58,20	57,67
4	5	25	0,40	0,46	0,43	58,20	60,31	59,25
5	1	15	0,52	0,54	0,53	43,38	41,27	42,32
6	5	15	0,55	0,52	0,535	40,21	39,15	39,68
7	3	5	0,67	0,66	0,665	67,72	68,78	68,25
8	3	25	0,41	0,43	0,42	48,67	49,73	49,2
9	3	15	0,54	0,52	0,53	33,86	35,98	34,92

Узагальнені результати розрахунків дисперсії подано у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14. Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

Номер дослідів, N	Відхилення результату дослідів від середнього		Квадрат відхилення результату дослідів від середнього		Дисперсія кожного дослідів в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,06	2,11	0,0036	4,4521	0,0018	2,2261
2	-0,07	-5,29	0,0049	27,9841	0,00245	13,992
3	-0,06	-1,06	0,0036	1,1236	0,0018	0,5618
4	-0,06	-2,11	0,0036	4,4521	0,0018	2,2261
5	-0,02	2,11	0,0004	4,4521	0,0002	2,2261
6	0,03	1,06	0,0009	1,1236	0,00045	0,5618
7	0,01	-1,06	0,0001	1,1236	0,00005	0,5618
8	-0,02	-1,06	0,0004	1,1236	0,0002	0,5618
9	0,02	-2,12	0,0004	4,4944	0,0002	2,2472

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = 0,273 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639, G_z = 0,556 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3.4) виконується. При цьому дисперсія відтворюваності (похибка дослідів) розрахована за формулою (3.5):

$$S_y^2 = 0,00099, S_z^2 = 2,79$$

Коефіцієнти регресії розраховані за формулою (3.16) [110]:

$$\begin{array}{ll} b_{y0} = 0,559 & b_{z0} = 55,79 \\ b_{y1} = -0,00333 & b_{z1} = 0,97 \\ b_{y2} = -0,14 & b_{z2} = -8,82 \\ b_{y1}^2 = 0,03167 & b_{z1}^2 = 7,5 \\ b_{y2}^2 = 0,04167 & b_{z2}^2 = 25,22 \\ b_{y12} = -0,0037 & b_{z12} = -1,32 \end{array}$$

Значимість отриманих коефіцієнтів регресії оцінено за нерівністю (3.10), при $t_{(0,05;9)} = 2,26, \Delta b_y = 0,023, \Delta b_z = 1,25$:

$$\begin{array}{ll} |0,559| \geq 0,023 & |55,79| \geq 1,25 \\ |-0,00333| \leq 0,023 & |0,97| \leq 1,25 \\ |-0,14| \geq 0,023 & |-8,82| \geq 1,25 \\ |0,03167| \geq 0,023 & |7,5| \geq 1,25 \\ |0,04167| \geq 0,023 & |25,52| \geq 1,25 \\ |-0,0037| \leq 0,023 & |-1,32| \geq 1,25 \end{array}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y_1} = -0,00333$, $b_{y_{12}} = -0,0037$, $b_{z_1} = 0,97$.

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні поліноми 2-го ступеня моделі:

$$y = 0,559 - 0,14x_2 + 0,03167x_1^2 + 0,04167x_2^2 \quad (3.26)$$

$$z = 52,72 - 8,33x_2 + 7,08x_1^2 + 23,83x_2^2 - 1,25x_1x_2 \quad (3.27)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера, за формулою (3.13). У таблиці 3.15 подано розрахункові значення m_p та τ по отриманим поліномами другого ступеню (3.26) та (3.27).

Таблиця 3.15. Перевірка адекватності моделі

Номер дослідів, N	\bar{m}	$m_{роз.}$	$\bar{\tau}$	$\tau_{роз.}$	$(\bar{m} - m_{роз.})^2$	$(\bar{\tau} - \tau_{роз.})^2$
1	0,74	0,72	71,955	74,30	0,000274	5,483
2	0,735	0,72344	78,835	76,9366	0,000133	3,603669
3	0,45	0,443446	57,67	59,2966	0,000042	2,64604
4	0,43	0,44344	59,255	56,66	0,000180	6,7513
5	0,53	0,54177	42,325	41,28	0,0001387	1,0990027
6	0,535	0,54177	39,68	41,2767	0,00005	2,5493
7	0,665	0,69177	68,25	68,116	0,000716	0,017
8	0,42	0,41177	49,2	50,4766	0,000068	1,629
9	0,53	0,51010	34,92	33,776	0,000395	1,307

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13), з урахуванням, що $f_{ад} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}$:

$$\text{для рівняння (3.26)} \quad s_{аду}^2 = 0,00066;$$

для рівняння (3.27) $s_{\text{доЗ}}^2 = 8,36;$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,669 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59, F_z = 2,99 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.26) та (3.27) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Із використання формули (3.3) та (3.19), рівняння (3.26) та (3.27) приводимо до натуральних змінних.

На рисунку 3.9 подано залежність витрати водного розчину піноутворювача КП від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та кратності піни при гасінні лабораторного вогнища пожежі класу А.

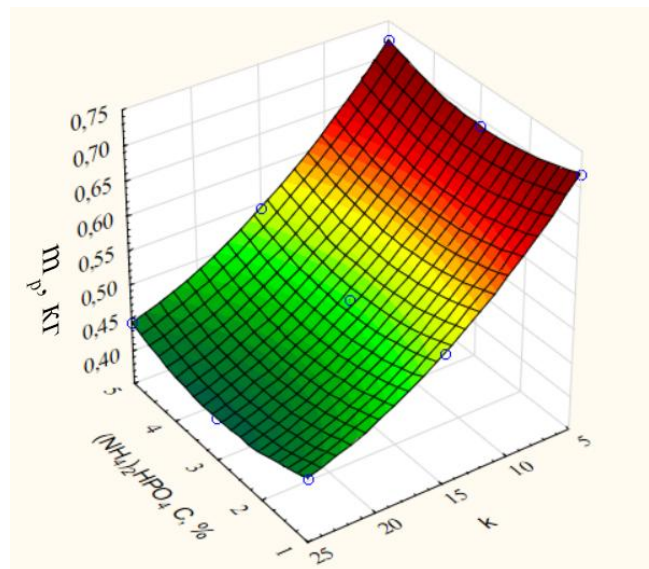


Рисунок 3.9 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні лабораторного вогнища пожежі від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, та кратності піни

Наявність та вплив $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ має аналогічний характер, як і вплив NH_4HPO_4 на витрати водного розчину піноутворювача. При збільшенні або

зменшенні концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ спостерігається незначний вплив на масу водного розчину. Найменша маса піноутворювача, що була витрачена гасіння лабораторного вогнища спостерігається також при кратності піни 25 та концентрації МД 3% і становить 0,41 кг. Це на 44 % менше за масу водного розчину ПУ, при кратності піни 5 та концентрації МД 1 %. Такий вплив можна пояснити також кількістю повітря в піні, що генерується. При підвищенні кратності піни має місце збільшення газової фази. Отримано наступне рівняння регресії у натуральних значеннях за довірчої ймовірності 0,95, яке описує залежність (рівняння 3.28) витрати водного розчину піноутворювача при гасінні лабораторного вогнища пожежі класу А від кратності КП та концентрації МД $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$:

$$m_p = 0,87 - 0,0457 \cdot C - 0,0261 \cdot k + 0,0078 \cdot C^2 + 0,004 \cdot k^2 \quad (3.28)$$

На рисунку 3.10 подано залежність часу гасіння лабораторного вогнища пожежі класу А компресійною піною від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та кратності піни.

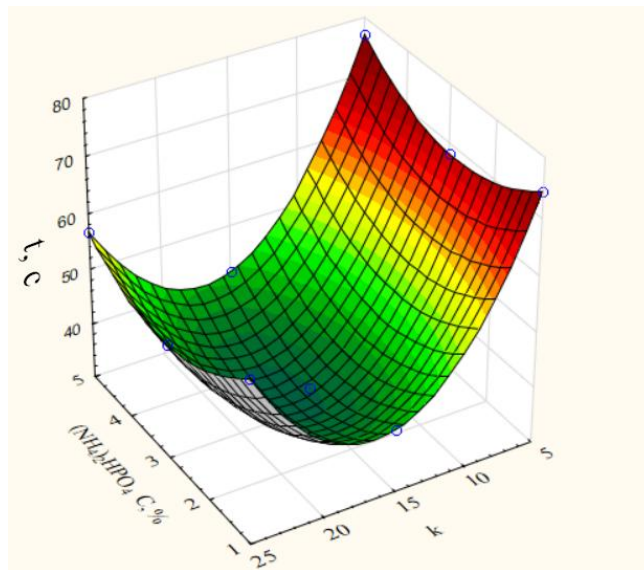


Рисунок 3.10 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та кратності піни

Застосування $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ у водному розчині компресійної піни має подібний характер, як і вплив $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Отже на час має суттєвий вплив концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ поряд із кратністю піни. Найменший час гасіння зафіксовано також при концентрації добавки 3 % і кратності піни 15. Найбільший час гасіння встановлено при кратності піни 5 із концентрацією добавки 1 %. Різниця між отриманими експериментальними значеннями становить 52 %. Зазначений ефект підтверджує раніше висунуту гіпотезу, щодо підвищення вогнегасної здатності компресійної піни за рахунок використання модифікувальних добавок. При цьому виявлено найбільш ефективну концентрацію МД. Отримано наступне рівняння регресії у натуральних значеннях за довірчої ймовірності 0,95, яке описує залежність (рівняння 3.29) часу гасіння лабораторного вогнища пожежі класу А від кратності КП та концентрації МД $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ подано наступною формулою:

$$\tau = 118,3 - 10,26 \cdot C - 8,34 \cdot k + 1,875 \cdot C^2 + 0,25 \cdot K^2 - 0,066 \cdot C \cdot k \quad (3.29)$$

3.1.5. Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за планом першого порядку.

У таблиці 3.16 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піни із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Таблиця 3.16 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

N	C, %	k	Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
			1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,78	0,85	0,815	80,23	77,91	79,07
2	5	5	0,77	0,85	0,81	83,72	89,53	86,62
3	1	25	0,47	0,52	0,495	62,79	63,95	63,37
4	5	25	0,44	0,5	0,47	63,95	66,28	65,11

Узагальнені результати розрахунків дисперсії за формулою (3.5) подано у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17. Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

Номер досліджу, N	Відхилення результату досліджу від середнього		Квадрат відхилення результату досліджу від середнього		Дисперсія кожного досліджу в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,07	2,32	0,0049	5,38	0,00245	2,6912
2	-0,08	-5,81	0,0064	33,75	0,00320	16,87805
3	-0,05	-1,16	0,0025	1,34	0,00125	0,6728
4	-0,06	-2,33	0,0036	5,42	0,0018	2,71445

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = 0,367 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065, G_z = 0,735 < G_{(0,05;4;1)} = 0,9065$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3.4) виконується. Дисперсія відтворюваності (похибка досліджу) розрахована за формулою (3.5):

$$S_y^2 = 0,00218, S_z^2 = 5,73$$

Наступним кроком за рекомендаціями розраховано коефіцієнти регресії, оскільки процес є відтворюваним, за формулами (3.7-3.9):

$$\begin{aligned} b_{y_0} &= 0,6475 & b_{z_0} &= 73,545 \\ b_{y_1} &= -0,0075 & b_{z_1} &= 2,325 \\ b_{y_2} &= -0,165 & b_{z_2} &= -9,3025 \\ b_{y_{12}} &= -0,005 & b_{z_{12}} &= -1,4525 \end{aligned}$$

Згідно з рекомендаціями методики оцінено значимість отриманих

коефіцієнтів за нерівністю (3.10). Таким чином для оцінки отримано наступні значення Δb :

$$\Delta b_y = 0,064 \qquad \Delta b_z = 3,325$$

Результати оцінки значень отриманих коефіцієнтів регресії:

$$\begin{array}{ll} |0,6475| \geq 0,064 & |73,545| \geq 3,325 \\ |-0,0075| \leq 0,064 & |2,325| \leq 3,325 \\ |-0,165| \geq 0,064 & |-9,3025| \geq 3,325 \\ |-0,005| \leq 0,064 & |-1,45| \leq 3,325 \end{array}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y_1} = -0,0075$, $b_{y_{12}} = 0,005$, $b_{z_1} = 2,325$, $b_{z_{12}} = -1,45$

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні лінійні моделі:

$$y = 0,6475 - 0,165x_1 \qquad (3.30)$$

$$z = 73,545 - 9,3025x_2 \qquad (3.31)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера. Адекватність обґрунтована, при виконанні нерівності (3.13). У таблиці 3.18 подано розрахункові значення t_p та τ по отриманим лінійним рівнянням (3.30) та (3.31).

Таблиця 3.18 – Перевірка адекватності моделі

Номер досліджу, N	$\bar{y}_{експ.}$	$y_{розр.}$	$\bar{z}_{експ.}$	$z_{розр.}$	$(\bar{y}_{експ.} - y_{розр.})^2$	$(\bar{z}_{експ.} - z_{розр.})^2$
1	0,815	0,8125	79,07	82,848	0,00000625	14,2695063
2	0,81	0,8125	86,625	82,848	0,00000625	14,2695063

3	0,495	0,4825	63,37	64,243	0,0001562500	0,76125625
4	0,47	0,4825	65,115	64,243	0,0001562500	0,76125625

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13):

$$\text{для рівняння (3.30)} \quad s_{\text{аду}}^2 = 0,00032$$

$$\text{для рівняння (3.31)} \quad s_{\text{аdz}}^2 = 30,06$$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,149 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086, F_z = 5,23 < F_{(0,05;1;4)} = 7,7086$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.30) та (3.31) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Із використання формули (3.3) рівняння (3.30) та (3.31) приводимо до натуральних змінних.

