



С. М. Шахов¹, А. І. Кодрик², О. М. Тітенко², С. А. Виноградов¹

¹ Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна
² Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ КОМПРЕСИЙНОЇ ПІНИ

Розглянуто ефективний вогнегасний засіб у вигляді компресійної піни для боротьби з лісовими пожежами. На підставі аналізу експериментальних досліджень щодо ефективності компресійної піни над іншими вогнегасними речовинами, встановлено її переваги під час застосування у лісових масивах у разі виникнення пожеж. Спираючись на здійснений аналіз авторів, відзначено, що в країні немає зразків із технологією подачі компресійної піни. Розроблено математичну модель процесу генерування компресійної піни, яка у подальшому стане підґрунтям для виготовлення експериментального зразка системи для подачі компресійної піни. Найзручнішим інструментом для вирішення завдань з опису стаціонарних і перехідних процесів під час проектування конструкцій є сучасні програмні продукти. Графічне середовище імітаційного моделювання Simulink (інтегроване в програмне середовище MatLab) дає змогу за допомогою окремих блоків у вигляді направлених графів будувати динамічні моделі. Структура такої моделі побудована на підставі окремих, самостійних блоків, що самі по собі є окремими математичними моделями. Розроблена математична модель процесу генерування компресійної піни містить три окремі блоки. У цьому дослідженні виконано математичне моделювання роботи блоку газу, блоку подачі суміші води та піноутворювача та руху піни у рукаві. Кожний з блоків є автономною математичною моделлю зі своїм входом та виходом. За допомогою цих моделей здійснюється взаємодія між блоками в процесі виконання загальної задачі моделювання. Ці окремі блоки можна змінювати відповідно до змін конструкції установки, залишаючи тільки сталю зовнішню оболонку (кількість входів, виходів, розмірність) окремого блока. Наступним етапом дослідження є розроблення блоку піногенератора та системи комунікацій між блоками, для подальшої взаємодії цих блоків вже з розробленими блоками в цій роботі та виконання загальної задачі моделювання процесу генерування компресійної піни в системі. Під час взаємодії цих блоків буде виконуватися задача, яка полягає у визначенні необхідних технічних параметрів системи, залежно від вогнегасних властивостей компресійної піни, яку необхідно отримати.

Ключові слова: компресійна піна; математичне моделювання; система подачі компресійної піни; лісові пожежі.

Вступ

Однією з найактуальніших проблем зберігання лісів є виникнення пожеж на їх території. Водні вогнегасні речовини є найпоширенішими та застосовуються у 90 % випадків [5] під час гасіння деревини та твердих горючих матеріалів. З розвитком різноманітних технологій пожежогасіння та утворення нових речовин для боротьби з пожежами, вогнегасна ефективність води поступово стає не досить високою, порівняно з іншим вогнегасними складами. Останнім часом в Європі набули поширення системи для генерування компресійної піни CAFS (*Compressed Air Foam System*), що застосовуються для гасіння як рідких, так і твердих горючих речовин. Відомі роботи [16] спрямовані на застосування компресійної піни для гасіння вогню у лісових масивах. Автори роботи [17] підтвердили ефективність ком-

пресійної піни у боротьбі з низовими лісовими пожежами, відзначили можливість створення протипожежних бар'єрів, що є досить ефективним на початку горіння. Спираючись на аналіз [13], встановлено, що в Україні немає зразків систем для подачі компресійної піни. Світові зразки систем подачі компресійної піни мають різні параметри та характеристики піни [13]. Щоб отримати оптимальні параметри компресійної піни для гасіння пожеж твердих горючих речовин, зокрема і лісових масивів, потрібно побудувати математичну модель процесу генерування компресійної піни, що буде передувати безпосередньо конструюванню системи для її подачі.

Об'єктом дослідження є система подачі компресійної піни.

