

С.М. Шахов, С.А. Виноградов, Д.В. Грищенко

Національний університет цивільного захисту України, Україна

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ГАСІННІ ТВЕРДИХ ГОРЮЧИХ РЕЧОВИН

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 модифікованих добавок. Подальшого розвитку набуває підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни, вогнегасна здатність якої може буди підвищення шляхом використання у її складі модифікованих добавок.

Ключові слова: модифіковані добавки, компресійна піна, пожежогасіння, цивільна безпека, пожежна безпека.

Постановка проблеми

У таблиці 1 наведено відомості щодо водних вогнегасних речовин (ВВР), які застосовуються переважно для гасіння пожеж класу А.

На сьогодні рідиннофазові водні, водоемульсійні, гелеутворювальні та комбіновані вогнегасні речовини не знайшли широкого провадження в пожежогасінні. Вони переважно залишаються в вигляді дослідних зразків. Це зумовлено складністю, яка полягає у технології їх

застосування та економічною не вигідністю. Серед водопінних вогнегасних речовин слід виділити повітряно-механічна піну, яка переважно застосовується для гасіння легкозаймистих горючих рідин. Отже на сьогодні найбільш поширеним вогнегасним засобом для гасіння твердих горючих речовин залишається вода. Незважаючи на її недоліки, вона використовується переважно на більшій кількості пожеж.

Таблиця 1

Водні вогнегасні речовини [1]

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 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 «Заполярний»
Рідиннофазові водоемульсійні	В, А, С	H ₂ O+модифікувальні добавки	Дослідні зразки
Рідиннофазову гелеутворювальні	А, В	H ₂ O+модифікувальні добавки	Prevento; дослідні зразки
Рідиннофазові комбіновані	А, В, С	H ₂ O+ПАР+Г+ модифікувальні добавки	Дослідні зразки; ОС-5; ОС-А1

Альтернативою воді є компресійна піна, яка застосовується для гасіння твердих матеріалів і горючих рідин [2]. Експериментальним шляхом визначено, що при гасінні пожеж класу А, компресійна піна має низку переваг у порівнянні з

іншими водними вогнегасними речовинами, зокрема над водою [3]. До недоліків вогнегасної властивості компресійної піни можна віднести дію тільки за двома механізмами припинення горіння, а саме ізоляцію та охолодження. Компресійна піна не має

інгібуючого впливу на зону горіння, та не утворює вогнезахисне покриття на поверхні горючого матеріалу.

Одним зі шляхів вирішення цього недоліку є застосування у її складі модифікованих добавок. Є гіпотеза, що при додаванні до складу компресійної піни модифікованих добавок, можливий вплив на процес термодеструкції твердих горючих речовин. Компресійна піна буду діяти одразу за трьома механізмами припинення горіння, у тому числі і інгібувати реакцію горіння та утворювати вогнезахисну плівку на поверхні твердого горючого матеріалу.

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

Метою дослідження є аналіз наукової періодики щодо застосування та підвищення вогнегасної ефективності компресійної піни.

Методи: Робота виконувалась шляхом аналізу наукової періодики, експериментальних досліджень вчених Євросоюзу, США, Китаю та інших держав, результати яких були представлені у наукових виданнях, конференціях та доповідях.

Викладення основного матеріалу

Компресійна піна (англійською Compressed Air Foam) – високодисперсна гомогенна піна низької кратності, яка генерується у спеціальних системах [3] - Compressed air foam systems (рис. 1.), шляхом змішування води, піноутворювача, та повітря під тиском. У літературі зустрічається також як: «газонаповнена», «пневматична піна», «легка піна».

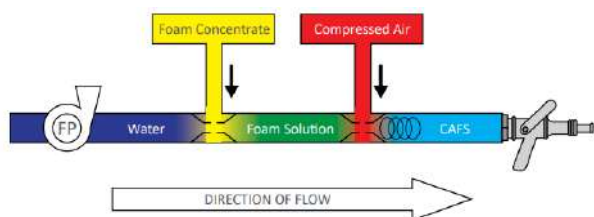


Рис .1. Процес генерування компресійної піни у системах CAFS [4].

Відповідно до [5] компресійну піну в залежності від співвідношення повітря/рідина поділяють на три типи: «мокра (wet)» з кратністю від 1 до 5; «рідка (fluid)», кратність від 5 до 10 = 5–10; «суха, або жорстка (dry or stiff)» р кратністю від 10 до 20 (рис. 2).



Рис. 2. Типи компресійної піни за кратністю [3].

