

УДК 614.8

С. А. Виноградов, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID0000-0003-2569-5489)

С. М. Шахов, PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0003-3914-2914)

О. Г. Поліванов, викл. каф. (ORCID 0000-0002-6396-1680)

Д. І. Савельєв, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-8228-1744)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ТА ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

За допомогою математичної моделі процесу генерування та подавання компресійної піни, інтегрованої у програмне середовище MathLab проведено дослідження впливу технічних параметрів системи компресійної піни, зокрема тиску в системі, розміру повітряного та рідинного сопла на її кратність. На сьогодні поза увагою залишились не вирішена частина проблеми проектування цих систем, яка полягає у дослідженні впливу її технічних параметрів на властивості піни, а саме на її кратність, від якої залежить вогнегасна ефективність. Встановлено, що за збільшенням тиску від 4 до 6 бар, а також підвищенні діаметру рідинного сопла від 4 мм до 8 мм спостерігається зменшення кратності на 136 %. При подальшому підвищенні тиску до 8 бар та збільшенні діаметру водяного сопла до 12 мм спостерігається зниження кратності на 85 %. У разі підвищення тиску та збільшенні діаметру сопла для подавання повітря у 1,5 рази, спостерігається підвищення кратності майже у 2,5 рази та становить 18. У разі підвищення тиску у 2 рази та збільшення розміру отвору для подавання повітря на 200 % від нижніх рівнів чинників спостерігається підвищення кратності майже у 4,5 разів. У разі збільшення або зменшення водяного сопла відповідно зменшується або зростає кратність піни. Зміна кратності від зміни діаметра повітряного сопла має обернено пропорційний характер відносно водяного сопла, а саме за збільшення або зменшення діаметра повітряного сопла кратність відповідно зростає або зменшується. За сталого тиску та змінних діаметрів рідинного та повітряного сопел результати схожі – чим більше діаметр повітряного та чим менше діаметр водяного сопла, тим більше кратність піни. Отримані результати у вигляді регресійних рівняння є важливими, оскільки дозволяють визначати потрібні параметри систем генерування та подавання компресійної піни в залежності від того, піну якої кратності необхідно отримати.

Ключові слова: компресійна піна, процес генерування, пожежогасіння, система генерування та подавання компресійної піни

1. Вступ

Для пін, які застосовують у пожежогасінні, до основних їх властивостей відносять кратність, стійкість, дисперсність і однорідність. У разі отримання піни повітряно-механічним способом за збільшенням кратності зростає і середній діаметр бульбашок. При цьому за збільшенням кратності піни товщина плівок між бульбашками зменшується. Отже, зі збільшенням кратності повітряно-механічна піна стає низько дисперсною, а її стійкість зменшується, наслідком чого є зниження її вогнегасної здатності.

Сучасним способом отримання вогнегасної піни є подавання повітря під тиском до розчину піноутворювача, наслідком чого є утворення компресійної піни. Така піна має більшу стійкість та вогнегасну ефективність. Для компресійної піни взаємозв'язок кратності та дисперсності є прямо пропорційним – чим вище кратність, тим вище її дисперсність і стійкість. Таким чином, для компресійної піни саме кратність є ключовою характеристикою, що визначає галузь застосування компресійної піни та її фізичні параметри. Оскільки компресійна піна створюється в системах із використанням стислого повітря, взаємозв'язок технічних параметрів цієї системи визначає кратність компресійної піни.

Таким чином, генерування компресійної піни із заданою кратністю та вогнегасною ефективністю є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

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

Найбільшу кількість відомих досліджень присвячено використанню компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин. У роботі [1] оцінювалася вогнегасна ефективність системи генерування і подавання компресійної піни за різних співвідношень кількості стисненого повітря і водного розчину піноутворювача для гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням плівкоутворювального піноутворювача (AFFF) з концентрацією робочого розчину 3 %. Експериментально визначено, що співвідношення 1:7 за однакових умов є найбільш ефективним. Але авторами не вивчено, як саме пливає тиск на кратність піни що генерується, і за яких технічних умов системи отримано піну кратністю 7.