Предметом дослідження є методи і засоби встановлення взаємозв'язку параметрів у математичній моделі

Інформація про авторів:

Шахов Станіслав Михайлович, ад'юнкт, кафедра інженерної та аварійно-рятувальної техніки. Email: lophennss@gmail.com

Кодрик Анатолій Іванович, канд. техн. наук, начальник відділу інноваційних технологій. Email: kodrik@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0002-3787-5674>

Тітенко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, відділ інноваційних технологій.

Email: titenkoalex1954@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-4950-8580>

Виноградов Станіслав Андрійович, канд. техн. наук, доцент, заступник начальника кафедри інженерної та аварійно-рятувальної техніки. Email: vynogradovs@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2569-5489>

Цитування за ДСТУ: 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.

Citation APA: Shakhov, S. M., Kodryk, A. I., Titenko, O. M., & Vinogradov, S. A. (2020). Development of mathematical apparatus for designing compressed air foam generation systems. *Scientific Bulletin of UNFU*, 30(3), 111–115. <https://doi.org/10.36930/40300320>

процесу генерування компресійної піни, що дасть змогу розробити ефективний вогнегасний засіб для боротьби з лісовими пожежами.

Мета дослідження полягає у розробленні математичного забезпечення для проектування системи генерування компресійної піни як ефективного вогнегасного засобу для боротьби з лісовими пожежами.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

- здійснити побудову блоків математичної моделі процесу генерування компресійної піни: для подачі газу, суміші води та піноутворювача; для руху піни у рукаві;
- розробити окремі математичні моделі блоків, які сукупно під час взаємодії між собою виконують загальну задачу моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в тому, що було вперше розроблено математичні моделі блоків подачі газу, суміші води та піноутворювача, а також блоку руху піни у рукаві, які сукупно дають змогу розробити ефективний вогнегасний засіб для боротьби з лісовими пожежами.

Практична значущість отриманих результатів дослідження полягає у тому, що отримані математичні моделі блоків подачі газу, суміші води та піноутворювача та блоку руху піни у рукаві, під час їх об'єднання з іншими блоками, дадуть змогу виконувати розрахунки параметрів систем подачі компресійної піни залежно від кратності компресійної піни, яку необхідно отримати, дослідити вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни, а також здійснювати проектування систем генерування компресійної піни для гасіння пожеж різних класів.

Аналіз літературних джерел. Застосування компресійної піни є новим способом пожежогасіння. Тому кількість наукових робіт з цієї тематики значно менша порівняно з іншими напрямками пожежогасіння. Найбільша кількість відомих досліджень стосується використання компресійної піни для гасіння рідких горючих речовин. Так, у роботі [4] оцінено вогнегасну ефективність системи подачі компресійної піни при різних співвідношеннях кількості стисненого повітря і водного розчину піноутворювача для гасіння пожеж рідких горючих речовин з використанням плівкоутворювального піноутворювача AFFF (*Aqueous Film Forming Foam*) 3 %. Експериментально визначено, що співвідношення 1:7 за однакових умов є найефективнішим. Проте в роботі не було розроблено математичної моделі процесу утворення піни, що використовувалась. Досліджували тільки співвідношення 1:4, 1:7 та 1:10, тому не можна говорити про чистоту експерименту.

У роботі [14] досліджено вплив концентрації піноутворювача на ефективність гасіння модельних вогнищ пожеж твердих і рідких горючих речовин компресійною піною, де концентрації змінювались від 1,2 до 12 %. Випробування показали, що зниження концентрації піноутворювача від 12 % до 2,2 % зменшувало час гасіння більш ніж у 2 рази. З подальшим зниженням концентрації піна втрачала свої вогнегасні властивості і час гасіння підвищувався на 1,2 % та тривав 39 секунд. Проте в цих роботах не знайдено оптимальної концентрації піноутворювача в розчині з водою та не ставилось за мету розробити математичну модель процесу генерування компресійної піни.