На рисунку 3.11 подано залежності впливу кратності піни на витрату водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

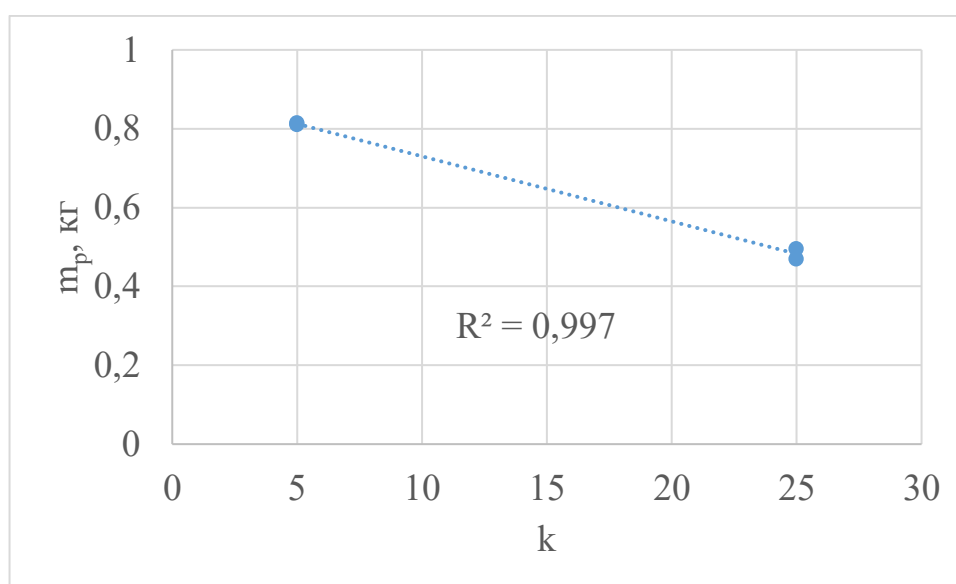


Рисунок 3.11 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні модельного вогнища пожежі в залежності від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Наявність та вплив $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ також має подібний характер, як і вплив попередньо застосованих $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ на витрати водного розчину піноутворювача. Це також може бути пояснено достатньо низьким вмістом МД у водному розчині піноутворювача, що не впливає на загальну масу. Вплив кратності піни на кількість водного розчину піноутворювача має подібний характер, вплив чого вже був пояснений вище. Встановлено лінійну залежність, яка подана формулою (3.32):

$$m_p = 0,895 - 0,0165 \cdot k \quad (3.32)$$

На рисунку 3.12 подано залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

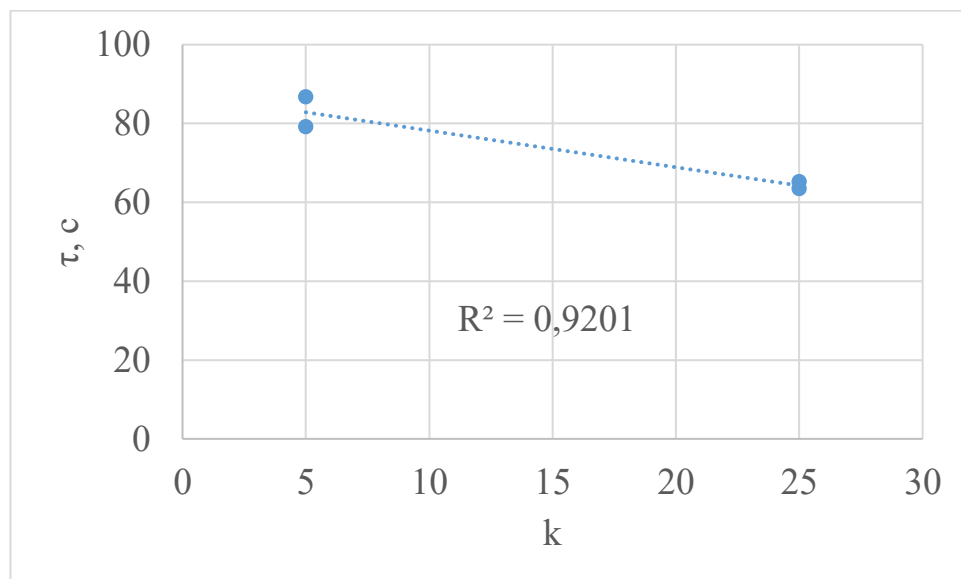


Рисунок 3.12 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від кратності піни із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Отже на підставі отриманих результатів, вплив наявності та концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ на час гасіння є не суттєвим, як і в попередніх результатах і компресійною піною з $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Це також можна пояснити недостатністю експериментальних результатів, оскільки

експеримент було проведено лише на верхніх та нижніх значеннях чинників, без додаткових дослідів на нульовому рівні. Вплив кратності піни є подібним, про що свідчить характерна залежність. Із підвищення кратності піни час гасіння зменшується. Лінійна залежність, подано формулою (3.33):

$$\tau = 87,499 - 0,9302 \cdot k \quad (3.33)$$

3.1.6 Результати експерименту та перевірка адекватності моделей для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ за планом другого порядку.

У таблиці 3.19 подано результати вимірювання маси водного розчину піноутворювача m_p , витраченого на гасіння та тривалість гасіння τ компресійною піною із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Таблиця 3.19 – Результати дослідів гасіння модельного вогнища КП із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

N	C, %		Маса розчину m_p , кг			Час гасіння τ , с		
	x_1	x_2	1	2	\bar{m}	1	2	$\bar{\tau}$
			m_1	m_2		τ_1	τ_2	
1	1	5	0,78	0,85	0,815	80,23	77,91	79,07
2	5	5	0,77	0,85	0,81	83,72	89,53	86,62
3	1	25	0,47	0,52	0,495	62,79	63,95	63,37
4	5	25	0,44	0,5	0,47	63,95	66,28	65,11
5	1	15	0,57	0,59	0,58	47,67	45,35	46,51
6	5	15	0,6	0,57	0,585	44,19	43,02	43,60
7	3	5	0,73	0,72	0,725	74,42	75,58	75
8	3	25	0,45	0,48	0,465	53,49	54,65	54,07
9	3	15	0,59	0,57	0,58	37,21	39,53	38,37

Узагальнені результати розрахунків дисперсії за формулою подано у таблиці 3.20.

Таблиця 3.20 – Значення оцінок дисперсії в кожній точці плану

Номер досліджу, N	Відхилення результату досліджу від середнього		Квадрат відхилення результату досліджу від середнього		Дисперсія кожного досліджу в кожній точці плану	
	$(y_1 - y_2)$	$(z_1 - z_2)$	$(y_1 - y_2)^2$	$(z_1 - z_2)^2$	S_y^2	S_z^2
1	-0,07	2,32	0,0049	5,3824	0,00245	2,6912
2	-0,08	-5,81	0,0064	33,7561	0,0032	16,878
3	-0,05	-1,16	0,0025	1,3456	0,00125	0,6728
4	-0,06	-2,33	0,0036	5,4289	0,0018	2,7145
5	-0,02	2,32	0,0004	5,3824	0,0002	2,6912
6	0,03	1,17	0,0009	1,3689	0,00045	0,6844
7	0,01	-1,16	0,0001	1,3456	0,00005	0,6728
8	-0,03	-1,16	0,0009	1,3456	0,00045	0,6728
9	0,02	-2,32	0,0004	5,3824	0,0002	2,6912

За формулою (3.4) перевірено процес відтворюваності дослідів:

$$G_y = 0,318 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639, \quad G_z = 0,555 < G_{(0,05;9;1)} = 0,639$$

Процес є відтворюваним, оскільки нерівність (3) виконується. При цьому дисперсія відтворюваності (похибка досліджу) розрахована за формулою (3.5):

$$S_y^2 = 0,0011 \quad S_z^2 = 3,37$$

Коефіцієнти регресії розраховані за формулою 3.16 [110]:

$$\begin{aligned} b_{y0} &= 0,61389 & b_{z0} &= 61,3 \\ b_{y1} &= -0,00417 & b_{z1} &= 1,07 \\ b_{y2} &= -0,153 & b_{z2} &= -9,69 \\ b_{y1}^2 &= -0,035 & b_{z1}^2 &= 8,24 \\ b_{y2}^2 &= 0,048 & b_{z2}^2 &= 27,71 \\ b_{y12} &= -0,005 & b_{z12} &= -1,45 \end{aligned}$$

Значимість отриманих коефіцієнтів регресії оцінено за нерівністю

(3.10), при $t_{(0,05;9)} = 2,26$, $\Delta b_y = 0,025$, $\Delta b_z = 1,38$:

$$\begin{array}{ll} |0,613| \geq 0,025 & |61,3| \geq 1,38 \\ |-0,004| \leq 0,025 & |1,07| \leq 1,38 \\ |-0,153| \geq 0,025 & |-9,69| \geq 1,38 \\ |0,035| \geq 0,025 & |8,24| \geq 1,38 \\ |0,048| \geq 0,025 & |27,71| \geq 1,38 \\ |-0,005| \leq 0,025 & |-1,45| \geq 1,38 \end{array}$$

За результатами оцінки при побудові моделі не будуть враховані наступні коефіцієнти: $b_{y1} = -0,004$, $b_{y12} = -0,005$, $b_{z1} = 1,07$.

Враховуючи результати оцінки коефіцієнтів регресії отримано наступні поліноми 2-го ступеня моделі:

$$y = 0,613 - 0,153x_2 + 0,035x_1^2 + 0,048x_2^2 \quad (3.34)$$

$$z = 61,3 - 9,69x_2 + 8,24x_1^2 + 27,71x_2^2 - 1,45x_1x_2 \quad (3.35)$$

Перевірку адекватності отриманих моделей виконано за допомогою критерію Фішера, за формулою (3.13). У таблиці 3.21 подано розрахункові значення m_p та τ по отриманим поліномами другого ступеню (3.34) та (3.35).

Таблиця 3.21 – Перевірка адекватності моделі

Номер досліджу, N	\bar{m}	$m_{роз.}$	$\bar{\tau}$	$\tau_{роз.}$	$(\bar{m} - m_{роз.})^2$	$(\bar{\tau} - \tau_{роз.})^2$
1	0,81	0,80	79,07	81,52	0,00021674	6,024297531
2	0,81	0,795277	86,63	84,4294	0,00021674	4,842444753
3	0,49	0,488611	63,37	65,0494	0,0000019	2,820533642
4	0,47	0,488611	65,12	62,14	0,00034637	8,853930864
5	0,58	0,593611	46,51	45,57	0,0001853	0,876824151
6	0,59	0,59361	43,6	45,5736	0,00001	3,895140818
7	0,73	0,75944	75	74,741	0,00086698	0,067023457
8	0,47	0,4527	54,07	55,361	0,000297	1,666967901
9	0,58	0,55777	38,37	37,337	0,00049383	1,065482716

Розрахунок дисперсії адекватності для моделей за формулою (3.13), з урахуванням, що $f_{ад} = n - \frac{(k+2)(k+1)}{2}$:

$$\text{для рівняння (3.34)} \quad s_{адy}^2 = 0,00087$$

$$\text{для рівняння (3.35)} \quad s_{адz}^2 = 10,03;$$

Перевірка за критерієм Фішера:

$$F_y = 0,787 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59, F_z = 2,97 < F_{(0.05;3;4)} = 6,59$$

Отже за результатами перевірки встановлено, що функції (3.34) та (3.35) за критерієм Фішера адекватно описують процеси.

Із використання формули (3.3) та (3.19) рівняння (3.34) та (3.35) приводимо до натуральних змінних.

На рисунку 3.13 подано залежність витрату водного розчину піноутворювача КП від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни при гасінні лабораторного вогнища пожежі класу А.

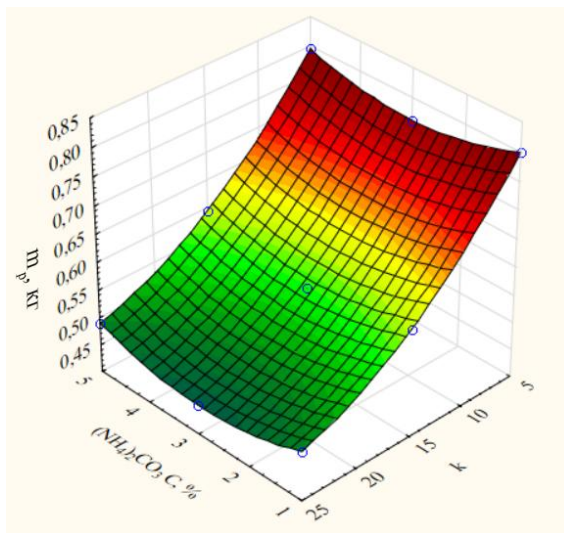


Рисунок 3.13 – Залежність витрати водного розчину піноутворювача при гасінні лабораторного вогнища пожежі від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни

При використанні у складі компресійної піни добавки $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ спостерігається подібний характер на витрати водного розчину піноутворювача, як і при використанні NH_4HPO_4 та $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. При кратності піни 25 та концентрації добавки 1 %, маса розчину піноутворювача, що було витрачено на гасіння становить 0,81 кг, що на 46 % більше за масу водного розчину ПУ витраченого на гасіння, при кратності піни 25 та концентрації добавки 3%. Це є також вже раніше підтвердженою залежністю, що підвищення кратності піни має прямий вплив на кількість повітря в розчині. А наявність низького вмісту добавки несуттєво впливає на витрати розчину.

Отримано рівняння регресії у натуральних значеннях за довірчої ймовірності 0,95, яке описує залежність (рівняння 3.36) витрати водного розчину піноутворювача при гасінні лабораторного вогнища пожежі класу А від кратності КП та концентрації МД $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$:

$$m_p = 0,98 - 0,0563 \cdot C - 0,03 \cdot k + 0,0092 \cdot C^2 + 0,0005 \cdot k^2 \quad (3.36)$$

На рисунку 3.14 подано залежність часу гасіння лабораторного вогнища пожежі класу А компресійною піною від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни.

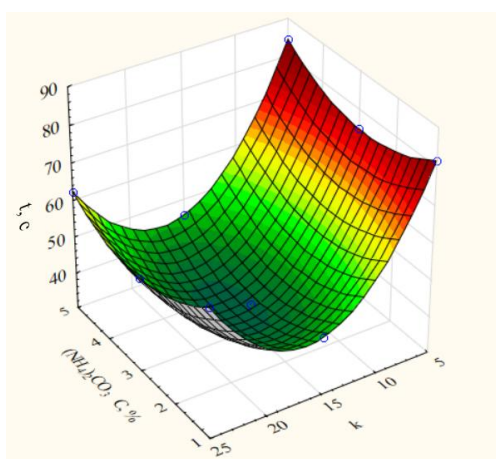


Рисунок 3.14 – Залежність часу гасіння модельного вогнища компресійною піною від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни

Добавка $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, як і у випадку з $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ разом із кратністю піни має позитивний синергетичний ефект щодо часу гасіння.