До переваг компресійної піни у порівнянні з водою відносять [2-3]:

- 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;

- піна швидше поглинає тепло (технологія ONE SEVEN, 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 спалахування, за рахунок високої проникаючої здатності у пори твердих матеріалів та речовин;

- зменшена вага рукавів, за рахунок знаходження у рукаві вже готової генерованої 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 проливу;

- сприяє розслідуванню пожежі, зменшуючи вплив затоплення на місці пожежі;

- 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.

1.1. Аналіз досліджень присвячених використанню компресійній піни

Дослідження вогнегасних властивостей компресійної піни можна поділити за напрямком експериментів, що подано на рисунку 3.

Авторами [6] проведено оцінку вогнегасної ефективності компресійної піни з кратністю 1:4, 1:7 і 1:10 під час гасіння модельного вогнища класу В. У тому числі для піни кратністю 4 порівняно вогнегасний ефект із застосуванням синтетичного та плівкоутворюючого піноутворювачів.



Рис. 3. Напрямки експериментальних досліджень вогнегасної властивості компресійної піни.

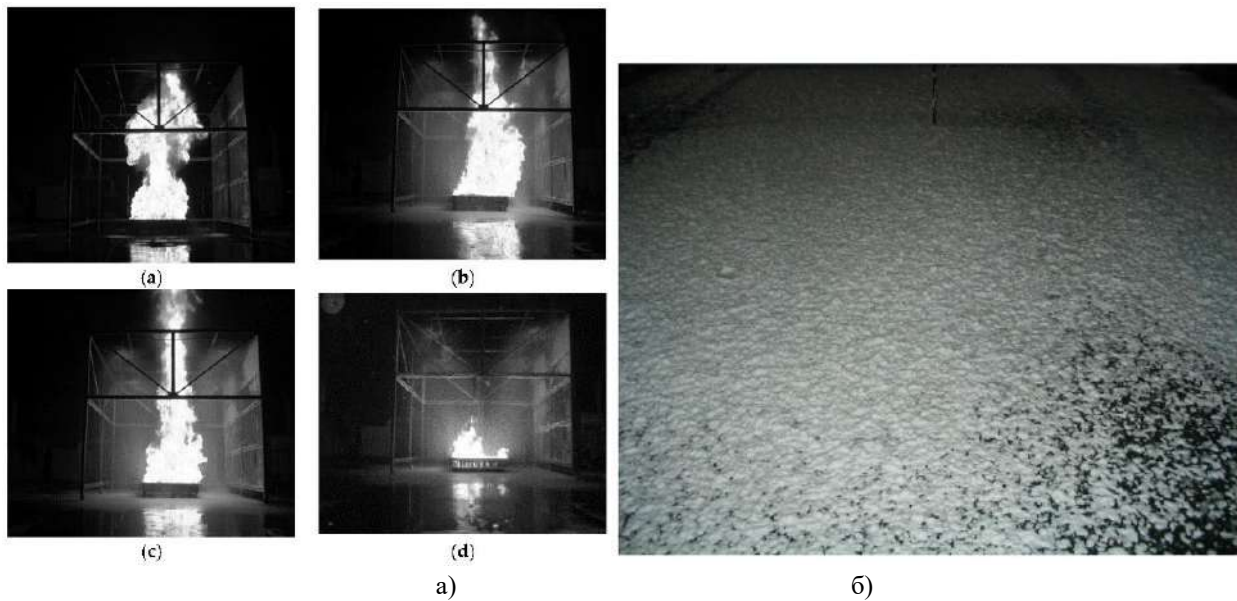


Рис. 4. Дослідження вогнегасної ефективності компресійної піни для гасіння легкозаймистих та горючих рідин: а) етапи гасіння; б) компресійна піна отримана з 3% розчину піноутворювача типу AFFF [6].

У роботі [7] порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни за різним вмістом піноутворювача у межах від 0,4 % до 1 %. При цьому досліджувалась піна різної кратності, відповідно суха, мокра та рідка. У результаті найменший час при гасінні легкозаймистої рідини зафіксовано для мокрої піни та концентрації піноутворювача 1 %, що склав 29 секунд. Найбільший час гасіння спостерігався для сухої піни і склав 100 секунд. Авторами [8] 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 фторвуглеводних поверхнево-активних речовин, піні притаманна збільшена товщина плівки і нижчий коефіцієнт дифузії. У роботі [9] порівняно експлуатаційні характеристики повітряно-механічної та компресійної піни за допомогою стаціонарної системи пожежогасіння. Бензин марки А-92 використано як паливо для модельного

При однакової інтенсивності подавання та застосуванні піноутворювача AFFF найбільшу вогнегасну ефективність зафіксовано для піни кратністю 7. В свою чергу, найменша вогнегасна ефективність спостерігалась за кратністю піни 1:10. Також авторами підкреслено переваги піноутворювача типу AFFF над синтетичним (рис 4).