У роботі [9] вивчено вплив типу пінних бульбашок системи CAFS на час гасіння пожежі. Як джерело загорання використовували бензин. Концентрація піноутворювача змінювалась від 0,4 до 1 %, швидкість подачі розчину піноутворювача – від 0,35 до 1,7 м³/год, а швидкість подачі стисненого повітря – від 2,2 до 2,7 г/с. Виділено три типи пінних бульбашок: мокрі, середні та сухі. При цьому найнижчий час гасіння спостерігався в разі застосування сухої піни. Автори не виконали жодних математичних моделювань процесу генерування компресійної піни.

Автор роботи [6] виконав експериментальні дослідження, внаслідок чого отримано дані за значеннями струмів витоку по струменю компресійної піни для різних показників від ствола до мішені, за різних значень напруги і показників кратності. Результати оброблено за допомогою методу множинної регресії й отримано залежності, які застосовані для розробки програмного забезпечення за визначенням можливості безпечного застосування компресійної піни для гасіння електрообладнання під напругою. Проте в роботі не розглядали питання моделювання генерування компресійної піни.

У роботі [15] дослідники визначили, що втрати тиску в рукавній лінії при подачі піни на висоту залежать від кратності піни і тиску в рукавній лінії, що було підтверджено дослідженням [7], яке показало, що за кратності піни 8,5 втрати тиску становлять 0,05 МПа на кожні 10 м висоти при висоті підйому піни до 250 м і тиску на насосі в 1,23 МПа. Отже, порівняно з повітряно-механічною піною, втрати тиску в рукаві зменшуються вдвічі. Особливості процесу генерування компресійної піни автори не розглядали.

У роботі [3] автори дослідили формування піни через пористе тіло. Відзначено, що зі збільшенням швидкості потоку, зменшується діаметр пінної бульбашки. Встановлено, що розміри пір відіграють велику роль у формуванні розміру бульбашки. Промодельовані залежності розмірів діаметрів бульбашки залежно від конструктивного виконання пористого тіла. Проте в роботі не проведено моделювання генерування компресійної піни в системі.

Багато робіт спрямовано на моделювання роботи установок водяного пожежогасіння [1, 11, 12]. Проте особливості конструкції таких засобів не дають змоги застосувати отримані математичні моделі до систем, у яких відбувається генерація компресійної піни. Тому важливою та невирішеною частиною проблеми удосконалення систем для генерування компресійної піни є розроблення математичного забезпечення, що описують їх роботу.

Викладення основного матеріалу

Математична модель процесу генерування компресійної піни створена так, що вона є об'єднанням окремих блоків, кожний з яких є автономною математичною моделлю зі своїми входом та виходом, за допомогою яких здійснюється взаємодія між блоками у процесі виконання загальної задачі моделювання.

У цьому дослідженні виконано моделювання роботи блоків подачі газу, суміші води та піноутворювача та блоку руху піни у рукаві.

1. Блок подачі газу. Вхідними даними є: p_{comp} – тиск на вході в систему, Па; p_{mix} – тиск у камері змішування, Па; d_a – критичний діаметр газового сопла, м; T – тем-

пература навколишнього середовища, К. Вихідними даними є G_a – потік газу (масової витрати) через отвір сопла подачі газу, кг/с.

Для вирішення цієї задачі використано метод гідродинамічних функцій [2]. Згідно з формулами (127) та (128) [2] отримаємо величину приведену швидкості:

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

де: p_{comp} – тиск, що діє на вході в систему, Па; p_{mix} – тиск, що діє у змішувальній камері, Па; k – показник адиабати для робочого газу.

Тоді потік газу (масова витрата) через сопло, що утворюється при дроселюванні, буде обчислюватися на підставі формул (107) та (109) [2, с. 237] за такою формулою:

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

де: λ – приведена швидкість газу згідно з формулою (102); T – температура гальмування газу, К; m_{const} – характерна стала для газу, що обчислюється за формулою (згідно з формулою (109), гл. 5, [2]):

$$m_{const} = \sqrt{k \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{air}}}}, \quad \text{М}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0.5}, \quad (3)$$

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

Отримано алгоритм обчислення потоку газу (масової витрати), що реалізує роботу блоку подачі газу:

$$G_a = G_a(d_a, p_{comp}, p_{mix}, k, R_{air}, T), \quad \text{кг/с}. \quad (4)$$

2. Блок подачі суміші води та піноутворювача.