Найменший час гасіння встановлено при концентрації добавки приблизно 3 % і кратності піни в межах 20. При зазначених параметрах часу гасіння становить 38,3 секунди, що на 48 % менше у порівнянні з часом гасіння піною кратністю 5 із концентрацією добавки 1 %. Отже отримані результати також дають підстави стверджувати, що зміна концентрації модифікувальної добавки має позитивний вплив на вогнегасну здатність компресійної піни. Це пояснюється особливістю хімічного складу таких модифікувальних добавок. Отримано наступне рівняння регресії у натуральних значеннях за довірчої ймовірності 0,95, яке описує залежність (рівняння 3.37) часу гасіння лабораторного вогнища пожежі класу А від кратності КП та концентрації модифікувальної добавки $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$:

$$\tau = 129,48 - 1125 \cdot C - 9,06 \cdot k + 2,05 \cdot C^2 + 0,27 \cdot k^2 - 0,072 \cdot C \cdot k \quad (3.37)$$

3.2. Визначення та порівняння показників ефективності гасіння компресійної піною із модифікувальними добавками

Розрахунок показника ефективності гасіння за формулою (3.1) для компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ подано у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22 – Результати розрахунку показника ефективності гасіння для компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

N	K	C, %	Маса розчину m_p , кг	Час гасіння τ , с	$S_{\text{пож}}$, M^2	$P_{e.g}$, $\text{M}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$
1	5	1	0,68	70,1	0,32	6,713098934
2	5	5	0,6813	72,603		6,469266305
3	25	1	0,4213	55,943		13,57719887
4	25	5	0,3813	53,44		15,70423276

5	15	1	0,5113	39,19	15,96977959
6	15	5	0,5113	39,193	15,96842138
7	5	3	0,6513	64,273	7,644306227
8	25	3	0,3913	47,613	17,17558522
9	15	3	0,4813	32,113	20,70373639

На рисунку 3.15 подано поверхню відгуку залежності показника ефективності гасіння від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни.

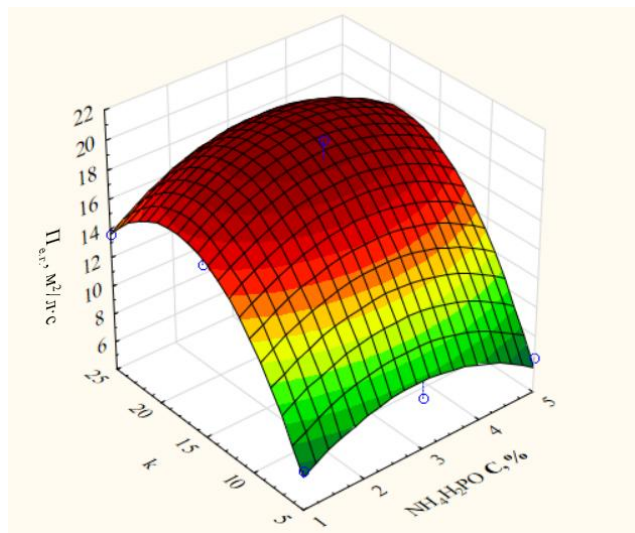


Рисунок 3.15 – Залежність показника ефективності гасіння компресійної піни від концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та кратності піни

Отримана поверхня відгуку свідчить про суттєву зміну показника ефективності гасіння в певних межах як кратності так і концентрації МД. Найвищий показник зафіксовано при кратності 15 та концентрації $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, який дорівнює $20,7 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Це на 68 % більше за найнижче значення показника ефективності гасіння $6,46 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, що було встановлено для піни кратністю 5 із концентрацією МД 5 %. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано формулою (3.38):

$$P_{e,2} = -6,63 + 3,87 \cdot C + 2,23 \cdot k - 0,69 \cdot C^2 - 0,063 \cdot k^2 + 0,0296 \cdot C \cdot k \quad (3.38)$$

Враховуючи отриману поверхню відгуку, наступним кроком було її

вивчення, та пошук умовного екстремуму. Отже, знаходимо похідні від функції (3.38):

При $y=\text{const}$:

$$\Pi'_{e.g.} = 0 + 3,8736 + 0 - 2 \cdot 0,6936x + 0,0296y - 0 \quad (3.39)$$

$$\Pi'_{e.g.} = 3,8736 - 1,3872x + 0,0296y \quad (3.40)$$

При $x=\text{const}$:

$$\Pi'_{e.g.} = 0 + 0 + 2,2383 - 0 + 2 \cdot 0,6936y + 0,0296x \quad (3.41)$$

$$\Pi'_{e.g.} = 2,2383 + 0,0296x - 0,1266y \quad (3.42)$$

Знаходимо стаціонарні точки, в яких похідна дорівнює нулю, або не існує. Для цього прирівнюємо рівняння (3.40) та (3.42) до нуля, записуємо у вигляді системи та виконуємо додавання компонентів системи:

$$\begin{cases} 3,8736 - 1,3872x + 0,0296y = 0 \\ 2,2383 + 0,0296x - 0,1266y = 0 \end{cases} \Rightarrow \Pi'_{e.g.} + \Pi'_{e.g.} \quad (3.43)$$

Отримуємо:

$$6,1119 - 1,3576x - 0,097y = 0 \quad (3.44)$$

З цього рівняння виражаємо x :

$$x = \frac{6,1119 - 0,097y}{1,3576} = 4,50199 - 0,0714y \quad (3.45)$$

Для знаходження числового значення y підставляємо виражений x (3.45) у рівняння (3.40):

$$\begin{aligned} 3,8736 - 1,3872 \cdot (4,50199 - 0,0714y) + 0,0296y &= 0 \\ 3,8736 - 6,2452 + 0,099y + 0,0296y &= 0 \\ 0,1286y - 2,3716 &= 0 \\ y &= 18,4417 \end{aligned}$$

Для знаходження x підставляємо значення y у рівняння (3.45):

$$\begin{aligned} x &= 4,50199 - 0,0714 \cdot 18,4417 = 4,500199 - 1,3167 \\ x &= 3,18529 \end{aligned}$$

Точка екстремуму: (3,18529;18,4417)

Отже при концентрації МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 3,18 % та кратності піни 18,44 встановлено точку екстремуму. При цьому значення показника ефективності гасіння становить $20,15 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$.

Розрахунок показника ефективності гасіння за формулою (3.1) для $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ подано у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23 – Результати розрахунку показника ефективності гасіння для компресійної піни із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

N	K	C, %	Маса розчину m_p , кг	Час гасіння t , с	$S_{\text{пож}}$, м^2	$\Pi_{\text{е.г}}$, $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$
1	5	1	0,72	74,3	0,32	5,981755645
2	5	5	0,7234	76,937		5,749293377
3	25	1	0,4434	59,297		12,16968801
4	25	5	0,4434	56,66		12,73616106
5	15	1	0,5418	41,28		14,3085405
6	15	5	0,5418	41,277		14,30968444
7	5	3	0,6918	68,116		6,791084236

8	25	3	0,4118	50,477		15,39590356
9	15	3	0,5101	33,776		18,57318732

На рисунку 3.16 подано поверхню відгуку залежності показника ефективності гасіння від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та кратності піни.

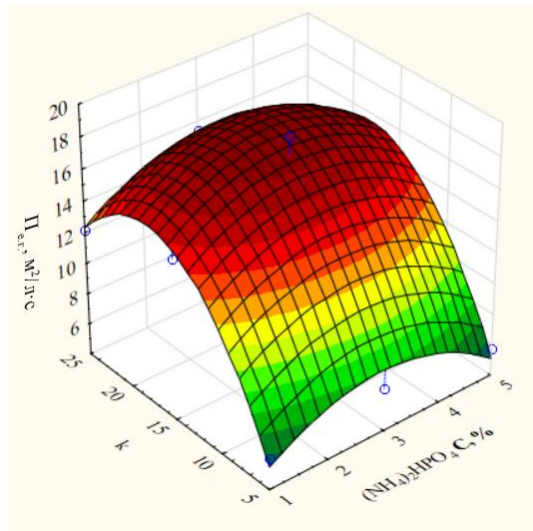


Рисунок 3.16 – Залежність показника ефективності гасіння компресійної піни від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та кратності піни

Суттєвий вплив як кратності так і концентрації на показник ефективності гасіння із МД $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ також спостерігається, як і для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Найвищий показник зафіксовано при кратності 15 та концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, який дорівнює $18,57 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Це на 69 % більше за найнижче значення показника ефективності гасіння $5,74 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, що також було встановлено для піни кратністю 5 із концентрацією МД 5 %. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано формулою:

$$P_{e2} = -6,97 + 3,94 \cdot C + 2,11 \cdot K - 0,67 \cdot C^2 - 0,059 \cdot K^2 + 0,021 \cdot C \cdot K \quad (3.46)$$

Подібні розрахунки, щодо пошуку умовного екстремуму за формулами (3.39-3.45), виконуємо для функції (3.46). Таким чином точка екстремуму: (3,0436;18,05695).

Отже при концентрації МД $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 3,04 % та кратності піни 18,09, встановлено точку екстремуму. При цьому значення показника ефективності гасіння становить $18,04 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$.

Розрахунок показника ефективності гасіння за формулою (3.1) для $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у таблиці 3.24.

Таблиця 3.24 – Результати розрахунку показника ефективності гасіння для компресійної піни із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$

N	K	C, %	Маса розчину m_p , кг	Час гасіння t , с	$S_{\text{пож}}$, м^2	$\Pi_{\text{е.г}}$, $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$
1	5	1	0,8	81,52	0,32	4,906771344
2	5	5	0,7953	84,429		4,765822385
3	25	1	0,4886	65,049		10,06800548
4	25	5	0,4886	62,14		10,53939034
5	15	1	0,5936	45,57		11,82957139
6	15	5	0,5936	45,574		11,82865687
7	5	3	0,7594	74,741		5,637643458
8	25	3	0,4527	55,361		12,76837289
9	15	3	0,5578	37,337		15,36580816

На рисунку 3.17 подано поверхню відгуку залежності показника ефективності гасіння від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни.

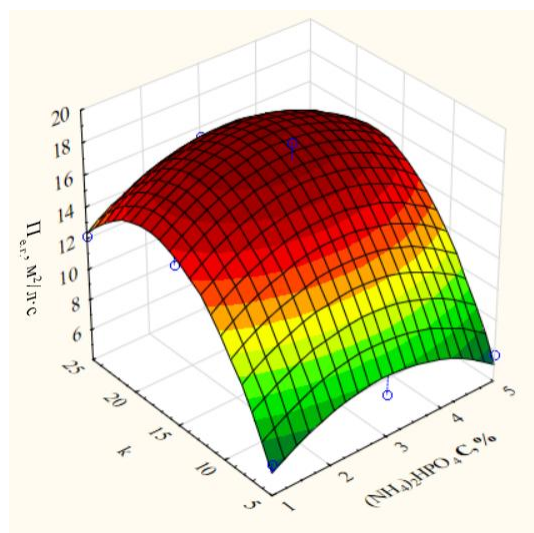


Рисунок 3.17 – Залежність показника ефективності гасіння компресійної піни від концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ та кратності піни

Аналізуючи поверхню відгуку залежності зміни показника ефективності гасіння від кратності піни і концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ характерний вплив є подібним як із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ так і з $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Найвищий показник зафіксовано при кратності 15 та концентрації $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, який дорівнює $15,36 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Це на 69 % більше за найнижче значення показника ефективності гасіння $4,9 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, що також було встановлено для піни кратністю 5 із концентрацією МД 5 %. Рівняння регресії, яке описує дану залежність подано формулою:

$$P_{e,z} = -5,84 + 3,3 \cdot C + 1,7 \cdot k - 0,56 \cdot C^2 - 0,004 \cdot k^2 + 0,0077 \cdot C \cdot k \quad (3.47)$$

Подібні розрахунки, щодо пошуку умовного екстремуму за формулами (3.39-3.45), виконуємо для функції (3.47). Таким чином точка екстремуму: Точка екстремуму: (3,0458;18,09756).

Отже при концентрації МД $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 3,04 % та кратності піни 18,09 встановлено точку екстремуму. При цьому значення показника ефективності гасіння становить $14,99 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$.

Наступним кроком є порівняння отриманих результатів вогнегасної ефективності компресійною піни із модифікувальними добавками між собою.

Отже, з урахуванням попередньо отриманих результатів було визначено наступне:

- для компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ найвищий показник ефективності складав $P_{e,r} = 20,15 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД $C \approx 3 \%$ та кратності піни $k \approx 18$;

- для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ найвищий показник ефективності складав $P_{e,r} = 18,04 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД $C \approx 3 \%$ та кратності піни $k \approx 18$;

- для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ найвищий показник ефективності складав $P_{e,r} = 14,99 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при

концентрації МД $C \approx 3\%$ та кратності піни $k \approx 18$;

Таким чином, на підставі результатів експериментальних досліджень та їх оцінки, найбільш ефективною є компресійна піна із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Отриманий показник ефективності гасіння на 11% більше відносно до КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та на 26% більший за показник КП із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Висновки за розділом 3

1. При визначенні вогнегасної ефективності компресійної піни із модифікувальними добавками у її складі було встановлено їх вплив на час гасіння лабораторного вогнища та витрату водного розчину піноутворювача. Для всіх добавок характерно несуттєве зменшення витрати водного розчину ПУ, при зміні концентрації МД від 1% до 5%. Наслідком підвищення кратності навпаки є суттєве зниження маси водного розчину піноутворювача, що витрачається на гасіння. Щодо часу гасіння, при збільшенні концентрації добавки в межах від 1 до 3% притаманне зниження часу гасіння, при подальшому підвищенні від 3% до 5% характерне підвищення часу гасіння. Також збільшення кратності піни має суттєвий вплив, зокрема при підвищенні від 5 до 20 спостерігається зниження часу гасіння, а при подальшому збільшенні до 25 відбувається збільшення часу.