У роботі [2] вивчено вплив типу пінних бульбашок компресійної піни на тривалість гасіння пожежі. Як джерело запалювання використовували бензин. Концентрація піноутворювача змінювалася від 0,4 % до 1 %, витрата розчину піноутворювача – від 0,35 м³/год. до 1,7 м³/год., а витрата стисненого повітря – від 2,2 г/с до 2,7 г/с. Виділено три типи пінних бульбашок: мокрі, середні та сухі. При цьому менша тривалість гасіння спостерігалася у випадку застосування «сухої» піни. Слід зауважити, що тип пінних бульбашок на пряму залежить від кратності піни, і не зрозуміло як само автори змінювали цю кратність у системі генерування та подавання компресійної піни: тиском, кількістю повітря, відповідним співвідношенням концентрації піноутворювача та води тощо. В роботі не достатньо висвітлено як само, і якими параметрами системи було вчинено вплив на тип пінних бульбашок.

У роботі [3] авторами проведено дослідження з вивчення формування піни під час пропускання водного розчину піноутворювача через пористе тіло. Було відзначено, що зі збільшенням швидкості потоку зменшується діаметр пінної бульбашки. Встановлено, що розміри пор відіграють велику роль у формуванні розміру бульбашки. Промодельоване залежності розмірів діаметрів бульбашки від конструкційного виконання пористого тіла. Отримані залежності свідчать, про важливий вплив елементів пористих тіл камери змішування, на дисперсність компресійної піни, що генерується, але в першу чергу на дисперсність впливає кратність, яку можливо змінювати завдяки варіювання параметрів системи генерування та подавання компресійної піни, що не знайшло відображення науковому добутку цих авторів.

У роботі [4] проаналізовано існуючі способи вводу повітря в камеру змішування у системах генерування та подавання компресійної піни (СКП). Серед основних конструктивних рішень визначено два найбільш розповсюджених способи: вертикальне і коаксіальне газорідинне змішування. Експериментальним способом визначено більш ефективний спосіб введення повітря в камеру. Результати показали що піна, яка утворена за допомогою коаксіального (співвісного) способами змішування, володіє більш ефективними вогнегасними властивостями, ніж піна, утворена шляхом вертикального введення повітря в камеру змішування. Але авторами не було визначено, як впливають технічні параметри системи на властивості компресійної піни під час проходження камери змішування, який вплив має діаметри отворів, через які відбувається подавання повітря і розчину піноут-

ворювача на кратність компресійної піни.

У дослідженні [5] порівнюється вогнегасна ефективність компресійної піни (CAF) із звичайними засобами пожежогасіння. 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. Отримано результати про склад продуктів згорання залежно від тактики гасіння пожежі. Результати показали, що в умовах випробувань компресійна піна мала найбільшу вогнегасну у порівнянні з водою та водним розчином піноутворювача. Результати містять вагомий внесок з питання використання ефективної концентрації піноутворювача, але не зрозуміло, як на кратність піни, від якої залежить ефективність гасіння, впливає тиск у системі або співвідношення повітря та розчину піноутворювача у застосованому пристрої генерування та подавання компресійної піни.

Щодо застосування компресійної піни для гасіння твердих горючих речовин можна вказати, що в роботі [6] проведено порівняння ефективності гасіння таких пожеж компресійною та повітряно-механічною піною низької кратності. Результати показали, що на гасіння вогнища пожежі компресійною піною необхідно удвічі менше води та удвічі менше часу. Але у роботі поза увагою залишилося вивчення впливу технічних параметрів системи, яка використовувалась для генерування та подавання, визначення яких сприяло би підвищенню ефективності використання компресійної піни.

Дослідження [7] присвячене порівнянню ефективності пожежогасіння чотирьох найбільш поширених засобів в однакових умовах. Випробування проводились із використанням стандартних модельних вогнищ 5 А, 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. Слід зауважити, що від кратності залежить її вогнегасна ефективність. Але поза увагою залишилось дослідження впливу технічних параметрів системи на кратність піни, що генерується.