Вхідними даними є: p_{comp} – тиск в ємності суміші, Па; p_{mix} – тиск у камері змішування, Па; d_w – діаметр отвору сопла подачі суміші, м. Вихідними даними є G_w – потік суміші (масової витрати) через отвір сопла подачі, кг/с.

Виходячи з рівності потенційної енергії тиску в ємності суміші та кінетичної енергії струменя води, що виходить з рідинного дроселя, використавши формулу (59) [2, с. 28], рівняння Бернуллі для ідеальної нестисливої рідини, отримаємо величину швидкості v_w цього струменя:

$$v_w = \sqrt{2 \cdot \frac{(p_{comp} - p_{mix})}{\rho_w}}, \quad \text{м/с}, \quad (5)$$

де ρ_w – густина суміші води з піноутворювачем, кг/м³. Тоді потік суміші води з піноутворювачем можна обчислити за такою формулою:

$$G_w = \frac{\pi}{4} \cdot v_w \cdot \rho_w \cdot d_w^2, \quad \text{кг/с}. \quad (6)$$

Отримано алгоритм обчислення потоку суміші води з піноутворювачем, що реалізує роботу блоку подачі суміші води та піноутворювача:

$$G_w = G_w(\rho_w, d_w, p_{comp}, p_{mix}), \quad \text{кг/с}. \quad (7)$$

3. Блок руху піни у рукаві.

Вхідними даними є: p_2 – тиск на вході рукава, Па; p_1 – тиск на виході рукава, Па; D – внутрішній діаметр рукава, м; L – довжина рукава, м. Вихідними даними є: Q_w – потік рідинної фази газорідинного потоку (об'ємної витрати), м³/с; Q_a – потік газової фази газорідинного потоку (об'ємної витрати у перерахунку на н.у.), м³/с.

Простішою моделлю газорідинного потоку, згідно з [10], є квазігомогенна модель. Тоді величина падіння

тиску по довжині каналу піногенеруючої вставки для газорідинної суміші:

$$\frac{dp}{dL} = \psi \lambda(p) \rho_w \frac{\omega'^2}{2 \cdot D} \left(1 + \left(1 - \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w}\right) \frac{\omega''}{\omega'}\right), \quad \text{Па/м}, \quad (8)$$

де: ψ – приведений коефіцієнт спротиву для прийнятих режимів руху газорідинної суміші, її газовмісту та іншими конструктивними особливостями, що уточняється експериментальним шляхом; $\lambda(p)$ – коефіцієнт гідродинамічного спротиву однофазного потоку, в нашому випадку рідинної фази, що рухається з приведеною швидкістю рідинної фази; ρ_w – густина рідинної фази, кг/м³; D – внутрішній діаметр шлангу, м; $\rho_{air}(p)$ – густина газової фази, що знаходиться під тиском p , кг/м³; ω' – приведена швидкість рідинної фази, м/с; ω'' – приведена швидкість газової фази, м/с.

На підставі визначення поняття кратності отримуємо величину Q_{a_NC} – об'ємної витрати повітря у перерахунку на н.у.:

$$Q_{a_NC} = (k_m - 1) \cdot Q_w, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (9)$$

де: Q_{a_NC} – величина об'ємної витрати повітря у перерахунку на н.у., м³/с; Q_w – об'ємна витрата суміші води з піноутворювачем, м³/с.

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

$$Q_a(p) = Q_{a_NC} \cdot \frac{p_{NC}}{p}, \quad \text{м}^3/\text{с}, \quad (10)$$

де: $Q_a(p)$ – об'ємна витрата газової фази, м³/с; p_{NC} – атмосферний тиск, Па; p – тиск, під яким знаходиться піна у розрахунковий момент часу, Па.