2. Отже, за результати порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни із модифікувальними добавками між собою було визначено наступне: для компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ найвищий показник ефективності склав 20,15 $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3% та кратності піни 18; для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ найвищий показник ефективності склав 18,04 $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3% та кратності піни 18; для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ найвищий показник ефективності склав 14,99 $\text{м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3% та кратності піни 18. Таким чином, на підставі результатів експериментальних

досліджень та їх оцінки, найбільш ефективною є компресійна піна із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Отриманий показник ефективності гасіння на 11 % більше відносно до КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та на 26% більший за показник КП із $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Отже розвиток дослідження у подальшому полягає у порівнянні вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ у її складі із компресійною піною традиційного складу, водою та гелеутворюючими сполуками.

РОЗДІЛ 4. ПОРІВНЯННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ З МОДИФІКУВАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ З ІНШИМИ ВОДНИМИ ВОГНЕГАСНИМИ РЕЧОВИНАМИ

Об'єктом дослідження є вогнегасна ефективність водних вогнегасних речовин: компресійна піна із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, компресійна піна традиційного складу, вода та гелеутворювальний склад.

Гіпотезою дослідження є те, що компресійна піна із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ має більш ефективні вогнегасні властивості при гасінні пожеж класу А у порівнянні із компресійною піною традиційного складу, водою та гелеутворювальними складами.

Для утворення компресійної піни у роботі застосовувався ПУ загального призначення «Барс S» із концентрацією 6 % у водному розчині, відповідно до рекомендацій виробника. Було зроблене припущення, що піноутворювачі інших виробників будуть мати аналогічний вплив на вогнегасну ефективність, у тому числі із додаванням $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

Дослідний зразок системи генерування та подавання КП (рисунок 4.1, а), що використовувався під час досліджень, було розроблено в рамках [56] дослідно-конструкторської роботи УкрНДЦЗ, ДСНС України. Після розроблення дослідного зразку були проведені серії попередніх (приймальних) випробувань про що складені відповідні протоколи, які наведені у звіті про науково-дослідну роботу. Проведені попередні (приймальні) випробування дослідного зразка установки, виготовленого згідно креслень УНДЦЗ-200403 СП, підтвердили ефективність його застосування і відповідність вимогам технічного завдання на роботу.

Експериментальні дослідження проведено відповідно до ДСТУ EN 3-7:2014: температурно-кліматичні умови проведення досліджень відповідали вимогам стандарту та використовувалось стандартизоване модельне вогнище пожежі класу 1А (рисунок 4.1, б).



а)

б)

Рисунок 4.1 – Обладнання для порівняння вогнегасної ефективності водних вогнегасних речовин: а) система генерування та подавання компресійної піни; б) фото стандартизованого модельного вогнища класу 1А

Під час дослідження вимірювались наступні параметри:

- маса m_p води, водного розчину ПУ КП традиційного складу або водного розчину ПУ КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, що було витрачено на гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А;

- час гасіння t стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водою, КП традиційного складу або КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

Для порівняння результатів, що отримані під час гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водою, КП традиційного складу або КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ з результатами гасіння такого вогнища ГУС, використовувались відомі результати дослідження [111]. Було прийнято спрощення, що з урахуванням ідентичності умов проведення дослідження, для порівняння використані наступні параметри гасіння ГУС: час, витрачений на гасіння стандартизованого модельного вогнища 1А $t = 60$ с, а витрачена маса ГУС $m_p = 6,53$ кг.

При гасінні стандартизованого модельного вогнища КП із МД, КП традиційного складу та водою, тиск в системі генерування та подавання КП підтримувався сталим та дорівнював 6 бар. Інтенсивність подавання розчину ПУ КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, КП традиційного складу та води була однаковою.

КП із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ використовували із кратністю 18 та концентрацією $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 3 %, що зумовлено результатами [12], у яких підтверджено найбільшу ефективність піни саме з цією кратністю та концентрацією МД при гасінні лабораторного вогнища пожежі класу А.

КП традиційного складу використовували із кратністю 25, що зумовлено результатами [80], у яких підтверджено найбільшу ефективність піни саме з цією кратністю при гасінні стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А.

Маса водних вогнегасних речовин m_p витрачених на гасіння вогнища вимірювалась шляхом зважування ємності з вогнегасною речовиною до початку гасіння і після повної ліквідації полум'я. Час гасіння t вогнища вимірювався від початку направлення вогнегасного струменя у осередок пожежі, до моменту повного гасіння. Експериментальні дослідження проводилися у трикратному повторенні (три серії паралельних дослідів) для кожної вогнегасної речовини.

На рисунку 4.2 подано фото процесу гасіння стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А водними вогнегасними речовинами.



а)

б)

в)

Рисунок 4.2 – Фото проведення експерименту: а) процес гасіння водою; б) процес гасіння компресійною піною традиційного складу; в) процес гасіння компресійною піною із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

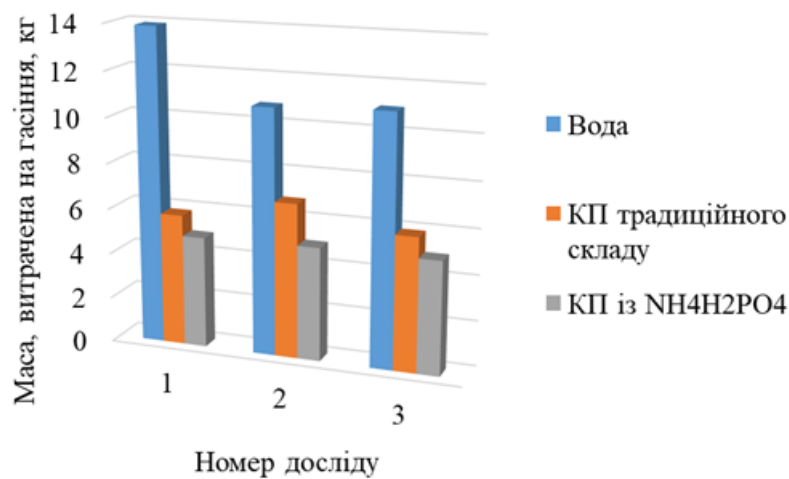
У таблиці 4.1 подано результати вимірювання m_p витраченого на гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водою/водним

розчином ПУ КП традиційного складу/ водним розчином ПУ КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, та тривалість гасіння t стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водою/ КП традиційного складу / КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,

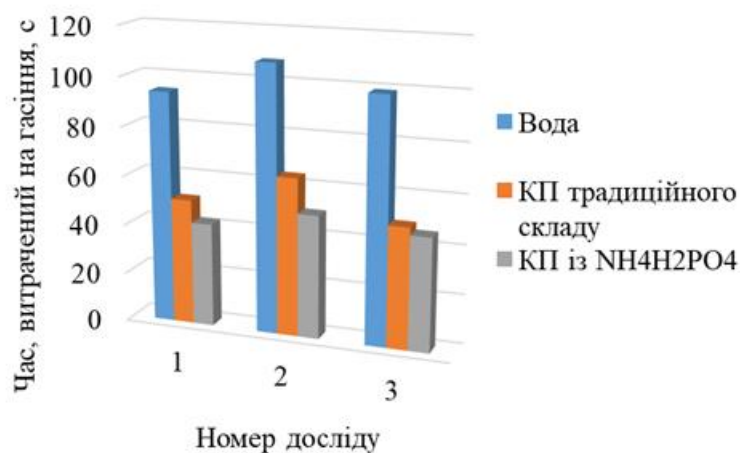
Таблиця 4.1 – Результати дослідів гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водними вогнегасними речовинами (вода, КП, КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)

Показник	$m_p, \text{кг}$				$t, \text{с}$			
	1	2	3	\bar{m}	1	2	3	\bar{t}
№ досліду	m_1	m_2	m_3		t_1	t_2	t_3	
КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,	5,6	6,2	5,6	5,8	48	55	44	49 с
КП традиційного складу	5,8	6,8	5,9	6,2	51	64	49	54 с
Вода	13,9	10,8	11	11,9	94	108	99	100 с

На рисунку 4.3 подано графічне зображення отриманих показників, з урахуванням яких проводилось гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А водними вогнегасними речовинами (вода, КП, КП традиційного складу, КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Графічне зображення отриманих показників: а) маса витрачена на гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А; б) час гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А

Із урахуванням отриманих експериментальних результатів, наступним кроком є визначення розрахункового значення показників ефективності гасіння КП із NH₄H₂PO₄, КП традиційного складу, води та ГУС.

Результати розрахунку $P_{e,z}$ за формулою (3.1) для КП із NH₄H₂PO₄, КП традиційного складу, води та ГУС подано відповідно у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку $P_{e,z}$ для водних вогнегасних речовин

Водна вогнегасна речовина	m_p , кг	t , с	S , м ²	$P_{e,z}$, м ² /(кг·с)
КП із МД	5,8	49 с	4,7	16,5
КП традиційного складу	6,2	54 с		14,03
ГУС	6,53	60 с		11,99
Вода	11,9	100 с		3,94

На рисунку 4.4 подано графічне зображення отриманого показника ефективності гасіння для КП із NH₄H₂PO₄, КП традиційного складу, води та ГУС.

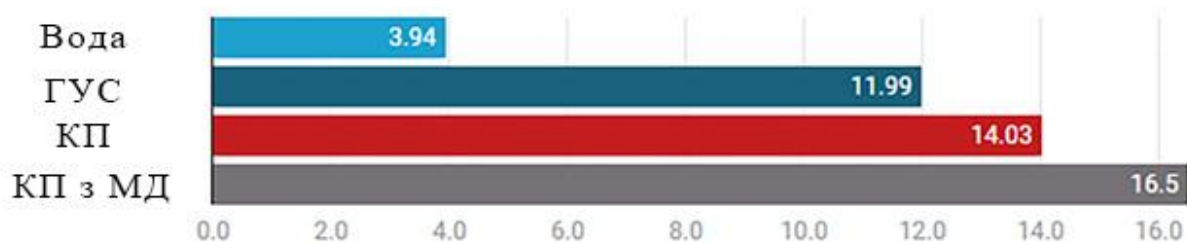


Рисунок 4.4 – Графічне зображення отриманого показника ефективності гасіння для водних вогнегасних речовин

Отже на підставі отриманих результатів було визначено значення показників ефективності гасіння для КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, КП традиційного складу, води та ГУС.

При аналізі отриманих результатів визначення та порівняння вогнегасної ефективності КП з МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ із КП традиційного складу, водою та ГУС при гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А встановлено наступне.

Результати (таблиця 4.1, рисунок 4.3) свідчать про те, що наявність МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ має позитивний вплив на час гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі класу 1А у складі КП. В рівних умовах, маса (рисунок 4.3, а), що була витрачена на гасіння вогнища КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ на 7 % менша за масу КП традиційного складу та 52 % менша за масу води. Різниця по масі між КП традиційного складу та КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ є несуттєвою. Щодо часу гасіння (рисунок 4.3, б), для компресійної піни із МД $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ зафіксований час на 10 % менший за час, необхідний для гасіння вогнища КП традиційного складу, та на 51 % менший за час гасіння водою.

Результати (таблиця 4.2, рисунок 4.4), отримані на підставі експериментальних та довідникових, даних демонструють перевагу КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ над КП традиційного складу, водою та ГУС. В однакових умовах найбільша вогнегасна ефективність за оціненим показником зафіксована для саме для КП із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, яка є вищою на 15 % порівняно з КП традиційного складу, на 28 % — порівняно з ГУС, та на 77 % — порівняно з водою.

Такі результати можуть бути пояснені саме наявністю у складі КП МД у вигляді моноамоній фосфату, який підсилює реалізацію комплексу вогнегасних ефектів: флегматизації (розведення), ізолювання та інгібування. Флегматизація (розведення) горючого газового середовища досягається насиченням аміаком зі складу моноамоній фосфату в процесі його термічного розкладання. Ефект ізолювання підсилюється модифікуванням звугленого шару поверхні твердих горючих матеріалів фосфоровмісними сполуками за рахунок формування теплоізоляційного шару з підвищеною температурою займання (самозаймання). Азотовмісні та фосфоровмісні сполуки (іон-молекулярні та іон-радикальні комплекси) з продуктів розкладу моноамоній фосфату синергетично пригнічують активність (інгібують) ОН-радикали ланцюгових реакцій горіння ТГМ. Як обмеження проведеного дослідження слід зазначити, що порівняння не проведено з іншими водними вогнегасними речовинами, зокрема зі змочувачами із різними типами поверхнево-активних речовин, термоактивованою та тонкорозпиленою водою. Також результатам стосовно вогнегасної ефективності гелеутворюючого складу вже 14 років і сьогодні є інші склади, які не були враховані в дослідженні.

Недолік даного дослідження полягає у використанні одного типу піноутворювача, а саме «Барс-S». При використанні інших піноутворювачів вогнегасна ефективність компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ може змінюватись.

Висновки за розділом 4

Експериментальним шляхом оцінено кількісний показник вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, компресійної піни традиційного складу та води при гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А. При використанні всіх зазначених вогнегасних засобів спостерігалось успішна ліквідація горіння. Проте найнижчий час та витрачена маса на гасіння були встановлені саме для

компресійної піни з $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Маса що була витрачена на гасіння вогнища компресійною піною із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ на 7 % менша за масу компресійної піни традиційного складу та 52 % менша за масу води. Для компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ зафіксований час гасіння на 10 % менший за час, необхідний для гасіння вогнища компресійною піною традиційного складу, та на 51 % менший за час гасіння водою. Розраховано та порівняно показники ефективності гасіння компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, компресійної піни традиційного складу, гелеутворювального складу та води між собою. У результаті показник ефективності гасіння для компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ становить $16,5 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для піни традиційного складу $14,03 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для гелеутворювального складу $11,9 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для води $3,94 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Отримані результати підкреслюють, що застосування МД у складі КП, зокрема $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, підвищує її вогнегасні властивості, при гасінні пожеж класу А. Доведено, що вогнегасна ефективність КП зі вмістом МД на 15% вище відносно до КП традиційного складу. Порівняно з ГУС ефективність вища на 28 % , а порівняно з водою – на 77 %.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ІЗ МОДИФІКУВАЛЬНОЮ ДОБАВКОЮ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

5.1. Економічне обґрунтування доцільності застосування компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ при гасінні пожеж класу А

Отже, головним недоліком гасіння пожеж у житловому секторі водою є низький коефіцієнт її використання, а саме близько 5–10 %. Решта поданого об'єму вогнегасної речовини не бере участі в процесі пожежогасіння, а вільно стікає під дією гравітації, що призводить до значних побічних збитків від надмірного проливу. Основні збитки від застосування води при гасінні пожеж подано на рисунку 5.1.