Авторами [8] було вперше досліджено фізико-хімічні властивості компресійної піни під час гасіння пожежі в резервуарі на основі механізму керування швидкістю горіння. Було виявлено, що при використанні фтор вуглеводних поверхнево-активних речовин, піні притаманна збільшена товщина плівки і нижчий коефіцієнт дифузії. Було запропоновано концепцію ефективного та повного часу гасіння, обидва з яких зменшуються зі збільшенням швидкості подавання піни. При меншій товщині палива швидкість його горіння була меншою, а час гасіння більшим. Але не було досліджено вплив технічних параметрів системи генерування компресійної піни на її кратність.

У роботі [9] порівняно експлуатаційні характеристики повітряно-механічної та компресійної піни за допомогою стаціонарної системи пожежогасіння. Бензин марки А-92 використано як модельне вогнище. Завдяки отриманим результатам встановлено, що компресійній піні притаманна біла стійкість у порівнянні з пові-

ряно-механічною. Автори стверджують, що компресійна має більш міцну і водночас тонку плівку. Підтверджено, що за рахунок використання стиснутого повітря, можливе генерування високодисперсною піни, яка рівномірно покриває дзеркало горючої рідини.

За результатом огляду наукових праць можна зробити висновок, що їх переважна кількість спрямована на вивчення вогнегасної ефективності компресійної піни під час гасіння різних речовин, в залежності від типів та концентрації піноутворювачів та кратності піни, що використовується за допомогою систем генерування та подавання компресійної піни. При цьому в експериментальних дослідженнях застосовуються системи генерування та подавання компресійної піни з різними параметрами.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність встановлених закономірностей впливу технічних параметрів систем генерування та подавання компресійної піни на її кратність.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є визначення впливу технічних параметрів системи генерування та подавання компресійної піни на кратність її кратність.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- дослідити залежність зміни кратності компресійної піни від тиску та розміру рідинного сопла системи
- дослідити залежність зміни кратності компресійної піни від тиску та розміру газового сопла системи
- дослідити залежність зміни кратності компресійної піни від розмірів газового та рідинного сопел системи.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є технічні параметри систем генерування та подавання компресійної піни та процеси їх впливу на кратність компресійної піни.

Основна гіпотеза полягає в тому, що від технічних параметрів системи генерування та подавання компресійної піни залежить її кратність..

Для дослідження використовували математичну модель розроблену у [10]. Моделювання здійснюється у графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink, яке інтегроване у програмне середовище MatLab.

Це дозволяє за допомогою окремих блоків у вигляді направлених графів [10], будувати динамічні моделі, є досить зручним інструментом для вирішення таких проблем у випадку описання стаціонарних та перехідних процесів при проектуванні конструкцій. Структура такої моделі побудована на основі окремих, самостійних блоків, що самі по собі є окремими ММ. Кількість таких блоків може змінюватися, самі блоки можуть модернізуватись, вдосконалюватись.

До вхідних параметрів математичної моделі процесу генерування компресійної піни в системі відносять:

- « p_{comp} » – тиск на виході компресора, Па;
- « d_{liq} » – діаметр рідинного сопла, м;
- « d_{air} » – діаметр газового сопла, м;
- « T » – температура навколишнього середовища, К;
- « D_g » – діаметр піногенеруючої вставки, м;
- « L_g » – довжина піногенеруючої вставки, м;

- «epsilon» – порозність пористого тіла;
- «h_s» – товщина піногенеруючих елементів, м;
- «b_s» – ширина піногенеруючих елементів, м;
- «D_pipe» – внутрішній діаметр шланга, м;
- «L_Pipe» – довжина шланга, м;
- «D_pistol» – внутрішній діаметр каналу пістолета-перемикача, м;
- «L_pistol» – довжина каналу пістолета-перемикача, м;
- «p_atm» – нормальний атмосферний тиск, Па.

Вихідними даними є:

- «Q_liq» – потік рідинної фази газорідного потоку (об'ємна витрата), м³/с;
- «Q_air» – потік газової фази газорідного потоку (об'ємна витрата), м³/с;
- «k_m» – кратність піни.