Об'ємний потік газорідинної суміші, що знаходиться в умовах тиску p , обчислюємо за такою формулою:

$$Q_f(p) = Q_a(p) + Q_w, \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (11)$$

Масову витрату газу з урахуванням формули (9) визначаємо за формулою

$$G_a = Q_{a_NC} \rho_{a_NC} = (k_m - 1) Q_w \rho_{a_NC}, \quad \text{кг/с}, \quad (12)$$

де ρ_{air_NC} – густина повітря за нормальних умов, кг/м³.

Знаходимо формулу густини газової фази, яка знаходиться в умовах тиску, підставивши значення величин згідно з формулами (9), (10), (12), та зробивши алгебраїчні спрощення:

$$\rho_{air}(p) = \frac{G_a}{Q_a(p)} = \frac{\rho_{a_NC}}{p_{NC}} \cdot p, \quad \text{кг/м}^3, \quad (13)$$

де: $G_a = (k_m - 1) Q_w \rho_w \frac{\rho_{a_NC}}{\rho_w}$, $Q_a(p) = (k_m - 1) Q_w \frac{p_{NC}}{p}$.

Величини приведених швидкостей рідинної ω' та газової фази ω'' згідно з [16]:

$$\omega' = \frac{4 \cdot Q_w}{\pi \cdot D^2}, \quad \omega'' = \frac{4 \cdot Q_a(p)}{\pi \cdot D^2}, \quad \text{м/с}. \quad (14)$$

Для розрахунку коефіцієнта гідравлічного спротиву $\lambda(p)$, що входить до формули (8), згідно з методикою [10, с. 143], треба знайти витратну швидкість двофазного потоку (формула (1)–(27), [10]):

$$\omega = \omega' + \frac{\rho_{air}(p)}{\rho_w} \cdot \omega'', \quad \text{м/с}. \quad (15)$$

Тоді коефіцієнт гідравлічного спротиву $\lambda(p)$ обчислюється як коефіцієнт гідродинамічного спротиву од-

нофазного потоку, в нашому випадку рідинної фази, для чого необхідно знайти число Рейнольдса для рідинної фази, як функцію тиску:

$$\text{Re}(p) = \frac{\omega(p) \cdot d_{\text{equ}} \cdot \rho_w}{\mu_w}, \quad (16)$$

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

Підставивши числові значення змінних і значення функції при типових режимах потоку, отримаємо, що число $\text{Re} < 4000$. Це режим течії, що згідно з [8], відповідає закону Гагена-Пуазейля, при цьому коефіцієнт гідродинамічного спротиву цієї течії обчислюється за формулою

$$\lambda(p) = \frac{64}{\text{Re}(p)}. \quad (17)$$

Підставивши у формулу (8) значення $\lambda(p)$ – згідно з формулою (17), $\rho_{\text{air}}(p)$ – згідно з формулою (13), ω' , ω'' – згідно з формулою (14), зробивши спрощення та перетворення, отримуємо:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\psi}{\rho_0} \cdot \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu_w \rho_w}{D^4} \cdot Q_w \cdot (\rho_w + \rho_{a_NC} + \rho_1 + \rho_2), \text{ Па/м}, \quad (18)$$

$$\text{де: } \rho_0 = (\rho_w + k \cdot \rho_{a_NC})^2; \rho_1 = \frac{p_{NC}^2 \cdot \rho_w \cdot k^2}{p^2};$$

$$\rho_2 = \frac{p_{NC} \cdot k \cdot (2 \cdot \rho_w - \rho_{a_NC} \cdot k)}{p}, \quad k = k_m - 1.$$