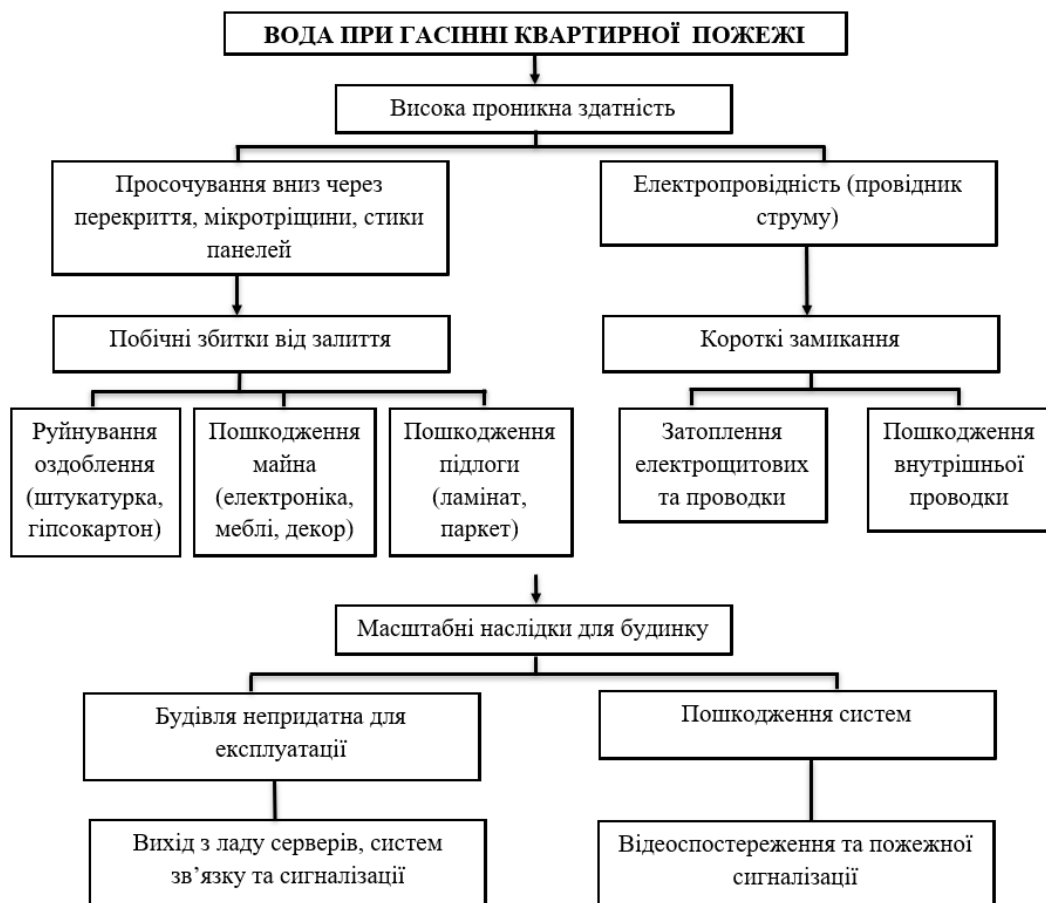


Рисунок 5.1 – Основні збитки від застосування води при гасінні пожеж

Оскільки вода має високу проникну здатність, при гасінні квартири на верхніх поверхах значна кількість води просочується крізь міжповерхові перекриття, мікротріщини та стики панелей. Це спричиняє руйнування оздоблення, а саме відшарування штукатурки, здуття гіпсокартону, пошкодження підлогових покриттів (ламінат, паркет) у квартирах на 2–3 поверхи нижче. Побічні збитки від залиття водою додатково включають пошкодження побутової електроніки, м'яких меблів та декору.

Враховуючи, що вода є провідником електричного струму, надмірний пролив також може привести до коротких замикань, затоплення електрощитових, внутрішньої проводки, що робить будівлю непридатною для експлуатації навіть після ліквідації вогню. Не виключається пошкодження систем зв'язку, вихід з ладу серверного обладнання, систем відеоспостереження та сигналізації.

Таким чином, у сучасних умовах побічні економічні збитки при гасінні водою стають критичними, оскільки ремонт після залиття кількох поверхів та заміна пошкодженого майна можуть обійтися дорожче, ніж відновлення приміщення безпосередньо після вогню. Це робить гасіння водою економічно неефективним методом для житлового сектора.

Це проблема може бути вирішена шляхом застосування компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Така піна завдяки своїй структурі та адгезійній властивості (рисунок 5.2) мінімізує пролив і дозволяє уникнути масштабних фінансових втрат



а)



б)

Рисунок 5.2 – Результати гасіння пожежі у квартирі: а) компресійною піною, в тому числі із МД; б) водою

Отже проведемо розрахунок зниження величини вторинного збитку при застосуванні компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

Економічна доцільність розробленого складу обґрунтовується через порівняння величини вторинних збитків $Z_{\text{втор}}$ що виникають внаслідок дії вогнегасної речовини на оздоблення та майно в житловому секторі.

Вторинний збиток від проливу для конкретного об'єкта розраховується за формулою:

$$Z_{\text{втор}} = V_{\text{надл}} \cdot P_3 \quad (5.1)$$

де:

$V_{\text{надл}}$ - об'єм надлишкової вогнегасної речовини (води або водного розчину піноутворювача компресійної піни), що не випарувався в процесі гасіння і пролився на конструкції та майно, л;

P_3 -питомий показник збитків на 1 літр пролитої речовини (вартість зіпсованого майна, ремонту та прибирання), грн/л.

Об'єм проливу залежить від коефіцієнта використання речовини ($k_{\text{вик}}$):

$$V_{\text{надл}} = V_{\text{заг}} \cdot (1 - k_{\text{вик}}) \quad (5.2)$$

Припустимо, що об'єм води, який буде використаний для гасіння певної площі пожежі в квартирі становить $V_{\text{заг}} = 200$ л. Коефіцієнт використання для води становить $k_{\text{вик}} = 0,05$ (95 % йде в пролив). Отже наприклад при загальній витраті $V_{\text{заг}} = 200$ л, надлишковий пролив буде становить $V_{\text{надл. води}} = 190$ л.

Спираючись на отримані експериментальним шляхом показники ефективності гасіння (розділ 4.1), для води та для компресійної піни із МД, було встановлено, що розроблена піна в 4,2 раза ефективніша за воду в

кожну секунду подавання. Якщо пожежний подає воду протягом 3-х хвилин (через її низьку здатність охолоджувати дерев'яні конструкції всередині штабеля чи меблів), то піна з добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ виконує ту саму роботу за 40-50 секунд. Тому припустимо, що об'єм водного розчину піноутворювача, який буде використаний для гасіння певної площі пожежі в квартирі, в 4,2 рази менший за воду та становить $V_{\text{заг}} = 47.5$ л.

Враховуючи властивості адгезії, стійкості та проникаючої здатності компресійної піни, в тому числі із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ коефіцієнт використання становить $k_{\text{вик}} = 0,95$. Отже наприклад при загальній витраті $V_{\text{заг}} = 47,5$ л, надлишковий пролив буде становить $V_{\text{надл. води}} = 2,375$ л.

Приймаємо середній питомий показник збитків від залиття (вартість ремонту, техніки та меблів на 1 літр води) $\Pi_3 = 2500$ грн/л.

Використовуючи формулу (5.1) вторинний збиток від води:

$$Z_{\text{втор}} = 190 \text{ л} \cdot 2500 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 475000 \text{ грн}$$

Використовуючи формулу (5.1) вторинний збиток від піни із МД:

$$Z_{\text{втор}} = 2,375 \text{ л} \cdot 2500 \frac{\text{грн}}{\text{л}} = 5938 \text{ грн}$$

Таким чином різниця у вартості побічних збитків становить:

$$\Delta Z_{\text{втор}} = 475000 - 5938 = 469062 \text{ грн}$$

Проведений порівняльний розрахунок на основі експериментальних показників підкреслює, що застосування КП із МД дозволяє зменшити об'єм вторинного проливу в 80 разів (з 190 л до 2,375 л). Сумарний економічний ефект за рахунок зниження побічних збитків складає близько 470 тис. грн на одну пожежу. Слід зазначити, що попри високу капітальну вартість

обладнання для генерування компресійної піни (систем CAFS) та витрати на придбання модифікувальних добавок впровадження даної технології є стратегічно доцільним у довгостроковій перспективі.

Необхідно враховувати, що початку будуть капітальні витрати, що пов'язані із вартістю переоснащення пожежного автомобіля системою подачі КП та закупівля піноутворювача із модифікувальними добавками.

Враховуючи отриманий показник зниження вторинного збитку (понад 450 тис. грн на одну пожежу в житловому секторі), витрати на обладнання нівелюються вже після ліквідації декількох резонансних пожеж у багатоповерхових будівлях.

Розрахунковий період повної окупаності впровадження технології КП із модифікувальними добавками для одного оперативного підрозділу становить близько 5 років. Після цього терміну кожен виїзд на гасіння пожеж класу А приносить чистий економічний ефект за рахунок збереження майна громадян та інфраструктури будівлі. Зведені результати економічного розрахунку доцільності застосування компресійної піни з модифікувальними добавками наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати економічного розрахунку доцільності застосування компресійної піни з МД

Параметр розрахунку	Гасіння водою	Компресійна піна з МД (NH ₄ H ₂ PO ₄)
Коефіцієнт використання речовини (k _{вик})	0,05 (5%)	0,95 (95%)
Об'єм надлишкового проливу (V _{надл})	190 л	2,375 л
Питомий показник збитків (П _з)	2500 грн/л	2500 грн/л
Величина вторинного збитку (З _{втор})	475 000 грн	5 938 грн
Економічний ефект на 1 пожежу	—	+469 062 грн
Капітальні витрати	—	Переоснащення пожежного авто системою CAFS та закупівля МД

Швидкість окупності	—	Витрати на обладнання нівелюються вже після ліквідації декількох резонансних пожеж.
Термін окупності	—	Повний період окупності для одного підрозділу становить 5 років.

Перехід від гасіння водою до використання компресійної піни із МД є переходом від кількісного до якісного методу захисту. В перспективі це дозволяє не лише скоротити прямі втрати від вогню, а й значно зменшити витрати на відновлення об'єктів після пожежі.

5.2. Розробка рекомендацій із застосування компресійної піни із модифікувальними добавками для гасіння пожеж класу А

Застосування компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ рекомендується для ліквідації пожеж класу А (горіння твердих горючих матеріалів). Така піна дозволить мінімізувати вторинні збитки від проливу води та підвищити швидкість локалізації та ліквідації пожежі зокрема у:

- житловому секторі при гасінні квартир у багатоповерхівках, де надлишок води призводить до затоплення нижніх поверхів;
- у місцях з обмеженим водопостачанням завдяки зменшенню маси вогнегасної речовини порівняно з водою, яка необхідна для гасіння. Це дозволить працювати від автоцистерн без встановлення її на вододжерело;
- закладах освіти, охорони здоров'я та соціальної сфери де використання мінімальної кількості вогнегасної речовини дозволяє зберегти дорогу медичну апаратуру, комп'ютерну техніку та інтер'єри приміщень, забезпечуючи швидке відновлення функціонування закладу після пожежі;
- в умовах розвинутих пожеж у підвальних та цокольних приміщеннях де традиційне гасіння водою часто призводить до небезпечного накопичення

великої маси рідини, що створює критичне навантаження на перекриття та фундамент будівлі;

- гасінні пожеж на об'єктах культурної спадщини та музеях де пріоритетом є не лише ліквідація вогню, а й запобігання руйнуванню об'єктів мистецтва від дії надмірної вологи.

На основі результатів експериментальних досліджень (розділ 3), найбільш ефективний склад компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ було визначено наступний:

- концентрація $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ – 3 %;
- кратність компресійної піни в межах – $K = 18$;
- робочий тиск для генерування піни – $P = 6$ бар.

Для забезпечення стабільних властивостей КП з МД рекомендується наступна послідовність:

- розчинення МД – добавку $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ слід розчиняти у воді до введення піноутворювача. Це дозволяє уникнути передчасного руйнування піни через взаємодію солей з ПАР;

- дозування піноутворювача – використовувати піноутворювачі загального призначення згідно з регламентованою концентрацією від виробника;

- генерування піни в установці – подавання стисненого повітря забезпечувати із витримуванням пропорції 1:18 (водний розчин піноутворювача /повітря);

Щодо тактики гасіння пожеж компресійною піною з МД - використання піни з МД змінює підхід до роботи зі стволом:

- спосіб нанесення – завдяки ефекту «прилипання» піну слід наносити безпосередньо на поверхню горючого матеріалу. Створюється в'язка плівка метафосфорної кислоти, яка блокує доступ кисню.

- обробка вертикальних поверхонь – рекомендується покривати стіни та меблі шаром піни товщиною 1-2 см. Це створює тепловий бар'єр та інгібує дегідратацію целюлози.

- час гасіння при використанні піни з МД скорочується приблизно у 2 рази у порівнянні з водою. Ствольщику слід уникати надмірного подавання, оскільки ліквідація відбувається за рахунок інгібування, а не тільки охолодження.

Після використання компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ обов'язковою є промивка системи чистою водою, щоб запобігти корозії металевих частин через залишки солей.

Особовий склад повинен працювати в апаратах захисту органів дихання, оскільки при термічному розкладанні $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (при температурі понад $200\text{ }^\circ\text{C}$) виділяється аміак NH_3 , який розбавляє горючі гази, але є токсичним у високих концентраціях.

Модифікувальну добавку слід зберігати у вологозахищених умовах для уникнення злежування.