Аналізуючи термодинамічні процеси, вхідні та вихідні параметри та основні принципи побудови систем генерування та подавання піни можна зробити висновок, що визначальними параметрами, що впливають на властивості піни є:

- тиск на виході компресора;
- діаметр рідинного сопла;
- діаметр газового сопла.

Для реалізації мети був спланований експеримент за планом Бокса-Бенкена з допустимою точністю моделі 5 відсотків, в якому в якості чинників були обрані: P – тиск на виході компресора (x_1); D_{liq} – діаметр рідинного сопла (x_2); D_{air} – діаметр газового сопла (x_3). Метою експерименту було вивчення впливу тиску P, діаметрів рідинного d_{liq} та повітряного d_{air} сопел на кратність компресійної піни K.

На основі аналізу було здійснено вибір експериментальної області чинникового простору. У табл. 1 наведено значення рівнів чинників та інтервали варіюванні у кодованому значенні та результати.

Табл. 1. Значення рівнів чинників та інтервали варіювання

Найменування чинника	Рівень та значення чинника у досліді			Інтервал варіювання
	+1	0	-1	
тиск на виході компресора P, bar	8	6	4	2
діаметр рідинного сопла D_{liq} , мм	12	8	4	4
діаметр газового сопла D_{air} , мм	4	3	2	1

В якості нульового рівня чинника був обраний центр інтервалу, в якому проводили дослідження. Так само було обрано інтервал варіювання, значення верхнього та нижнього рівнів чинників у натуральному і кодованому вираженні.

5. Результати досліджень впливу технічних параметрів на кратність компресійної піни

У табл. 2 подано значення чинників, які використовували у математичній моделі, та результати кратності отриманої піни.

Після проведення дослідів було виконано статистичну обробку результатів. Під час обробки вихідних даних експерименту отримано відповідні поверхні відгуку та поліноміальні моделі у програмному середовищі «Statistica», які у подальшому надають змогу спростити проектування систем генерування та подавання компресійної піни.

Табл. 2. Результати кратності генерованої піни

№ досліду	Кодовані значення чинників			Натуральні значення чинників			K
	x ₁	x ₂	x ₃	P	D _{liq}	D _{air}	
1.	0	+1	+1	6	12	4	9,2
2.	0	+1	-1	6	12	2	3
3.	0	-1	+1	6	4	4	35
4.	0	-1	-1	6	4	2	19,45
5.	+1	+1	0	8	12	3	6,3
6.	-1	+1	0	4	12	3	4,7
7.	+1	-1	0	8	4	3	49
8.	-1	-1	0	4	4	3	27
9.	+1	0	+1	8	8	4	22,35
10.	-1	0	+1	4	8	4	17
11.	+1	0	-1	8	8	2	6,2
12.	-1	0	-1	4	8	2	4,7
13.	0	0	0	6	8	3	11,4
14.	0	0	0	6	8	3	11,4
15.	0	0	0	6	8	3	11,4

5.1. Результати зміни кратності від тиску та розміру рідинного сопла

На рис. 1 наведено графік впливу тиску на виході з компресора та розміру діаметру рідинного сопла на кратність компресійної піни під час її генерування.