вогнища. Завдяки отриманим результатам встановлено, що компресійній піні притаманна більша стійкість у порівнянні з повітряно-механічною. Автори стверджують, що компресійна має більш міцну і водночас тонку плівку. Підтверджено, що за рахунок використання стиснутого повітря, можливе генерування високодисперсної піни, яка рівномірно покриває дзеркало горючої рідини. У дослідженні [10] авторами у серії експериментів (рис. 5), порівняно ефективність гасіння гептану компресійною, повітряно-механічною піною (ПМП), та водними розчинами піноутворювачів. Встановлено, що витрати водного розчину ПУ компресійної піни на гасіння на 30 % менша у порівнянні з ПМП, та на 87 % менша відносно до водного розчину 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

піноутворювачам класу А у 2,4 рази менший відносно до повітряно-механічної піни із ПУ AFFF.

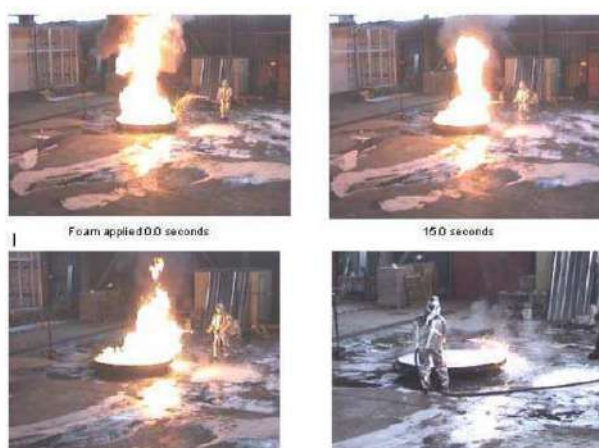


Рис. 5. Дослідження ефективності застосування компресійної піни під час гасіння модельного вогнища класу Б [10].

У роботі [11] експериментально порівняно вогнегасну ефективність компресійної та повітряно-механічної піни під час гасіння бензину марки А-92. Досліджено залежність часу гасіння від інтенсивності подавання вогнегасних засобів. Визначали необхідну інтенсивність подавання та час до повного ліквідування полум'я. У результаті зафіксовано, що при зниженні інтенсивності подавання вогнегасних речовин підвищується час гасіння. Також встановлено, що необхідне значення інтенсивності подавання компресійної піни нижче ніж для повітряно-механічної. Дослідження [12] присвячено вивченню властивостей компресійної піни під час гасіння масла, яке використовується для охолодження трансформаторів. У результаті підтверджено ефективність застосування піни. Час гасіння модельного вогнища склав 3,9 хвилини, при інтенсивності подавання піни $11,2 \text{ л}/(\text{хв} \cdot \text{м}^2)$. При цьому не спостерігалось повторного займання. Авторами [13] 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 $3,48 \text{ л}/(\text{хв} \cdot \text{м}^2)$. При цьому витрата розчину піноутворювача для запобігання розповсюдження полум'я повинна бути не менше $0,99 \text{ л}/\text{м}^2$, а для успішного гасіння $2,38 \text{ л}/\text{м}^2$. У роботі [14] автори оцінювали вогнегасну ефективність плівкоутворюючого піноутворювача у компресійній піні під час гасіння дизельного палива. При цьому автори замість повітря використовували азот (N_2)

для генерування піни. 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 [15] роботі авторами експериментальним шляхом порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни під час гасіння легкозаймистих рідин. Авторами в якості 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 більша відносно до піни, генерованої традиційним шляхом за допомогою повітря. У дослідженні [16] 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 досліджено за допомогою вогнегасника із компресійної піною досліджено ефективність гасіння модельного вогнища гептану. Авторами [17] проведено експериментальне дослідження гасіння компресійної піною модельних вогнищ спиртів, зокрема етанолу та ацетону. У якості піноутворювача застосовували піноутворювача типу AFFF-AR. Також оцінено ефективність застосування ПМП за однакових умов. За результатами встановлено, що стійкість та вогнегасна ефективність компресійної піни більша, ніж у повітряно-механічної. У разі застосування повітряно-механічної піни час гасіння більший ніж для компресійної. У дослідженні [18] авторами досліджено ефективність гасіння легкозаймистих рідин компресійною піною. У результаті визначено, що для успішного гасіння вогнища витрата інтенсивність подавання розчину піноутворювача повинна бути у межі від 3,8 до $8 \text{ л}/(\text{хв} \cdot \text{м}^2)$. Підвищення інтенсивності подавання супроводжувалось зменшенням часу гасіння. Під час зміни кратності піни від 8 до 12 суттєвих змін на вогнегасну ефективність не зафіксовано. Авторами [19] досліджено вогнегасну ефективність компресійної піни із використанням 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 [20] 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 піну 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 [21] експериментальним шляхом порівняно вогнегасну ефективність компресійної піни під час гасіння модельних вогнищ класу Б, 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 спостерігалось наступна залежність S > S/AR > AFFF > AFFF/AR > FP > FP/AR.