Вирішуючи це рівняння методом розділення змінних і для зменшення громіздкості виразу вводячи проміжні змінні a , b , c , d , отримуємо величину об'ємної витрати рідинної фази Q_w залежно від вхідного p_2 та вихідного p_1 тиску:

$$Q_w = \frac{1}{a \cdot L} \cdot \int_{p_1}^{p_2} \frac{1}{\left(b + \frac{c}{p^2} + \frac{d}{p}\right)} dp, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (19)$$

$$\text{де: } a = \frac{\psi}{\rho_0} \cdot \frac{128}{\pi} \cdot \frac{\mu_w \cdot \rho_w}{D^4}; \quad b = \rho_w + \rho_{a_NC}; \quad c = p_{NC}^2 \cdot \rho_w \cdot k^2;$$

$$d = p_{NC} \cdot k \cdot (2 \cdot \rho_w - \rho_{a_NC} \cdot k).$$

Обчисливши інтеграл у цій формулі та зробивши алгебраїчні перетворення, отримуємо величину об'ємної витрати рідинної фази Q_w залежно від вхідного p_2 та вихідного p_1 тиску в аналітичному вигляді:

$$Q_w = \frac{2b(p_2 - p_1) + 1}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot \left(d \cdot \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right) + b_3 \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (20)$$

$$\text{де: } b_1 = b \cdot p_1^2 + d \cdot p_1 + c; \quad b_2 = b \cdot p_2^2 + d \cdot p_2 + c;$$

$$b_3 = \frac{(2bc - d^2) \cdot (p_1 - p_2)}{\sqrt{b_1} \cdot \sqrt{b_2}}, \text{ а проміжні змінні } a, b, c, d \text{ обчислюємо згідно з формулою (19).}$$

Для знаходження об'ємної витрати газової фази у перерахунку на н. у., скориставшись рівнянням (9), отримуємо:

$$Q_{a_NC} = \frac{k(2b(p_2 - p_1) + 1)}{2 \cdot a \cdot b^2 \cdot L} \cdot \left(d \cdot \ln\left(\frac{b_1}{b_2}\right) + k \cdot b_3 \right), \text{ м}^3/\text{с}. \quad (21)$$

Отримано алгоритм обчислення об'ємної витрати газової та рідинної фази газорідинної суміші, що моделює роботу блоку руху піни у рукаві:

$$Q_w = Q_w(p_1, p_2, k_m, D, L, \mu_w); \quad (22)$$

$$Q_{a_NC} = Q_{a_NC}(p_1, p_2, k_m, D, L, \mu_w),$$

Висновки

Виконано аналіз літературних джерел за тематикою дослідження, який показав, що питанню моделювання роботи систем для генерування компресійної піни приділено мало уваги.

Розроблено такі блоки математичної моделі процесу генерування компресійної піни:

- блоку подачі газу;
- блоку суміші води та піноутворювача;
- блоку руху піни у рукаві.

Наступним етапом дослідження є розроблення блоку піногенератора та системи комунікацій між блоками, для подальшої взаємодії цих блоків вже з розробленими блоками в цій статті та виконання загальної задачі моделювання процесу генерування компресійної піни в системі.

Отримані математичні моделі блоку подачі газу, блоку суміші води та піноутворювача та блоку руху піни у рукаві, під час їх об'єднання з іншими блоками, розроблення яких є наступним етапом дослідження, дадуть змогу:

- виконувати розрахунки параметрів систем подачі компресійної піни залежно від кратності компресійної піни, яку необхідно отримати;
- досліджувати вплив параметрів піногенеруючої вставки на кратність компресійної піни;
- здійснювати проектування систем генерування компресійної піни для гасіння пожеж різних класів.