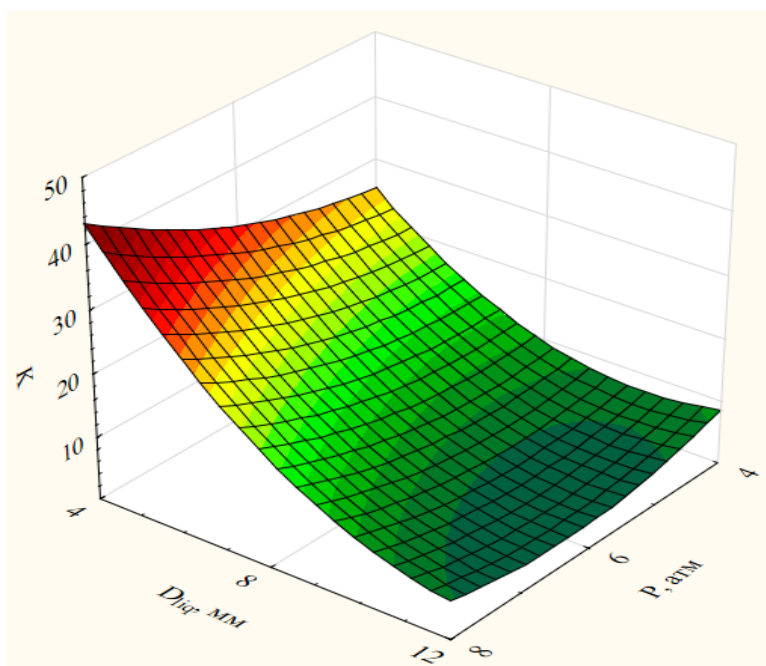


Рис. 1. Залежність кратності компресійної піни K від тиску компресора на виході та розміру рідинного D_{liq} сопла

Аналізуючи поверхню відгуку (рис. 1), яка відображає залежність впливу тиску на виході з компресора P та зміну діаметру рідинного сопла D_{liq}, встановлено, що збільшення тиску від 4 до 6 бар, а також підвищення діаметру рідинного сопла від 4 до 8 мм супроводжується зменшенням кратності на 136 %. Відносно підвищення значення рівнів чинників від нижнього рівня до верхнього спостерігається зменшення кратності піни майже у 4,2 рази. Поліноміальна модель, яка описує отриману залежність подана формулою:

$$K = 53,9763 - 2,8248 \cdot P - 6,9025 \cdot D_{liq} + 0,819 \cdot P^2 - 0,6375 \cdot D_{liq} + 0,461 \cdot D_{liq}^2. \quad (1)$$

При подальшому підвищенні тиску до 8 бар та збільшенні діаметру до 12 мм спостерігається зниження кратності на 85 %.

5.2. Результати зміни кратності від тиску та розміру газового сопла

На рис. 2 наведено поверхню відгуку, яка відображає вплив тиску компресора на виході та розмір сопла для подавання повітря у системі генерування та подавання компресійної піни на кратність піни, що генерується.

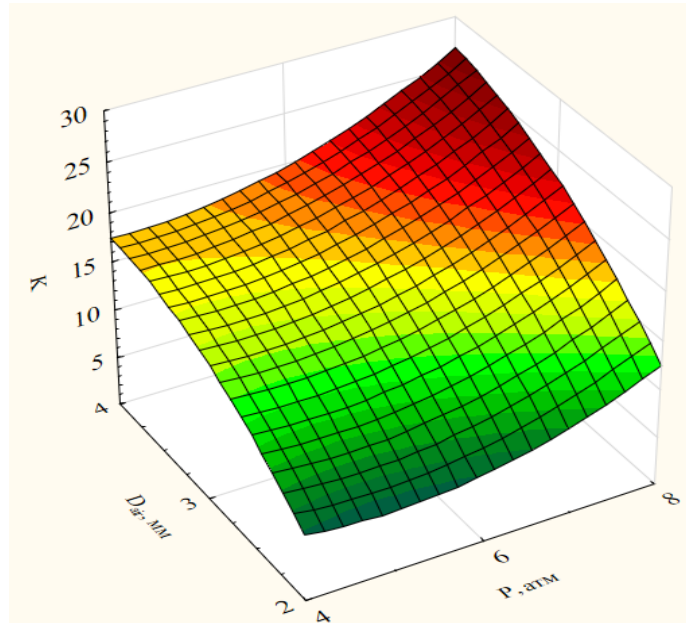


Рис. 2. Залежність кратності компресійної піни K від зміни діаметру повітряного D_{air} сопла та тиску на виході з компресора P

Поверхня відгуку (рис. 2), описує залежність зміни кратності піни від двох чинників, таких як тиск на виході з компресора P та розмір повітряного сопла D_{air} . Аналізуючи графік можна дійти висновку, що у разі підвищення тиску та збільшенні діаметру сопла для подавання повітря у 1,5 рази, у заданих умовах, спостерігається підвищення кратності майже у 2,5 рази та становить 18. Відповідне рівняння регресії:

$$K = -5,2764 - 7,2483 \cdot P + 18,4971 \cdot D_{air} + 0,6423 \cdot P^2 + 0,4812 \cdot D_{air} \cdot P - 2,5183 \cdot D_{air}^2. \quad (2)$$

У разі підвищення тиску у 2 рази та збільшення розміру отвору для подавання повітря на 200 % від нижніх рівнів чинників у табл. 1 спостерігається підвищення кратності майже у 4,5 рази.