У дослідженні [22] 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. Порівняно піну із водою та водним розчином піноутворювача. Результати показали, що в умовах випробувань компресійна піна мала найбільшу вогнегасну ефективність. Результати містять вагомий внесок з питання використання ефективної концентрації піноутворювача. В роботі [23] порівняно (рис. 6) вогнегасну ефективність компресійної та повітряно-механічної піни при гасінні модельних вогнищ класу А. У результаті час гасіння вогнища компресійною піною становив 23 секунди. Для повного гасіння повітряно-механічної піною потрібно було у 2 рази більше часу. Також автори визначили необхідну кількість розчину піноутворювача, який був потрібен для гасіння пожежі. У разі використання ПМП потрібно було 150 л розчину ПУ, а для компресійної піни 76 л.



Рис. 6. Дослідження ефективності компресійної піни під час гасіння пожежі класу А [23].

Дослідження [24] присвячене порівнянню ефективності пожежогасіння чотирьох найбільш поширених засобів в однакових умовах. Випробування проводились із використанням стандартних модельних вогнищ класу 5А. Залежно від типу струменя охолоджувальна здатність води та води з піноутворювачем порівнювалася з охолоджувальною здатністю струменя мокрої, рідкої 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 [25,26] 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 варіювалася у межах від 4 % до 6 %. За двома показниками гасіння найбільша вогнегасна ефективність спостерігалась для піни кратністю 25. У роботі [27] порівняно (рис. 7) вогнегасну ефективність компресійної піни, гелеутворювальних складів (ГУС) 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.



Рис. 7. Експериментальне порівняння вогнегасної ефективності компресійної піни та води [27].

У роботі [28] 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 зниженні концентрації піноутворювача, має місце більший час гасіння, а саме при концентрації піноутворювача 12 % час гасіння менший у 2 раз по відношенню до часу, який зафіксовано при концентрації піноутворювача 2,2 %. Дослідження [29] 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 запобігаю повторному займанню, за рахунок осаду на поверхні твердого горючого матеріалу. У роботі [30] досліджували охолоджувальну здатність компресійної піни при гасінні пожеж твердих горючих речовин у замкнутих відсіках. Процес горіння контролювався пожежною навантагою, або вентиляцією. Також автори порівняли охолоджувальну здатність КП та водяного туману. У разі регулювання горіння пожежною навантагою КП є більш ефективною, зокрема досягала ліквідація горіння. При цьому під час застосування водяного туману необхідно було тимчасово припинити гасіння із-за недостатньої видимості та великої температури пару, що ускладнювало доступ до вогнища. Авторами [31] проведено випробування гасіння компресійною піною твердих горючих матеріалів у моделі житлового приміщення (кімнати). За допомогою датчиків (термопар) вимірювалась температура у приміщенні до гасіння компресійною піною, та після гасіння. Також за дорогою тепловізорів оцінено охолоджувальну здатність компресійної піни. Порівнювали ефективність гасіння сухою та мокрою піною з різними типами піноутворювачів (AR, Class A, Class B) та їх концентрацію в межі від 0,1 % до 1 %. Найменший час гасіння зафіксовано для мокрої піни із концентрацією піноутворювача 0,3 % Class A.

За результатом огляду наукових праць можна зробити висновок, що на сьогодні не відомі дослідження присвячені застосуванню компресійної піни, у складі якої застосовуються модифіковані добавки, і вивчення їх впливу на вогнегасну ефективність

Висновки

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, які присвячено підвищенню вогнегасної ефективності компресійної піни за рахунок варіювання кратності та концентрації водного розчину піноутворювача, зміни співвідношення повітря/концентрація піноутворювача, застосування різних видів піноутворювачів при гасінні пожеж твердих горючих матеріалів. На сьогодні відсутні дослідження спрямовані на підвищення ефективності компресійної піни за рахунок додавання до її складу модифікованих добавок.