Висновки до розділу 5

1. Економічне обґрунтування застосування компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ доводить високу ефективність даного методу у порівнянні з традиційним гасінням водою. Встановлено, що ключовим фактором фінансової доцільності є підвищення коефіцієнта використання вогнегасної речовини до 95 %, що дозволяє практично нівелювати надлишковий пролив. Розрахунки підтверджують можливість зниження вторинних збитків у 80 разів — з 475 000 грн до 5 938 грн на одну умовну пожежу в житловому секторі. Попри капітальні витрати на впровадження систем CAFS та закупівлю добавок, прямий економічний ефект у розмірі 469 062 грн забезпечує швидку амортизацію обладнання. Прогнозований термін повної окупаності для одного оперативного підрозділу становить близько 5 років, після чого технологія забезпечуватиме чистий економічний ефект (заощадження державних та приватних коштів) за рахунок збереження майна та інфраструктури. Таким чином, перехід на

компресійну піну з МД є економічно обґрунтованим рішенням, що мінімізує сумарні витрати на ліквідацію пожеж.

2. Розроблені рекомендації визначають чіткий регламент застосування компресійної піни з 3% модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, що забезпечує максимальну вогнегасну ефективність при гасінні пожеж класу А. Окреслені вимоги до експлуатації систем САФС гарантують довговічність технічних засобів і безпеку особового складу. Таким чином, дані рекомендації слугують практичним посібником для переходу підрозділів ДСНС на сучасні енерго- та ресурсозберігаючі технології пожежогасіння, що гарантують високий рівень збереження майна та інфраструктури.

На цьому дослідження з вивчення питання, присвяченого компресійній піні із модифікувальними добавкам у її складі та застосування для гасіння пожеж класу А в визначених межах вважається завершеним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз водних вогнегасних речовин та способів підвищення їх ефективності. Встановлено, що деяким водним вогнегасним речовинам притаманні властивості комплексної вогнегасної дії, але переважна більшість водних вогнегасних речовин є дослідними зразками та не отримали широкого впровадження на практиці, що зумовлено складністю, яка полягає у технології застосування та економічною не вигідністю. На сьогодні вода залишається найбільш поширеною вогнегасною речовиною для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів. Альтернативним засобом є компресійна піни, яка має низку переваг у порівнянні з іншими водними вогнегасними речовинами, зокрема над водою. Недоліком вогнегасної властивості компресійної піни є дія лише за двома механізмами припинення горіння. Ця проблема може бути вирішена шляхом додавання до її складу модифікувальних добавок. Проведено аналіз наукових публікацій, присвячених використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності. Виявлено, що переважна кількість досліджень спрямована на вивчення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні легкозаймистих рідин. У свою чергу є дослідження спрямовані на вивчення вогнегасних властивостей компресійної піни, зокрема з різною концентрацією та типами піноутворювачів, та газорідним складом при гасінні пожеж твердих горючих матеріалів. На сьогодні відсутні дослідження спрямовані на підвищення ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікувальних добавок. Проведено аналіз фізико-хімічних властивостей модифікувальних добавок та особливостей вогнегасної дії. За результатами аналізу виділено чотири типи модифікувальних добавок, в залежності від механізму впливу на процес горіння твердих горючих матеріалів. Проаналізовано експериментальні дослідження, щодо вивчення вогнегасної ефективності водних речовин у складі яких є модифікувальні добавки. Найбільше поширення набули

фосфати та карбонати амонію, хлориди та карбонати калію. Враховуючи результати отримані авторами та хімічні властивості модифікуючих добавок, для застосування у складі компресійної піни обрано наступні: гідрофосфат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$, дигідроортофосфат амонію $(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$, карбонат амонію $((\text{NH}_4)_2\text{CO}_3)$, карбонат калію (K_2CO_3) ; хлорид калію (KCl) .

2. Досліджено вплив модифікувальних добавок на властивості компресійної піни. Запропоновано систему компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють. Попередньо розроблено пневмогідрравлічну схему, що використовувалась як підґрунтя для врахування особливостей фізичних процесів, які відбуваються під час генерування піни у зразку, що виготовлявся. На підставі результатів математичного моделювання визначено необхідні технічні параметри системи, які задовольняють вимоги, що висувались до дослідного зразка. Виготовлена система має наступні параметри: кратність – 4-25; робочий тиск системи – 4-8 бар; плавне регулювання витрат водного розчину / піноутворювача – 2-20 л/хв; плавне регулювання витрат газової фракції – 8-450 л/хв. Зокрема передбачено можливість регулювання витрат водного розчину піноутворювача та повітря, роботу в залежному та автономному режимі, регулювання інтенсивності подавання піни за допомогою сопел різних діаметрів, регулювання порозності пористого тіла у піногенераторі. Розроблено систему вимірювання витрати водного розчину та повітря, яка являє собою апаратно-програмний комплекс. Система дає змогу зберігати результати вимірювань на ПК у вигляді таблиці Excel для подальшої побудови залежностей та одночасно в режимі реального часу виводити на екран дисплея та на ПК витрату водного розчину піно-утворювача та повітря. Експериментальним шляхом визначено властивості компресійної піни (стійкість та кратність) із модифікувальними добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, K_2CO_3 , KCl у складі водного розчину піноутворювача із концентрацією в межах від 1 % до 5 %. Визначено, що наявність добавок

$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) у визначених межах не мають негативного впливу на кратність компресійної піни. При застосуванні (K_2CO_3) (KCl) із концентрацією в межах від 1 % до 5 % піну отримати не вдалося. Визначено кількісні показники стійкості компресійної піни із добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі водного розчину піноутворювача. Порівняно властивості компресійної піни із модифікувальними добавками $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$) із їх концентрацією у водному розчині піноутворювача в межах від 1 % до 5 % між собою та з компресійною піною традиційного складу. Визначено, що наявність зазначених добавок в складі компресійної піни не впливає на її кратність. Щодо стійкості піни, найвищий зафіксований показник стійкості має піна зі вмістом $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (5,45 хв), для піни зі вмістом $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ стійкість нижча на 8 %, а для піни з $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ стійкість нижча на 20 %. Порівнюючи стійкість піни з модифікувальними добавками з піною традиційного складу встановлено, що наявність модифікувальних добавок $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ у складі компресійної піни знижує її показник стійкості на 17 %, 23 % та 33 % відповідно.

3. Досліджено вплив модифікувальних добавок на вогнегасні властивості компресійної піни. При визначенні вогнегасної ефективності компресійної піни із модифікувальними добавками у її складі було встановлено їх вплив на час гасіння лабораторного вогнища, та витрату водного розчину піноутворювача. Для всіх добавок характерно несуттєве зменшення витрати водного розчину ПУ, при зміні концентрації МД від 1 % до 5 %. Наслідком підвищення кратності навпаки є суттєве зниження маси водного розчину піноутворювача, що витрачається на гасіння. Щодо часу гасіння, при збільшенні концентрації добавки в межах від 1 до 3 % притаманне зниження часу гасіння, при подальшому підвищенні від 3 % до 5 % характерне підвищення часу гасіння. Також збільшення кратності піна має суттєвий вплив, зокрема при підвищенні від 5 до 20 спостерігається зниження часу гасіння, а при подальшому збільшенні до 25 відбувається

збільшення часу. Отже, за результати порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни із модифікувальними добавками між собою було визначено наступне: для компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ найвищий показник ефективності складав $20,15 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3 % та кратності піни 18; для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ найвищий показник ефективності складав $18,04 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3 % та кратності піни 18; для компресійної піни із модифікувальною добавкою $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ найвищий показник ефективності складав $14,99 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, при концентрації МД 3 % та кратності піни 18. Таким чином, на підставі результатів експериментальних досліджень та їх оцінки, найбільш ефективною є компресійна піна із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Отриманий показник ефективності гасіння є вищим на 11 % порівняно до КП із $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ та на 26 % - порівняно з показником КП зі вмістом $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

4. Порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни з іншими водними вогнегасними речовинами. Експериментальним шляхом оцінено кількісний показник вогнегасної ефективності компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, компресійної піни традиційного складу та води при гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу 1А. При використанні всіх зазначених вогнегасних засобів спостерігалось успішна ліквідація горіння. Проте найнижчий час та витрачена маса на гасіння були встановлені саме для компресійної піни з $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Маса що була витрачена на гасіння вогнища компресійною піною із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ на 7 % менша за масу компресійної піни традиційного складу та 52% менша за масу води. Для компресійної піни із $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ зафіксований час гасіння на 10 % менший за час, необхідний для гасіння вогнища компресійною піною традиційного складу, та на 51 % менший за час гасіння водою. Розраховано та порівняно показники ефективності гасіння компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, компресійної піни традиційного складу, гелеутворювального складу та води між собою. У

результаті показник для компресійної піни з модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ становить $16,5 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для піни традиційного складу $14,03 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для гелеутворювального складу $11,9 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$, для води $3,94 \text{ м}^2/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Отримані результати підкреслюють, що застосування МД у складі КП, зокрема $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, підвищує її вогнегасні властивості, при гасінні пожеж класу А. Доведено, що вогнегасна ефективність КП зі вмістом МД на 15 % вище відносно до КП традиційного складу. Порівняно з ГУС ефективність вища на 28 % , а порівняно з водою – на 77 %.

5. Економічно обґрунтовано та розроблено рекомендації із застосування компресійної піни із модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. У результаті доведено високу економічну та практичну доцільність застосування компресійної піни з 3 % модифікувальною добавкою $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ для ліквідації пожеж класу А. Встановлено, що ключовим фактором фінансової ефективності є підвищення коефіцієнта використання речовини до 95 %, що дозволяє знизити вторинні збитки від проливу у 80 разів та забезпечити економічний ефект у розмірі понад 469 тис. грн на одну пожежу. Попри початкові капітальні витрати на впровадження систем CAFS, розрахунковий період окупності для одного оперативного підрозділу становить близько 5 років, що підтверджує стратегічну доцільність методу. Запропоновані тактичні рекомендації та порядок обслуговування обладнання дозволяють оптимізувати процес пожежогасіння та мінімізувати збитки від проливу води. Такий підхід забезпечує раціональне використання ресурсів та зменшує загальні витрати на ліквідацію наслідків пожеж у житловому секторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз способів підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. Комунальне господарство міст : науково-технічний збірник. 2023. Т. 1, № 175. С. 151–159. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-151-159>
2. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Компресійна піна як альтернатива водоемульсійним та водопінним засобам пожежогасіння. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 79-81. URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18351/1/%D0%9A%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%90%20%D0%9F%D0%86%D0%9D%D0%90%20%D0%AF%D0%9A%20%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%A2%D0%95%D0%A0%D0%9D%D0%90%D0%A2%D0%98%D0%92%D0%90%20%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%95%D0%9C%D0%A3%D0%9B%D0%AC%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%98%D0%9C.pdf>
3. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Холодько В.М. Шляхи підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту»*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 191. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18350>
4. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз досвіду використання модифікувальних добавок та їх фізико-хімічних властивостей для подальшого застосування у складі компресійної піни. Пожежна безпека. 2023. Т. 42. С. 85-95. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.10>
5. Грищенко Д.В., Виноградов С.А. Щодо застосування модифікованих

добавок у складі компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація. Матеріали круглого столу (вебінару)*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 88 – 89. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17232>

6. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз фізико-хімічних властивостей модифікованих добавок та механізм їх вогнегасної дії. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій - 2023» («Problems of Emergency Situations – 2023»)*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 346-347. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17657>.

7. Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Шахов С.М., Грищенко Д.В. Розробка дослідного зразка системи генерування та подавання компресійної піни. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 4. №185. С. 172–177. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-172-177>

8. Спосіб утворення компресійної піни : пат. 156347 Україна : МПК А62D 1/02 (2006.01). № u202304736 ; заяв. 09.10.2023 ; опубл. 12.06.2024, Бюл. № 24. 4 с.

9. Грищенко Д.В. Розробка лабораторного зразку системи для дослідження впливу модифікувальних добавок на ефективність компресійної піни. *Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням»*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 127-128. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18686/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D1%96%D0%BB_%D0%A1%D0%A5%D0%A5%D0%A2%20%28pdf.io%29.pdf

10. Shakhov S., Vynohradov S., Kodryk A., Titenko O., Melnychenko A., Hryshchenko D., Grinchenko E., Knaub L. Influence of modified additives on the properties of compressed air foam. *Eastern-European Journal of Enterprise*

Technologies. 2024. Vol. 4. No. 6(130). P. 38-48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310371>

11. Грищенко Д.В., Виноградов С.А. Результати експериментального визначення властивостей компресійної піни із модифікованими добавками. Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням». м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 51-54. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22378/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%20%D0%9E%D0%A0%D0%A1%20%D0%92%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2.pdf>

12. Shakhov S., Vynohradov S., Hryshchenko D., Savchenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Shevchuk V., Dominik A. Determining the effect of modified additives on the fire-extinguishing properties of compressed air foam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2. No. 10(134). P. 44-52. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325930>

13. Shakhov S., Vynohradov S., Hryshchenko D., Melnychenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Pinder V., Pavlyuk Y. Determining the fire extinguishing efficiency of compressed air foam with modified additive $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 6. No. 10(138). P. 32-38. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.345244>

14. Пожежна безпека. Терміни та визначення понять : ДСТУ 2227:2006. [Чинний від 2007-10-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 32 с.

15. Вогнегасні речовини : посібник / А.В. Антонов, В.О. Боровіков, В.П. Орел, В.М. Жартовський, В.В. Ковалишин. Київ : Пожінформтехніка, 2004. 176 с.

16. Антонов А.В. Припинення : звіт про НДР (заключ.) : ч. 1 / викон.: А.В. Антонов [та ін.]. Київ, 2014.

17. Лісняк А.А., Бородич П.Ю. Підвищення ефективності гасіння пожеж твердих горючих матеріалів в будівлях. Проблеми пожежної безпеки: збірка наукових праць. 2013. Вип. 34. С. 115–119.

18. Харченко І.О., Бегун В.В., Денисова О.О. Аспекти застосування ризико-орієнтованого підходу до оцінювання ймовірності виникнення пожежі. Науковий вісник УкрНДПБ. 2005. № 1. С. 43–51.

19. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі : навч. посіб. Харків : НУЦЗУ, 2004. 252 с.

20. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки : навч. посіб. Харків : УЦЗУ, 2006. 395 с.

21. Абрамов Ю.О., Кіреєв О.О. Гелеутворювальні вогнегасні та вогнезахисні засоби підвищеної ефективності стосовно пожеж класу А : монографія. Харків : НУЦЗУ, 2015. 254 с.

22. Абрамов Ю.О., Кіреєв О.О. Гелеутворювальні вогнегасні та вогнезахисні засоби підвищеної ефективності стосовно пожеж класу А : монографія. Харків : НУЦЗУ, 2015. 254 с.