5.3. Результати зміни кратності від розмірів газового та рідинного сопел

На рис. 3 зображено залежність кратності компресійної піни K від зміни діаметрів рідинного D_{liq} та повітряного D_{air} сопел.

Аналізуючи поверхню відгуку (рис. 3), найбільше кратність піни K спостерігається при нижньому рівні чинників (табл. 1) відповідно для отвору D_{liq} та верх-

ньому значенні чиннику для отвору D_{air} . Значення кратності у цьому випадку становить майже 50. У разі збільшення або зменшення водяного сопла D_{liq} відповідно зменшується або зростає кратність піни K . Відповідне рівняння регресії:

$$K = 15,3981 - 8,5831 \cdot D_{liq} + 24,1673 \cdot D_{air} + 0,4365 \cdot D_{liq}^2 - 0,5844 \cdot D_{air} \cdot D_{liq} - 2,2029 \cdot D_{air}^2. \quad (3)$$

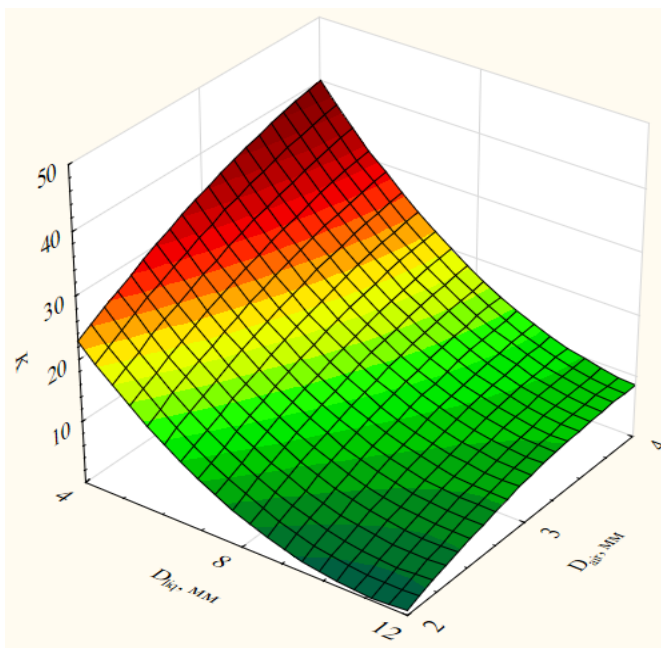


Рис. 3. Залежність кратності компресійної піни K від зміни діаметрів рідинного D_{liq} та повітряного D_{air} сопел

Отже, виходячи з аналізу графіка, встановлено, що на кратність піни K впливає пропускна здатність водяного D_{liq} і повітряного D_{air} сопел.

6. Обговорення результатів впливу технічних параметрів на кратність генерованої піни

Мета роботи вирішувалась шляхом математичного моделювання впливу технічних параметрів системи (табл. 2), на кратність компресійної піни.

Відповідно до результатів експерименту (рис. 1), встановлено, що кратність піни підвищується при зменшенні діаметру водяного сопла і збільшенні тиску компресора. Встановлена залежність зменшення кратності отриманої піни обумовлена підвищенням пропускної здатності рідинного отвору, за рахунок збільшення його діаметру, а також підвищення швидкості повітря, яке потрапляє у камеру змішування, під час процесу генерування компресійної піни. Залежність, що подано на рис. 2, свідчить, що суттєвий вплив на збільшення кратності, під час процесу генерування компресійної піни систем генерування та подавання компресійної піни, має місце пропускна спроможність отвору для подавання повітря. Також позитивний вплив на підвищення кратності має збільшення тиску на вході з компресора. Зміна кратності від зміни діаметра повітряного сопла має обернено пропорційний характер відносно водяного сопла, а саме за збільшенням або зменшенням діаметра повітряного сопла кратність відповідно зростає або зменшується, про свідчить отримана поверхня відгуку (рис. 3).