Наступним завданням є аналіз фізико-хімічних властивостей модифікованих добавок та їх застосування у водних вогнегасних речовинах.

Література

1. Антонов А.В. *Звіт про науково-дослідну роботу «Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання» / А.В. Антонов та інші. - К.: УкрНДЦЗ ДСНС України. – 2015. - 147 с.*
2. Шахов С.М. *«Провести пошукові дослідження з відпрацювання складу вогнегасної речовини у вигляді компресійної піни («ПІНА – К»)» / С.М. Шахов, О.Ф. Нікулін, А.І. Кодрик, О.М. Тітенко. - К.: УкрНДЦЗ, ДСНС України, Звіт про науково-дослідну роботу. – 2018. - 259 с.*
3. Шахов С.М. *Підвищення ефективності використання компресійної піни для гасіння пожеж класу А»: дис.... докт. філос. (PhD). / С.М. Шахов. - Харків, 2021.. Режим доступу: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/spetsializ_ovani-vcheni-rady/261/003/shahov_an.pdf;*
4. *Електронний ресурс. Режим доступу: <https://acaftsystems.com/>*
5. *NFPA 1145. (2011). Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting. P. 1–34. Режим доступу: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1145>*
6. Dong–Ho R., Jang–Won L., Seonwoong K. (2016). *Class B Fire–Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Differen Air–to–Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. Applied Science. Vol. 6 (191). P. 2–12. doi: 10.3390/app6070191*
7. Jing–yuan C., Mao X. (2014). *Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. Procedia Engineering. № 71. P. 44–56. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.007*
8. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Shanjun Mu, Xuqing Lang, Jingwu Wang, Yongming Zhang. (2020). *A theoretical and experimental study of extinguishing compressed air foam on an n-heptane storage tank fire with variable fuel thickness. Process Safety and Environmental Protection. Volume 138. P. 117-129. doi: 10.1016/j.psep.2020.03.011.*
9. Wang Yueyong, Yang Zhen, Gao Xuhui, Xiao Liang. (2022). *Experimental study on fire suppression and burn resistance of compressed air foam. Fire Science and*