References

1. Abramov, Yu. A., Rosoha, V., & Shapovalova, E. (2001). *Modelirovanie protsessov v pozharnykh stvolakh*. Kharkiv, 195 p.
2. Abramovich, G. N. (1979). *Prikladnaya gazovaya dinamika*. Moscow: Nauka, 824 p.
3. Dhruvad P. (2017). Experimental study of pressure drop an bubble size in a laboratory scale compressed air foam generation system, 14–135
4. 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*, 6(191), 2–12
5. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., & Trigub V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with inelydispersed water. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 10(92), 38–43
6. Fadyaev, V. D. (2017). Primenenie kompressionnoy peny v nasosno – rukavnykh sistemah pri tushenii pozharov elektrooborudovaniya pod napryazhenim. *Candidate Dissertation for Technical Sciences*. (05.26.03 – Fire and industrial safety (by industry)). Moscow, 158 p.
7. Grady S., Lafferty R. (2005). How high can you pump wildland firefighting foam?. *Foam applications for wildland and urban fire management*, 1, 123–132
8. Idelchik, I. E. (1992). *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam*. Moscow: Publishing "Mashinostroenie", 672 p.
9. Jing-Yuan, C., & Mao, X. (2014). Experimental Research of Integrated Compressed Air Foam System of Fixed (ICAF) for Liquid Fuel. *Procedia Engineering*, 71, 44–56
10. Kutateladze, S. S., & Styrovich, M. A. (1976). *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem*. Moscow: Publishing "Energiya", 143 p.
11. Mawhinney, J., & Back, G. (2016). *Handbook of fire protection engineering*. SFPE Handbook of fire protection engineering, 645 p.
12. Semko, A., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Hritsina, I., & Yagudina, N. (2014). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 3, 655–664
13. Shakhov, S. M., Vinogradov, S. A., & Larin, O. M. (2017) Analiz svitovikh zrazkiv sistem pozhehogasinnya gazonapovnenoyu pi-

- noyu. *Nadzvichajni situacziyi. Poperedzhennya ta likvidacziya*, 1, 50–58
14. Wang, X., Liao, Y., & Lin, L. (2009). Experimental study on fire extinguishing with a newly prepared multi – component compressed air foam. *Chinese Science Bulletin*, 54(3), 492–496
 15. William, L., & San, J. (2001). Properties of compressed air foam. *County Fire District, Friday Harbour*, 3, 23–32
 16. Zalesov, S. V., Godovalov, G. A., & Krektunov, A. A. (2014). Sistema pozharotusheniya NATISK dlya ostanovki i lokalizatsii lesnykh pozharov. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 3, 138–145
 17. Zalesov, S. V., Godovalov, G. A., Krektunov, A. A., & Opletaev, A. S. (2014). Novyj sposob sozdaniya zagraditelnykh i opornykh protivopozharnykh polos. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agramogo universiteta*, 3, 90–94

S. M. Shakhov¹, A. I. Kodryk², O. M. Titenko², S. A. Vinogradov¹

¹ National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

² Ukrainian Scientific Research Institute of Civil Defence, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL APPARATUS FOR DESIGNING COMPRESSED AIR FOAM GENERATION SYSTEMS

The article considers an effective fire extinguishing agent in the form of compression foam to fight forest fires. Based on the analysis of experimental studies on the effectiveness of compression foam over other extinguishing agents, its advantages during use in forests in case of fires have been established. Concerning the authors' analysis, it is noted that there are no samples with the technology of compression foam in the country. The development of a mathematical model of the compression foam generation process is proposed, which in the future will be the basis for the manufacture of an experimental sample of a system for the supply of compression foam. The most convenient tool for solving problems in describing stationary and transient processes in the design of structures are modern software products. The Simulink graphical simulation environment (integrated into the MatLab software environment) allows building dynamic models with the help of individual blocks in the form of directional graphs. The structure of such a model is built on the basis of separate, independent blocks, which are separate mathematical models themselves. The considered mathematical model of the process of generating compression foam includes three separate blocks. The article presents mathematical modeling of the operation of the gas unit, the operation of the supply unit of the mixture of water and foaming agent, and the operation of the foam movement in the sleeve. Each of the blocks is an autonomous mathematical model with its own input and output. With the help of these models the interaction between the blocks is provided in the process of performing the general modeling task. These individual units can be changed according to changes in the design of the installation, leaving only a constant outer shell (number of inputs, outputs, and dimension) of the individual unit. The next stage of the research is the development of the foam generator unit and the communication system between the units, for further interactions of these units with the units already developed in this article and the general task of modeling the compression foam generation process in the system. Thus, during the interactions of these units, the task will be performed, which is to determine the necessary technical parameters of the system, depending on the fire – extinguishing properties of the compression foam to be obtained.

Keywords: compressed air foam; mathematical modeling; compressed air foam system; forest fires.