Регресійні рівняння (1–3), дозволять у подальшому визначати потрібні параметри систем генерування та подавання компресійної піни в залежності від того, піну якої кратності необхідно отримати.

До недоліків роботи слід віднести знехтування рештою параметрів системи, зокрема діаметру та довжини піногенеруючої вставки, порозності пористого тіла. Ці параметри в свою чергу також мають вплив на кратність піни, що генерується. У поточному дослідженні ці параметри прийняті сталими.

Подальші напрямки дослідження потрібно спрямувати на визначення впливу інших параметрів системи на властивості компресійної піни та їх взаємний вплив один на одного для оптимізації системи під конкретні задачі пожежогасіння.

7. Висновки

1. Досліджено залежність зміни кратності компресійної піни від тиску та розміру рідинного сопла системи. Максимальне значення кратності піни, що отримано під час експерименту, склало 44, а мінімальне – 1. Встановлено, що збільшення тиску на виході з компресора та збільшення діаметру рідинного сопла від нижньої межі до верхньої в рамках діапазону, що вивчається, за сталого діаметру повітряного сопла призводить до зменшення кратності піни майже у 4,2 рази.

2. Досліджено залежність зміни кратності компресійної піни від тиску та розміру газового сопла системи. Найбільший вплив на кратність піни здійснює розмір газового сопла. У разі підвищення тиску та збільшенні діаметру сопла для подавання повітря у 1,5 рази, при заданих умовах, спостерігається підвищення кратності майже у 2,5 рази та становить 18. У разі підвищення тиску у 2 рази та збільшення розміру отвору для подавання повітря на 200 % від нижніх рівнів, спостерігається підвищення кратності майже у 4,5 рази. У свою чергу, за сталого діаметру рідинного сопла, таке ж підвищення значень діаметру повітряного сопла та тиску призводить до збільшення кратності піну у 4,5 рази.

3. Досліджено залежність зміни кратності компресійної піни від розмірів газового та рідинного сопел системи. Найбільша кратність піни K спостерігається при діаметрі рідинного сопла 4 мм та газового сопла 3 мм, при постійному тиску у системі 8 атм. Значення кратності у цьому випадку становить майже 50. За сталого тиску та змінних діаметрів рідинного та повітряного сопел результати схожі – чим більше діаметр повітряного та чим менше діаметр водяного сопла, тим більше кратність піни.

Література

1. 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 Science*. 2016. Vol. 6(191). P. 2–12. doi: 10.3390/app6070191

2. Jing–yuan C., Mao X. Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*. 2014. № 71. P. 44–56. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.007

3. Dhruvad P. Experimental study of pressured ropan bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system. 2017. P. 1–135. URI: <https://hdl.handle.net/11124/171192>

4. Feng D. Analysis on Influencing Factors of the Gas–liquid Mixing Effect of

Compressed Air Foam Systems. *Procedia Engineering*. 2013. № 52. P. 105–111. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.113

5. Tim Rappsilber, Simone Krüger. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.004>

6. Грачулин А. В., Камлюк А. Н., Навроцки О. Д. Тушение пожаров пеногенерирующими системами со сжатым воздухом. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017. № 1. С. 44–53. doi:10.33408/2519-237X.2017.1-1.44

7. Tim Rappsilber, Philipp Below, Simone Krüger, 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.014>

8. Kun Wang, Jun Fang, Hassan Raza Shah, Shanjun Mu, Xuqing Lang, Jingwu Wang, Yongming Zhang. 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*. 2020. Vol. 138. P. 117–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.011>

9. Wang Yueyong, Yang Zhen, Gao Xuhui, Xiao Liang. Experimental study on fire suppression and burn resistance of compressed air foam [J]. *Fire Science and Technology*. 2022. Vol. 41(11). P. 1542–1546. URL: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2022/V41/I11/1542>

10. 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. doi:10.15587/2706-5448.2020.210375