- Technology. 41(11). P. 1542-1546. Режим доступу: www.xfkj.com.cn/EN/Y2022/V41/I11/1542
10. G., Kim A. (2004). Comprasion of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Sopution. Research Report. P. 1–25. doi:10.4224/20378347
11. Жуйков Д.А. Повышение эффективности применения мобильных средств пожаротушения с использованием компрессионной пены для обеспечения пожарной безопасности объектов военной инфраструктуры и воинских подразделений. / Д.А. Жуйков, Н.Н. Старков, А.А. Триполицын // Военный инженер. - №3 (13). – 2019. Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-primeneniya-mobilnyh-sredstv-pozharotusheniya-s-ispolzovaniem-kompressionnoy-peny-dlya-obespecheniya> (дата звернення: 07.12.2022).
12. CHEN Tao , HU Cheng , BAO Zhi - ming , XIA Jian - jun , ZHANG Jia - qing , HUANG Yong. (2020). Extinguishing property of compressed air foam on bushing turret spill fire of transformer. Fire Science and Technology. 39(7): 962-965. Режим доступу: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/962>
13. Tao Chen, Xue-cheng Fu, Zhi-ming Bao, Jian-jun Xia, Rong-ji Wang. (2018). Experimental Study on the Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam Sprinkler System on Oil Pool Fire. Procedia Engineering. Volume 211. P. 94-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.142>.
14. Zhisheng Xu, Xing Guo, Long Yan, Wendong Kang. (2020). Fire-extinguishing performance and mechanism of aqueous film-forming foam in diesel pool fire. Case Studies in Thermal Engineering. Volume 17. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100578>.
15. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Xuqing Lang, Shanjun Mu, Yongming Zhang, Jingwu Wang. (2021). 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, Volume 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104533>.
16. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Xuqing Lang, Shanjun Mu, Yongming Zhang, Jingwu Wang. (2021). 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, Volume 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104533>
17. ZHANG Xian-zhong, BAO Zhi-ming, JING Li-shuai, CHEN Yang. (2020). Experimental study on fire extinguishing with alcohol-resistant compressed air foam. Fire Science and Technology. 39(9): 1271-1273. Режим доступу: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I9/1271
18. YANG Zhen-ming, CHEN Tao, HU Cheng, BAO Zhi-ming. (2020). A study of fire extinguishing performance of compressed air foam on rim seal fire for floating roof tanks. Fire Science and Technology. 39(5): 641-645. Режим доступу: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/641
19. Zhao, M., Ni, X., Zhang, S., Cao, W., Guan, Y., Liang, C., Wang, X., and Zhang, H. (2016) Improving the performance of fluoroprotein foam in extinguishing gasoline pool fires with addition of bromofluoropropene. Fire Mater., 40: 261– 272. doi: 10.1002/fam.2284.
20. CHEN Tao, HU Cheng, BAO Zhi-ming, FU Xue-cheng, WANG Rong-ji, XIA Jian-jun. (2020). Comparison of the fire extinguishing performance of different types of compressed gas foam on class B fires [J]. Fire Science and Technology, 39(5): 645-648. Режим доступу: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/645
21. Zhaoqian Li, Hongqing Zhu, Jinlong Zhao, Yilong Zhang & Lintao Hu. (2022). Experimental Research on the Effectiveness of Different Types of Foam of Extinguishing Methanol / Diesel Pool Fires, Combustion Science and Technology, DOI: 10.1080/00102202.2022.2125306
22. Tim Rappsilber, Simone Krüger. (2018). Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. Fire Safety Journal. Volume 98. P. 3-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.004>
23. Грачулин А.В. Тушение пожаров пеногенерирующими системами сжатым воздухом. / А.В. Грачулин, А.Н. Камлюк, О.Д. Навроцки // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. - № 1. - С.44–53. doi:10.33408/2519-237X.2017.1-1.44
24. Tim Rappsilber, Philipp Below, Simone Krüger. (2019). Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range. Fire Safety Journal. Volume 106. P. 136-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.014>
25. Шахов С.М. Визначення вознегасної ефективності компресійної піни під час гасіння нею твердих горючих речовин. / С.М. Шахов, С.А. Виноградов, А.І. Кодрик, О.М. Тітенко // Проблеми пожежної безпеки. - Вип. 46. – 2019. - С. 199–205. Режим доступу : <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12273>
26. Шахов С.М. Визначення показника вознегасної здатності компресійної піни. / С.М. Шахов, С.А. Виноградов, А.І. Кодрик, О.М. Тітенко // Проблеми пожежної безпеки. - Вип. 47. – 2020. - С. 199–205. Режим доступу: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12275>
27. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. (2020). The efficiency of the compressed air foam, water and gel extinguishing agent on the standard model fire class A. Safety & Fire Technology. Issue 1(56). P. 154–160. doi: 10.12845/sft.55.1.2020.10
28. Wang X., Liao Y., Lin I. (2009). Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi-component compressed air foam. Chinese Science Bulletin. Vol. 54. Issue 3. P. 492–496. doi:10.1007/s11434-008-0571-3
29. Young-Ki Lee, Yun-Seok Kim, Yoon-Soon Kang, Dong-Ho Rie. (2017). A Study on the Evaluation of Fire Extinguishing Performance of a Synthetic Surfactant Compressed Air Foam with Scaled Model. Korean Soc Hazard Mitig. 17(6): 269-276. doi: doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.269
30. Zhang J, Delichatsios M, O' Neill A. (2011) Assessment of gas cooling capabilities of compressed air foam systems in fuel- and ventilation-controlled compartment fires. Journal of Fire Sciences. 29(6):543-554. doi:10.1177/0734904111412486
31. Adam Thomitzek , Jan Ondruch , Dana Chudová, Petr Kučera. (2015) Effects of compressed air foam application on heat conditions in fire within a closed space. Safety engineering series, issn 1805-3238. vol. x, no. 2, pp. 20 - 25, doi 10.1515/tvsbes-2015-0009

References

- Antonov A.V. (2015). To conduct research on the disclosure of the features of the processes of stopping the burning of combustible substances during the use of modern fire extinguishing substances and technologies of their supply. Report on the scientific research work. P. 147.
- Shakhov S.M, Nikulin O.F., Kodryk A.I., Titenko O.M. (2018). Conduct exploratory research on working out the composition of a fire extinguishing agent in the form of compression foam. Report on scientific and research work. P. 259.
- Shakhov S.M. (2021). Increasing the efficiency of using compression foam for extinguishing class A fires. Doctor of Philosophy thesis. (PhD). Retrieved from: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/spetsializ_ovani-vcheni-rady/261/003/shahov_an.pdf