23. Бабенко О.В. Використання явища гелеутворення для підвищення ефективності рідинних засобів пожежогасіння : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 / Академія цивільного захисту України. Харків, 2004. 225 арк.

24. Балло Я.В. Підвищення ефективності роботи внутрішнього протипожежного водопроводу додаванням до води рідкого натрієвого скла. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : науково-практичний збірник. 2015. Вип. 25. С. 29–36.

25. Дадашов І.Ф., Кіреєв О.О., Шаршанов А.Я. Експериментальне дослідження впливу характеристик гелеподібного шару на його ізолювальні властивості стосовно парів токсичних та горючих рідин. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2017. № 26. С. 43–48. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/6237>.

26. Дадашов І.Ф., Кіреєв О.О., Шаршанов А.Я., Чернуха О.А. Моделювання ізолювальних властивостей гелеподібного шару стосовно парів горючих рідин. Проблеми пожежної безпеки. 2016. Вип. 40. С. 78–83.
27. Савченко О.В., Островерх О.О., Ковалевська Т.М., Волков С.В. Дослідження часу займання зразків ДСП, оброблених гелеутворювальною системою $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,95 \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$. Проблеми пожежної безпеки. Харків. 2011. № 30. С. 209–215.
28. Савченко О.В., Островерх О.О., Семків О.М., Волков С.В. Використання гелеутворювальних систем для оперативного захисту конструкцій та матеріалів при гасінні пожеж. Проблеми пожежної безпеки. Харків. 2012. № 32. С. 180–188.
29. Савченко О.В., Кіреєв О.О., Островерх О.О., Холодний О.С. Визначення показника корозійної активності гелеутворювальної системи $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,95 \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ на сталеві елементи резервуарів для нафтопродуктів. Проблеми пожежної безпеки. 2014. № 36. С. 199–207.
30. Савченко О.В. Результати натурального випробування оптимізованого кількісного складу гелеутворювальної системи у типових умовах пожежі житлового сектору. Проблеми пожежної безпеки : зб. наук. пр. УЦЗ України. Харків : УЦЗУ, 2009. Вип. 26. С. 121–125.
31. Кодрик А.І., Коваленко В.В., Тітенко О.М., Борисов А.В. Шляхи підвищення ефективності водних вогнегасних речовин на основі рідкого скла. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2022. № 1 (13). С. 24–34. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.24-34>
32. Кустов М.В., Калугін В.Д. Поведінка емульсій з низькокиплячою дисперсною фазою в умовах високих температур. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2008. Вип. 8. С. 108–114.
33. Савельєв Д.І. Підвищення ефективності гасіння низових лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасних систем з роздільним подаванням : дис. канд. техн. наук : 21.06.02 / Національний університет цивільного захисту України. Харків. 2020. С. 210.

34. Parsons P.L. Foam tests on petrol tray fires. Fire Engineering Journal. 1982. Vol. 42, No. 125. P. 32.
35. Ryderman A. Testing of foam as a fire extinguishing medium for polar. Fire. 1975. No. 2. P. 35–41.
36. Oil Tank Fire Extinguishing. Fire. 1960. No. 109. P. 1–43.
37. French R.J., Hinkley P.L., Nash P. Foam extinguishing liquid fire. Fire. 1958. No. 50. P. 585–594.
38. Comparative tests on liquid fuel fires. Fire International. 1968. No. 121. P. 65–79.
39. Pozarnik. 1984. Vol. 61, No. 21. P. 15.
40. Compressed Air Foam System: веб-сайт. URL: <http://compressedairfoamsystem.com> (дата звернення: 30.04.2023).
41. Oneseven: веб-сайт. URL: <http://www.oneseven.com> (дата звернення: 30.04.2023).
42. Systeme: einfach, sicher und okonomisch: веб-сайт. URL: <http://www.oneseven.com/de/stationaerbrandschutz/systeme/standardsystem/beschreibung.php> (дата звернення: 30.04.2023).
43. Leistungsstark. Einfach. Sicher: веб-сайт. URL: <http://www.rosenbauer.com> (дата звернення: 27.03.2023).
44. CAFS–Systems: веб-сайт. URL: <http://www.waterousco.com/cafs-systems> (дата звернення: 27.03.2023).
45. Firefighting Vehicles: веб-сайт. URL: <http://www.gimaex.com> (дата звернення: 27.03.2023).
46. Products: веб-сайт. URL: <http://kssieler.de/hale/cafs> (дата звернення: 27.03.2023).
47. Ларін О.М., Виноградов С.А., Баркалов В.Г. Пожежні машини. Київ : МПБП «Гордон», 2016. С. 279.
48. Ковалишин В.В., Великий Н.Р., Ковалишин В.В., Войтович Т.М., Сорочич М.П. Засоби отримання та перспективи застосування компресійної

піни. Пожежна безпека. 2021. № 39. С. 94–104.

<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.11>

49. ACAF Systems : веб-сайт. URL: <https://acafsystems.com>

50. NFPA 1145. Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting. 2011. P. 1–34.

51. CAFS веб-сайт URL: <https://tcesd5.org/articles/>

52. Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («ПНА – К») : звіт про НДР (заключ.) / УкрНДІЦЗ ; кер. Шахов С. М. ; викон.: Нікулін О. Ф., Кодрик А. І., Тітенко О. М. Київ, 2018. 259 с. № ДР 0117U000840.

53. Colletti D.J. Compressed–air foam mechanics. Fire Engineering. 1994. Vol. 147. P. 61–65.

54. Taylor R.G. Technical Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions : Report 98 / Morristown Fire Bureau. Morristown, New Jersey, 1998. P. 75–112.

55. Colletti D.J. Class A foam for structure firefighting. Fire Engineering. 1992. Vol. 145. P. 47–56.

56. Розроблення технічного засобу пожежогасіння компресійною піною та дослідження його характеристик : звіт про ДКР (заключ.) / УкрНДІЦЗ ; кер. Шахов С.М. ; викон.: Нікулін О.Ф., Кодрик А.І., Тітенко О.М. Київ. 2020. С. 421. URL:

https://www.dsns.gov.ua/files/2021/7/9/%D0%9F%D1%96%D0%BD%D0%B0_%D0%B7%D0%B0%D1%81%D1%96%D0%B1_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B4%D1%96%D0%BB_6.pdf

57. Шахов С.М. Підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А : дис. докт. філос. (PhD) : 261 / НУЦЗ України. Харків, 2020. С. 38–40. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/spetsializovani-vcheni-rady/261/003/shahov_an.pdf

58. Провести дослідження по розробці піноутворювача загального

призначення та взяти участь в освоєнні його виробництва в Україні : звіт про НДР (заключ.) / УкрНДПБ МВС України ; кер. Антонов А.В. Київ, 1996. 192 с. Інв. № 750-О.

59. Провести пошукові дослідження по створенню піноутворювачів спеціального призначення (плівкоутворюючих, для використання морської води) : звіт про НДР (заключ.) / УкрНДПБ МВС України ; кер. Білошицький М.В. Київ, 1997. 237 с. Інв. № 800-О.

60. Провести дослідження по вдосконаленню рецептури піноутворювача загального призначення на основі альфа-олефінсульфонатів : звіт про НДР (заключ.) / УкрНДПБ МВС України ; кер. Білошицький М.В. Київ, 1998. 206 с. Інв. № 832-О.

61. Dong–Ho R., Jang–Won L., Seonwoong K. Class B Fire–Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air–to–Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. Applied Sciences. 2016. Vol. 6, No. 191. P. 2–12. URL: [10.3390/app6070191](https://doi.org/10.3390/app6070191)

62. Jing–yuan C., Mao X. Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. Procedia Engineering. 2014. No. 71. P. 44–56. URL: [10.1016/j.proeng.2014.04.007](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.04.007)

63. A theoretical and experimental study of extinguishing compressed air foam on an n-heptane storage tank fire with variable fuel thickness / Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah et al. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 138. P. 117–129. URL: [10.1016/j.psep.2020.03.011](https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.011)

64. Wang Yueyong, Yang Zhen, Gao Xuhui, Xiao Liang. Experimental study on fire suppression and burn resistance of compressed air foam. Fire Science and Technology. 2022. Vol. 41, No. 11. P. 1542–1546. URL: www.xfkj.com.cn/EN/Y2022/V41/I11/1542

65. Crampton G.P., Kim A.K. A comparison of the fire suppression performance of compressed air foam with air aspirated and unexpanded foam-water solution : research report. 2004. P. 1–25. URL: [doi:10.4224/20378347](https://doi.org/10.4224/20378347)

66. Extinguishing property of compressed air foam on bushing turret spill

fire of transformer / Chen Tao, Hu Cheng, Bao Zhi-ming et al. Fire Science and Technology. 2020. Vol. 39, No. 7. P. 962–965. URL: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/962>

67. Experimental Study on the Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam Sprinkler System on Oil Pool Fire / Tao Chen, Xue-cheng Fu, Zhi-ming Bao et al. Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. P. 94–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.142>

68. Fire-extinguishing performance and mechanism of aqueous film-forming foam in diesel pool fire / Zhisheng Xu, Xing Guo, Long Yan et al. Case Studies in Thermal Engineering. 2020. Vol. 17. P. 1–7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100578>.

69. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Xuqing Lang, Shanjun Mu, Yongming Zhang, Jingwu Wang. Research on the influence of foaming gas in compressed air/nitrogen foam on extinguishing the n-heptane tank fire. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2021. Vol. 72,. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104533>.

70. Byoung-Jik Park, Hyun-Jun Shin, Yong-Ho Yoo, Jin-Ouk Park, Hwi Seong Kim. Experimental study on applicability of compressed air foam fire water using seawater in train fire at subsea tunnel rescue station. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association. 2017. Vol. 19, No. 5. P. 705–715. URL: <https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.5.705>

71. Experimental study on fire extinguishing with alcohol-resistant compressed air foam / X.-Z. Zhang, Z.-M. Bao, L.-S. Jing, Y. Chen // Fire Science and Technology. 2020. Vol. 39, No. 9. P. 1271–1273. URL: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I9/1271>

72. A study of fire extinguishing performance of compressed air foam on rim seal fire for floating roof tanks / Yang Zhen-ming, Chen Tao, Hu Cheng et al. Fire Science and Technology. 2020. Vol. 39, No. 5. P. 641–645. URL: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/641

73. Improving the performance of fluoroprotein foam in extinguishing gasoline pool fires with addition of bromofluoropropene / M. Zhao, X. Ni, S. Zhang et al. *Fire and Materials*. 2016. Vol. 40. P. 261–272. URL: [10.1002/fam.2284](https://doi.org/10.1002/fam.2284).

74. Comparison of the fire extinguishing performance of different types of compressed gas foam on class B fires / Chen Tao, Hu Cheng, Bao Zhi-ming et al. *Fire Science and Technology*. 2020. Vol. 39, No. 5. P. 645–648. URL: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/645

75. Experimental Research on the Effectiveness of Different Types of Foam of Extinguishing Methanol / Diesel Pool Fires / Zhaoqian Li, Hongqing Zhu, Jinlong Zhao et al. *Combustion Science and Technology*. 2022. Vol. 194, No. 15. P. 3065–3085., URL: [10.1080/00102202.2022.2125306](https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2125306)

76. Rappsilber T., Krüger S. Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 98. P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.004>

77. Rappsilber T., Below P., Krüger S. Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range. *Fire Safety Journal*. 2019. Vol. 106. P. 136–145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.014>

78. Визначення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею твердих горючих речовин / С.М. Шахов [та ін.] // Проблеми пожежної безпеки. 2019. Вип. 46. С. 199–205. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12273>

79. Визначення показника вогнегасної здатності компресійної піни / С.М. Шахов [та ін.] // Проблеми пожежної безпеки. 2020. Вип. 47. С. 199–205. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12275>

80. 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. Vol. 56, Issue 1. P. 154–160. URL: [10.12845/sft.55.1.2020.10](https://doi.org/10.12845/sft.55.1.2020.10)

81. 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. URL: [10.1007/s11434-008-0571-3](https://doi.org/10.1007/s11434-008-0571-3)

82. A Study on the Evaluation of Fire Extinguishing Performance of a Synthetic Surfactant Compressed Air Foam with Scaled Model / Young-Ki Lee, Yun-Seok Kim, Yoon-Soon Kang et al. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2017. Vol. 17, No. 6. P. 269–276. URL: doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.269

83. International Chemical Safety Cards (ICSCs) : database / International Labour Organization. URL: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.listcards3?p_lang=en

84. Liu Y.C., Jiang J.C., Huang A.C. Experimental study on extinguishing oil fire by water mist with polymer composite additives. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. Vol. 147, No. 15. P. 8387–8396. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11645-5>

85. Mykhalichko B., Lavrenyuk H., Mykhalichko O. New water-based fire extinguishant: Elaboration, bench-scale tests, and flame extinguishment efficiency determination by cupric chloride aqueous solutions. Fire Safety Journal. 2019. Vol. 105. P. 188–195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.03.005>

86. Application of thermal mechanism to evaluate the effectiveness of the extinguishment of CH₄/air cup-burner flame by water mist with additives / T. Zhang, Z. Han, Z. Du et al. International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Vol. 41, Issue 33. P. 15078–15088. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.260>.

87. Preproduction testing of extinguishing efficiency of a novel water-based fire-extinguishing agent on basis of K₂[CuCl₄] compound / O.B. Mykhalitchko, N.M. Godovanets, O.N. Shcherbina et al. Пожежна безпека. 2014. № 24. С. 111–115. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/1707>

88. Сізіков О.О., Балло Я.В., Бенедюк В.С. Вплив цільових добавок до води на ефективність гасіння пожеж твердих горючих речовин. Науковий

вісник НЛТУ України. 2016. Вип. 26.8. С. 298–303. URL: <https://doi.org/10.15421/40260846>

89. Вплив цільових добавок до води на ефективність системи пожежогасіння / О.О. Сізіков, С.В. Жартовський, В.В. Нижник та ін. 2017. Т. 1, № 1. С. 35–43. URL: [10.33408/2519-237X.2017.1-1.35](https://doi.org/10.33408/2519-237X.2017.1-1.35)

90. Joseph P., Nichols E., Novozhilov V. A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist. *Fire Safety Journal*. 2013. Vol. 58. P. 221–225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.03.003>.