S. Vinogradov, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

S. Shakhov, PhD, Lecturer of the Department

D. Saveliev, PhD, Lecturer of the Department

O. Polivanov, Senior Lecturer of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE GENERATION AND SUPPLY SYSTEMS OF COMPRESSED AIR FOAM

Based on the analysis of thermodynamic processes, input and output parameters and basic principles of construction of the system of generation and supply of compression foam, it was determined that the essential parameters are the pressure at the compressor outlet, the diameters of the liquid and gas nozzles. With the help of a mathematical model of the compression foam generation process, integrated into the MathLab software environment, a study of the influence of the parameters of the compression foam supply system on its multiplicity was carried out. It was established that an increase in pressure from 4 to 6 bar, as well as an increase in the diameter of the liquid nozzle from 4 to 8 mm, is accompanied by a decrease in multiplicity by 136 %. When the pressure is further increased to 8 bar and the diameter is increased to 12 mm, there is a decrease in the multiplicity by 85 %. In relation to the increase in the value of the factor levels from the lower level to the upper one, there is a decrease in the foam multiplicity by almost 4,2 times. In the case of increasing the pressure and increasing the diameter of the air supply nozzle by 1,5 times, under the given conditions, there is an increase in the multiplicity of almost 2,5 times and is 18. In the case of increasing the pressure by 2 times and increasing the size of the air supply hole by 200 % from the lower levels of the factors in Table 1, there is an increase in the multiplicity of almost 4.5 times. It was established that the foam multiplicity K is affected by the

throughput of water D_{liq} and air D_{air} nozzles. In the case of an increase or decrease in the water nozzle D_{liq} , the foam multiplicity K decreases or increases, respectively. The change in the multiplicity K from a change in the diameter of the air nozzle D_{air} is inversely proportional to the water nozzle D_{liq} , namely, for an increase or decrease in the diameter of the air nozzle d_a , the multiplicity K increases or decreases, respectively. Regression equations have been obtained, which allow further determination of the required parameters of systems for generating and supplying compression foam, depending on the foam of which multiplicity must be obtained.

Keywords: compression foam, generation process, fire extinguishing, compression foam generation and supply system

References

1. 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*, 6(191), 2. doi: 10.3390/app6070191
2. Jing–yuan, C., Mao, X. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*, 71, 44. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.007
3. Dhruvad, P. (2017). Experimental study of pressured ropan bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system, 135. URI: <https://hdl.handle.net/11124/171192>
4. Tim, R., Simone, K. (2018). Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. *Fire Safety Journal*, 98, 3. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.03.004>.
5. Grachulin, A. V., Kamlyuk, A. N., Navrocki, O. D., Grachulin, A. V. (2017). Tushenie pozharov penogeneriruyushchimi sistemami so szhatym vozduhom. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi*, 1, 44. doi:10.33408/2519-237X.2017.1-1.44
6. Feng, D. (2013). Analysis on Influencing Factors of the Gas–liquid Mixing Effect of Compressed Air Foam Systems. *Procedia Engineering*, 52, 105. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.113
7. Tim, R., Philipp, B., Simone, K. (2019). Wood crib fire tests to evaluate the influence of extinguishing media and jet type on extinguishing performance at close range. *Fire Safety Journal*, 106, 136. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.04.014>
8. Kun, W., Jun, F., Shanjun, M., Xuqing, L., Jingwu, W. (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*, 138, 117. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.011>
9. Wang, Y., Yang, Z., Gao, X., Xiao, L. (2022). Experimental study on fire suppression and burn resistance of compressed air foam. *Fire Science and Technology*, 41(11), 1542. URL: <http://www.xfkj.com.cn/EN/Y2022/V41/I11/1542>
10. Shakhov, S. M., Vinogradov, S. A., Kodrik, A. I., Titenko, O. M., Parkhomchuk, O. V. (2020). Mathematical modeling of gas-liquid flow in compressed air foam generation systems. *Technology audit and production reserves*, 4/3(54), 29. doi:10.15587/2706-5448.2020.210375

Надійшла до редколегії: 21.10.2022

Прийнята до друку: 17.11.2022