4. ACAF Systems, (2020). The process of generating compression foam in CAFS systems. Retrieved from: <https://acafsystems.com/>
5. NFPA 1145. (2011). Guide for the Use of Class A Foams in Manual Structural Fire Fighting. P. 1–34. Retrieved from: <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=1145>
6. Dong–Ho R., Jang–Won L., Seonwoong K. (2016). Class B Fire–Extinguishing Performance Evaluation of a Compressed Air Foam System at Different Air–to–Aqueous Foam Solution Mixing Ratios. *Applied Science*. Vol. 6 (191). P. 2–12. doi: 10.3390/app6070191
7. Jing–yuan C., Mao X. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*. № 71. P. 44–56. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
8. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Shanjun Mu, Xuqing Lang, Jingwu Wang, Yongming Zhang. (2020). A theoretical and experimental study of extinguishing compressed air foam on an n-heptane storage tank fire with variable fuel thickness. *Process Safety and Environmental Protection*. Volume 138. P. 117-129. doi: 10.1016/j.psep.2020.03.011.
9. Wang Yueyong, Yang Zhen, Gao Xuhui, Xiao Liang. (2022). Experimental study on fire suppression and burn resistance of compressed air foam. *Fire Science and Technology*. 41(11). P. 1542-1546. Retrieved from: www.xfkj.com.cn/EN/Y2022/V41/I11/1542
10. G., Kim A. (2004). Comparison of the Fire Suppression Performance of Compressed – Air Foam with Air Aspirated and Unexpanded Foam Water Solution. Research Report. P. 1–25. doi:10.4224/20378347
11. Zhuykov D.A., Starkov N.N., Tripolitsyn A.A. (2019). Increasing the efficiency of the use of mobile fire extinguishing means using compression foam to ensure fire safety of military infrastructure facilities and military units. Retrieved from: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-primeneniya-mobilnyh-sredstv-pozharotusheniya-s-ispolzovaniem-kompressionnoy-peny-dlyaobespecheniya>.
12. CHEN Tao, HU Cheng, BAO Zhi - ming, XIA Jian - jun, ZHANG Jia - qing, HUANG Yong. (2020). Extinguishing property of compressed air foam on bushing turret spill fire of transformer. *Fire Science and Technology*. 39(7): 962-965. Retrieved from: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/962>
13. Tao Chen, Xue-cheng Fu, Zhi-ming Bao, Jian-jun Xia, Rong-ji Wang. (2018). Experimental Study on the Extinguishing Efficiency of Compressed Air Foam Sprinkler System on Oil Pool Fire. *Procedia Engineering*. Volume 211. P. 94-103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.142>.
14. Zhisheng Xu, Xing Guo, Long Yan, Wendong Kang. (2020). Fire-extinguishing performance and mechanism of aqueous film-forming foam in diesel pool fire. *Case Studies in Thermal Engineering*. Volume 17. P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100578>.
15. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Xuqing Lang, Shanjun Mu, Yongming Zhang, Jingwu Wang. (2021). 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*, Volume 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104533>.
16. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Xuqing Lang, Shanjun Mu, Yongming Zhang, Jingwu Wang. (2021). 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*, Volume 72. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104533>
17. ZHANG Xian-zhong, BAO Zhi-ming, JING Li-shuai, CHEN Yang. (2020). Experimental study on fire extinguishing with alcohol-resistant compressed air foam. *Fire Science and Technology*. 39(9): 1271-1273. Retrieved from: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I9/1271
18. YANG Zhen-ming, CHEN Tao, HU Cheng, BAO Zhi-ming. (2020). A study of fire extinguishing performance of compressed air foam on rim seal fire for floating roof tanks. *Fire Science and Technology*. 39(5): 641-645. Retrieved from: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/641
19. Zhao, M., Ni, X., Zhang, S., Cao, W., Guan, Y., Liang, C., Wang, X., and Zhang, H. (2016) Improving the performance of fluoroprotein foam in extinguishing gasoline pool fires with addition of bromofluoropropene. *Fire Mater.*, 40: 261–272. doi: 10.1002/fam.2284.
20. CHEN Tao, HU Cheng, BAO Zhi-ming, FU Xue-cheng, WANG Rong-ji, XIA Jian-jun. (2020). Comparison of the fire extinguishing performance of different types of compressed gas foam on class B fires [J]. *Fire Science and Technology*, 39(5): 645-648. Retrieved from: www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I5/645
21. Zhaoqian Li, Hongqing Zhu, Jinlong Zhao, Yilong Zhang & Lintao Hu. (2022). Experimental Research on the Effectiveness of Different Types of Foam of Extinguishing Methanol / Diesel Pool Fires. *Combustion Science and Technology*, DOI: 10.1080/00102202.2022.2125306
22. Tim Rappsilber, Simone Krüger. (2018). Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. *Fire Safety Journal*. Volume 98. P. 3-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.004>
23. Grachulin A.V., Kamlyuk A.N., Navrotsky O.D. (2017). Extinguishing fires with foam-generating systems with compressed air. *Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus*. No. 1. - P. 44–53. doi:10.33408/2519-237X.2017.1-1.44.
24. Tim Rappsilber, Philipp Below, Simone Krüger. (2019). Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range. *Fire Safety Journal*. Volume 106. P. 136-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.014>
25. Shakhov S.M., Vynogradov S.A., Kodryk A.I., Titenko O.M. (2019). Determining the fire-extinguishing efficiency of compression foam when extinguishing solid combustible substances with it. *Problems of fire safety*. Vol. 46. P. 199–205. Retrieved from: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12273>
26. Shakhov S.M., Vinogradov S.A., Kodryk A.I., Titenko O.M. (2020). Determination of the fire extinguishing capacity of compression foam. *Problems of fire safety*. Vol. 47. P. 199–205. Retrieved from: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/12275>
27. Shakhov S.M., Vinogradov S.A. (2020). The efficiency of the compressed air foam, water and gel extinguishing agent on the standard model fire class A. *Safety & Fire Technology*. Issue 1(56). P. 154–160. doi: 10.12845/sft.55.1.2020.10
28. Wang X., Liao Y., Lin I. (2009). Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi–component compressed air foam. *Chinese Science Bulletin*. Vol. 54. Issue 3. P. 492–496. doi:10.1007/s11434-008-0571-3
29. Young-Ki Lee, Yun-Seok Kim, Yoon-Soon Kang, Dong-Ho Rie. (2017). A Study on the Evaluation of Fire Extinguishing Performance of a Synthetic Surfactant Compressed Air Foam with Scaled Model. *Korean Soc Hazard Mitig.* 17(6): 269-276. doi: doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.269
30. Zhang J, Delichatsios M, O' Neill A. (2011) Assessment of gas cooling capabilities of compressed air foam systems in fuel- and ventilation-controlled compartment fires. *Journal of*