91. Extinguishment of hydrocarbon pool fires by ultrafine water mist with ammonium/amidogen compound in an improved cup burner / T. Liang [et al.] // *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42, Iss. 8. P. 889–896. URL: <https://doi.org/10.1002/fam.2644>

92. Dong Z., Wei S.-K., Zhao L.-S. Experimental Study on Synergistic Fire Extinguishing between Different Potassium Additives in Water Mist. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2019. Vol. 10, No. 2. P. 75–78. URL: [10.18178/ijesd.2019.10.2.1150](https://doi.org/10.18178/ijesd.2019.10.2.1150)

93. Experimental research on low-pressure water mist in suppressing ship oil pool fire effectiveness with KCl / S. Su, C. Guo, L. Wang et al. *China Safety Science Journal*. 2019. Vol. 29, No. 4. P. 58–63. URL: <http://www.cssjj.com.cn/EN/Y2019/V29/I4/58>

94. Inhibitory effect of water mist containing composite additives on thermally induced jet fire in lithium-ion batteries / Y. Zhou, Z. Wang, H. Gao et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147, Issue 3. P. 2171–2185. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10673-x>

95. Chemical composition of the renewed fire extinguishing powder and its physical characteristics / Azzaya T., Burmaa G., Alen S. et al. *Bulletin of the Institute of Chemistry and Chemical Technology*. 2020. No. 8. P. 70–76. URL: <https://doi.org/10.5564/bicct.v0i8.1481>

96. Comparison of the inhibition mechanisms of five types of inhibitors on spontaneous coal combustion / Y.-T. Tsai, Y. Yang, C. Wang et al. *International Journal of Energy Research*. 2018. Vol. 42, Issue 3. P. 1158–1171. URL: <https://doi.org/10.1002/er.3915>

97. Phosphorylated Cellulose Nanofibrils: A Renewable Nanomaterial for the Preparation of Intrinsically Flame-Retardant Materials / Maryam Ghanadpour, Federico Carosio, Per Tomas Larsson, Lars Wågberg // *Biomacromolecules*. 2015. Vol. 16, No. 10. P. 3399–3410. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b01117>

98. Кіреєв О.О., Колєнов О.М. Дослідження піноутворення в піноутворювальних системах. *Проблеми пож. безпеки*. 2009. Т. 25. С. 59–64. URL: https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/4553/1/kireev_kolenov%202009%20%281%29.pdf

99. Кіреєв О.О., Колєнов О.М. Шляхи підвищення ефективності пінного пожежогасіння. *Проблеми пожежної безпеки*. 2008. Т. 24. С. 50–55. URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/2571/1/kireev%2Bkolenov.pdf>

100. Štefan G., Štefanický B., Majlingová A. Experimental comparison of the fire extinguishing properties of the firesorb. Gel and water // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference : SGEM*. Sofia, 2017. Vol. 17. URL: [10.5593/sgem2017/51](https://doi.org/10.5593/sgem2017/51)

101. Park J., Kwark J. Experimental Study on Fire Sources for Full-Scale Fire Testing of Simple Sprinkler Systems Installed in Multiplexes // *Fire*. 2021. Vol. 4, No. 1. 8. URL: <https://doi.org/10.3390/fire4010008>

102. Wanhai G., Guoqing Z., Bin Y. Study on the fire extinguishing mechanism of small size wood crib based on small sand-throwing equipment // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 25. 100942. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100942>

103. HNE Fightingfire [електронний ресурс] // HNE Fightingfire - URL: <https://www.hne.ag/de/produkte>

104. 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. URL: <https://doi.org/10.36930/40300319>

105. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodrik A.I., Titenko O.M., Parkhomchuk 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. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.210375>

106. ДСТУ EN 16327:2018 «Напірні піно змішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS)».

107. ДСТУ 3789:2015 Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування. - Чинний від 2016-07-01. - К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. - 33 с.

108. Diab M. T., Haelssig J. B., Pegg M. J. The behaviour of wood crib fires under free burning and fire whirl conditions. *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 112. P. 102941. URL: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102941>

109. Vynarskyi, M. S., Lurie, M. V. Planning an experiment in a technological environment. Kyiv: Tekhnika, 1975. P.168.

110. DSTU EN 3-7:2014 Portable fire extinguishers. Part 7. Characteristics, performance requirements and test methods (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63167

111. Савченко О.В., Кіреєв О.О., Острроверх О.О. Визначення показника вогнегасної здатності оптимізованого кількісного складу гелеутворюючої системи $\text{CaCl}_2 - \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,95\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ на стандартизованому модельному вогнищі пожежі. *Проблеми пожежної безпеки*. 2011. Т. 29. С. 149 – 155. URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/3316/1/26.pdf>

ДОДАТОК А.

Список публікацій за темою дисертації

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

1. Shakhov S., Vynohradov S., Kodryk A., Titenko O., Melnychenko A., **Hryshenko D.**, Grinchenko E., Knaub L. Influence of modified additives on the properties of compressed air foam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4. No. 6(130). P. 38-48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.310371>

Особистий внесок – експериментальним шляхом визначив вплив п'яти модифікувальних у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни.

2. Shakhov S., Vynohradov S., **Hryshenko D.**, Savchenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Shevchuk V., Dominik A. Determining the effect of modified additives on the fire-extinguishing properties of compressed air foam. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 2. No. 10(134). P. 44-52. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.325930>

Особистий внесок – визначив вплив наявності домішок $(NH_4)_2HPO_4$, $NH_4H_2PO_4$, $(NH_4)_2CO_3$, у водному розчині піноутворювача у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на вогнегасні властивості компресійної піни та порівняв їх ефективність.

3. Shakhov S., Vynohradov S., **Hryshenko D.**, Melnychenko A., Grinchenko E., Knaub L., Maslich N., Mohylianets T., Pinder V., Pavlyuk Y. Determining the fire extinguishing efficiency of compressed air foam with modified additive $NH_4H_2PO_4$. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 6. No. 10(138). P. 32-38. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.345244>

Особистий внесок – визначив та порівняв вогнегасну ефективність компресійної піни з модифікувальною добавкою $NH_4H_2PO_4$ із компресійною піною традиційного складу, водою та гелеутворювальним складом при гасінні стандартизованих модельних вогнищ пожежі класу ІА.

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

4. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз способів підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. Комунальне господарство міст. 2023. Т. 1. № 175. С. 151-159. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-151-159>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

5. Грищенко Д.В., Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз досвіду використання модифікувальних добавок та їх фізико-хімічних властивостей для подальшого застосування у складі компресійної піни. Пожежна безпека. 2023. Т. 42. С. 85-95. URL: <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.10>

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

6. Кодрик А.І., Тітенко О.М., Виноградов С.А., Шахов С.М., Грищенко Д.В. Розробка дослідного зразка системи генерування та подавання компресійної піни. Комунальне господарство міст. 2024. Т. 4. №185. С. 172–177. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-172-177>

Особистий внесок – запропонував систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її утворюють.

Патенти України на корисну модель:

7. Спосіб утворення компресійної піни: пат. 156347, МПК А62D 1/02,

(2006.01), № u202304736; заяв. 09.10.2023; опубл. 12.06.2024, бюл. № 24.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А., Шахов С.М. Компресійна піна як альтернатива водоемульсійним та водопінним засобам пожежогасіння. *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»*. м. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 79-81. URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18351/1/%D0%9A%D0%9E%D0%9C%D0%9F%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%90%20%D0%9F%D0%86%D0%9D%D0%90%20%D0%AF%D0%9A%20%D0%90%D0%9B%D0%AC%D0%A2%D0%95%D0%A0%D0%9D%D0%90%D0%A2%D0%98%D0%92%D0%90%20%D0%92%D0%9E%D0%94%D0%9E%D0%95%D0%9C%D0%A3%D0%9B%D0%AC%D0%A1%D0%86%D0%99%D0%9D%D0%98%D0%9C.pdf>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

9. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А. Щодо застосування модифікованих добавок у складі компресійної піни. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація. Матеріали круглого столу (вебінару)*. м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 88 – 89. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17232>

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

10. **Грищенко Д.В.**, Виноградов С.А., Шахов С.М. Аналіз фізико-хімічних властивостей модифікованих добавок та механізм їх вогнегасної дії.

Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми надзвичайних ситуацій - 2023» («Problems of Emergency Situations – 2023»). м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 346-347. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17657>.

Особистий внесок – розглянув модифікувальні добавки, які застосовуються у галузі пожежогасіння за напрямком вогнегасної дії та їх фізико-хімічні властивості. Проаналізував експериментальні дослідження щодо досвіду застосування модифікувальних добавок у водних вогнегасних речовинах.

11. **Грищенко Д.В.,** Виноградов С.А., Холодько В.М. Шляхи підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни при гасінні твердих горючих речовин. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту».* м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 191. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18350>

Особистий внесок – провів аналіз та систематизував наукові публікації, присвячені використанню компресійної піни при гасінні пожеж та підвищенню її вогнегасної ефективності.

12. **Грищенко Д.В.** Розробка лабораторного зразку системи для дослідження впливу модифікувальних добавок на ефективність компресійної піни. *Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням».* м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 127-128. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18686/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%20%D1%81%D1%82%D1%96%D0%BB_%D0%A1%D0%A5%D0%A5%D0%A2%20%28pdf.io%29.pdf

Особистий внесок – запропонував систему генерування та подавання компресійної піни для дослідження її властивостей із вмістом модифікувальних добавок при зміні складу рідини та повітря, що її

утворюють.

13. Грищенко Д.В., Виноградов С.А. Результати експериментального визначення властивостей компресійної піни із модифікованими добавками. *Матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно – рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням».* м. Харків: НУЦЗ України. 2023. С. 51-54. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/22378/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D1%82%D0%B5%D0%B7%20%D0%9E%D0%A0%D0%A1%20%D0%92%D0%B8%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%B4%D0%BE%D0%B2.pdf>

Особистий внесок – експериментальним шляхом визначив вплив п'яти модифікувальних у діапазоні концентрацій 1–5 % по масі на кратність та стійкість компресійної піни.

ДОДАТОК Б.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



07 травня, 2026р.

м. Київ

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеню доктора філософії за
спеціальністю 261 «Пожежна безпека»
Гриценка Дмитра Володимировича

ТОВ «КОМПАНІЯ ТІТАЛ» спеціалізується на виробництві пожежно-рятувальної, аварійно-рятувальної та спеціальної техніки. У тому числі, фахівцями підприємства виконуються розробка і виготовлення спеціального обладнання, устаткування, технічних засобів для попередження виникнення та ліквідації пожеж.

Результати, отримані в дисертаційній роботі Гриценка Д.В., впроваджені в діяльність ТОВ «КОМПАНІЯ ТІТАЛ» у формі технічних рекомендацій щодо оптимізації параметрів роботи систем САФС та складу вогнегасної речовини. Зокрема, використано науково обґрунтовані дані щодо застосування модифікувальної добавки на основі дигідроортофосфату амонію та встановленого оптимального робочого тиску.

Застосування результатів дослідження дозволить підвищити вогнегасну ефективність систем пожежогасіння у складі протипожежної техніки, що виготовляється підприємством. Використання отриманих в роботі Гриценка Д.В. емпіричних залежностей дозволить скоротити час проектування систем подачі компресійної піни.

Директор

ТОВ «КОМПАНІЯ ТІТАЛ»



А.М. Хлапук

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник Головного
управління ДСНС України

у Чернівецькій області

полковник служби цивільного

захисту

Валентин БУДОВИЦЬКИЙ

2026 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи ад'юнкта
Національного університету цивільного захисту України
Грищенка Дмитра Володимировича

Комісія у складі:

голови комісії:

начальника Головного управління ДСНС України у Чернівецькій області
БУДОВИЦЬКОГО Валентина Валентишовича;

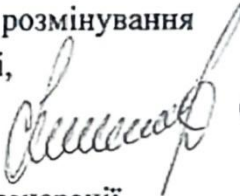
членів комісії:

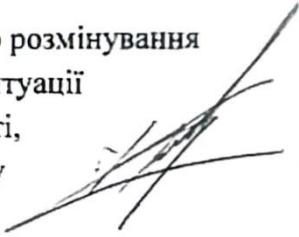
заступника начальника управління - начальника відділу організації реагування на надзвичайні ситуації та гуманітарного розмінування, полковника служби цивільного захисту РИЛЬЧУКА Олександра Олексійовича, начальника служби енергетичної та теплогенерації відділу організації реагування на надзвичайні ситуації та гуманітарного розмінування управління реагування на надзвичайні ситуації, підполковника служби цивільного захисту ГАВРИЛАША Івана Івановича, головного фахівця відділу організації пожежно-рятувальних робіт, служби та підготовки підрозділів управління реагування на надзвичайні ситуації, майора служби цивільного захисту БОЙДИ Богдана Івановича склала даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження ад'юнкта Національного університету цивільного захисту України Грищенка Дмитра Володимировича становлять практичний інтерес, оскільки в ньому вирішені задачі щодо підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин.


У Головному управлінні ДСНС України у Чернівецькій області результати дисертаційної роботи Грищенка Дмитра Володимировича впроваджено для практичного використання у вигляді рекомендацій із застосування компресійної піни із модифікувальними добавками для гасіння пожеж твердих горючих речовин.

Використання зазначених результатів дозволить підвищити ефективність гасіння пожеж у випадку використання пристроїв з компресійною піною та забезпечити високий рівень збереження матеріальних цінностей.

Члени комісії

Заступник начальника управління -
начальник відділу організації реагування
на надзвичайні ситуації та гуманітарного розмінування
ГУ ДСНС України у Чернівецькій області,
полковник служби цивільного захисту  Олександр РИЛЬЧУК

Начальник служби енергетичної та теплогенерації
відділу організації реагування
на надзвичайні ситуації та гуманітарного розмінування
управління реагування на надзвичайні ситуації
ГУ ДСНС України у Чернівецькій області,
підполковник служби цивільного захисту  Іван ГАВРИЛАШ

Головний фахівець відділу організації пожежно-рятувальних
робіт, служби та підготовки підрозділів
управління реагування на надзвичайні ситуації
ГУ ДСНС України у Чернівецькій області,
майор служби цивільного захисту  Богдан БОЙДА