Fire Sciences. 29(6):543-554.
doi:10.1177/0734904111412486
31. Adam Thomitzek , Jan Ondruch , Dana Chudová, Petr Kučera. (2015) Effects of compressed air foam application on heat conditions in fire within a closed space. *Safety engineering series*, issn 1805-3238. vol. x, no. 2, pp. 20 - 25, doi 10.1515/tvsbses-2015-0009.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.А. Тарасенко, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

Автор: ШАХОВ Станіслав Михайлович
доктор філософії з галузі "Пожежна безпека"
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – lophennss@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3914-2914>

Автор: ВІНОГРАДОВ Станіслав Андрійович
кандидат технічних наук, доцент
Національний університет цивільного захисту України
E-mail – vynogradovs@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2569-5489>

Автор: ГРИЩЕНКО Дмитро Володимирович
ад'юнкт
Національний університет цивільного захисту України, Україна
E-mail – grishchenko.pb@gmail.com
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7241-737X>

ANALYSIS OF WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF COMPRESSED AIR FOAM FOR EXTINGUISHING SOLID MATERIALS

S. Shakhov, S. Vinogradov, D. Grishenko

National University of civil defence of Ukraine, Ukraine

Conduct an analysis of scientific periodicals regarding the use and improvement of the fire extinguishing efficiency of compression foam. The work was carried out on the basis of the analysis of scientific periodicals, experimental studies of scientists from the European Union, the USA, China and other countries, the results of which were presented in scientific publications, conferences and reports. Conclusions. An analysis of scientific publications devoted to the use of compression foam in firefighting and increasing its fire-fighting efficiency was carried out. It was found that the majority of research is aimed at studying the fire-extinguishing effectiveness of compression foam when extinguishing flammable liquids. In turn, there are studies devoted to increasing the fire-fighting efficiency of compression foam by varying the multiplicity and concentration of the aqueous solution of the foaming agent, changing the ratio of air/foaming agent solution, and the use of various types of foaming agents when extinguishing fires of solid combustible materials. To date, there are no studies aimed at increasing the efficiency of compression foam by adding modified additives to its composition. The result of the research is the identification of ways to increase the efficiency of compression foam today, due to which the direction of further research aimed at increasing the fire-extinguishing efficiency of the foam in other ways is revealed. The practical value lies in solving the actual problem of fire safety, namely increasing the efficiency of extinguishing fires of solid combustible substances, due to the use of compression foam. Thanks to the results of the analysis of further development, effective use of compression foam is acquired, the fire-extinguishing capacity of which can be increased by using modified additives in its composition. This provides an opportunity to expand the mechanisms of influence of the fire-extinguishing effect of compression foam on the burning process of solid combustible materials.

Keywords: modified additives, compressed air foam, fire extinguishing, civil safety, fire safety.