Пожежна безпека
Fire Safety
ISSN 2078-6662 (print), ISSN 2708-1087 (online)
https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB

УДК 614.8
This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

DOI https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.06

І. І. Калужняк[1], А. Ф. Гаврилюк[1], Д. В. Фреюк[2]
[1] Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
[2] Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології імені С. З. Ґжицького, м. Львів, Україна

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8727-9950 – А. Ф. Гаврилюк
https://orcid.org/0009-0009-1101-1403 – І. І. Калужняк
https://orcid.org/0000-0001-7076-3431 – Д. В. Фреюк
ikaluznak@ldubgd.edu.ua

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БПЛА ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ

Постановка проблеми. Збільшення висотності сучасної забудови й ускладнення архітектурних конструкцій будівель створюють суттєві виклики для традиційних методів пожежогасіння. Використання автодрабин або колінчастих підіймачів часто є технічно неможливим чи небезпечним на великих висотах, що значно знижує оперативність та ефективність реагування під час ліквідації пожеж. У таких умовах необхідним є впровадження пожежних БпЛА, здатних забезпечити розвідку осередку горіння, оперативну подачу вогнегасних речовин і моніторинг динаміки пожежі, мінімізуючи ризики для рятувальників. Проте ефективність їхнього застосування залежить від технічних параметрів, зокрема від співвідношення між підіймальною силою та навантаженням. Недостатність досліджень у цій сфері зумовлює потребу в теоретичному аналізі чинників, які визначають ефективність пожежних БпЛА під час пожежогасіння на висотних об'єктах.

Мета полягає у визначенні закономірностей впливу основних параметрів – продуктивності подачі, виду вогнегасної речовини, реактивної сили на стволі й умовної висоти пожежі – на корисну підіймальну силу пожежних БпЛА.

Опис матеріалу. У роботі застосовано теоретичний метод дослідження, який передбачав аналіз сучасних наукових публікацій, присвячених застосуванню пожежних БпЛА, а також проведення аналітичних розрахунків, що описують взаємозв'язки між параметрами системи подачі вогнегасних речовин і силами, які діють на БпЛА під час роботи. Отримано аналітичні залежності для розрахунку витрати, швидкості витоку, реактивної сили на стволі та сумарного зусилля, що впливає на підіймальну силу. Проаналізовано вплив висоти пожежі, діаметра рукава, виду вогнегасної речовини на загальну рівновагу сил. Зокрема, встановлено, що статичне навантаження від стовпа рідини в рукаві є домінуючим чинником, тоді як реактивна сила, що виникає під час витоку, має відносно невелике значення – у межах 0,9–7,6 % за подачі води та 0,5–3 % за подачі компресійної піни. Результати розрахунків показали, що для гасіння пожежі на висоті 48 метрів із використанням рукава діаметром 19 мм і додаткового обладнання масою 0,5 кг мінімальна необхідна підіймальна сила БпЛА становить 247,5 Н за подачі води та 134 Н за подачі компресійної піни. Це підтверджує доцільність використання легких вогнегасних речовин, які істотно зменшують навантаження на БпЛА і дають можливість підвищити ефективність та тривалість польоту. У процесі дослідження встановлено, що зі збільшенням висоти гасіння значно зростає вага стовпа вогнегасної речовини в рукаві, що потребує посилення тягових характеристик БпЛА або використання легших вогнегасних сумішей. Крім того, доведено, що реактивна сила, яка утворюється під час подачі рідини під тиском, зростає експоненційно зі збільшенням продуктивності, однак її вплив на загальну підіймальну силу залишається незначним порівняно зі статичною складовою.

Висновки. За результатами проведеного теоретичного дослідження ключових чинників, що впливають на ефективність роботи пожежних БпЛА під час гасіння пожеж на висоті, визначено, що найбільший вплив на підіймальну силу мають висота подачі та вага стовпа вогнегасної речовини. Використання компресійної піни як вогнегасної речовини зменшує навантаження на систему до 85 % порівняно

з водою, що значно підвищує ефективність БпЛА та дає змогу застосовувати їх на більших висотах. Отримані результати є основою для подальших експериментальних досліджень моделі.

Ключові слова: пожежа, безпілотні літальні апарати, гасіння пожежі, підіймальна сила, пожежна небезпека.

I. I. Kaluzhniak[1], A. F. Gavryliuk[1], D. V. Freiuk[2]
[1] Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
[2] Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies, Lviv, Ukraine

JUSTIFICATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF UAVS FOR FIREFIGHTING

Problem Statement. The increasing height of modern urban development and the complexity of architectural structures pose significant challenges to traditional firefighting methods. The use of fire ladders or articulated lifts is often technically impossible or unsafe at great heights, which significantly reduces the speed and efficiency of firefighting operations. Under such conditions, the implementation of firefighting unmanned aerial vehicles (UAVs) becomes necessary, as they are capable of performing fire reconnaissance, delivering extinguishing agents, and monitoring fire dynamics while minimizing risks to rescue personnel. However, their operational effectiveness largely depends on technical parameters, particularly the ratio between the lifting force and the load created by the extinguishing system. The lack of research in this field necessitates a theoretical analysis of the factors determining the performance of UAVs during firefighting operations at high-rise structures.

Objective. The aim of this study is to determine the patterns of influence of the main parameters – delivery rate, type of extinguishing agent, reactive force at the nozzle, and fire height–on the useful lifting force of firefighting UAVs. The obtained results are intended to improve the efficiency of firefighting UAVs during high-rise building fire suppression.

Description of the Material. A theoretical research method was applied in this study, including the analysis of current scientific publications on the use of firefighting UAVs and analytical calculations describing the relationships between the parameters of the extinguishing agent delivery system and the forces acting on the UAV during operation. Analytical dependencies were derived to calculate flow rate, jet velocity, nozzle reactive force, and the total force affecting the lifting capability. The influence of fire height, hose diameter, and type of extinguishing agent on the overall force balance was analyzed. It was found that the static load caused by the liquid column in the hose is the dominant factor, while the reactive force generated by fluid ejection is relatively minor – ranging from 0.9–7.6% when using water and 0.5–3% when using compressed foam. The calculation results showed that for extinguishing a fire at a height of 48 meters, using a 19 mm hose and additional equipment weighing 0.5 kg, the minimum required lifting force of the UAV is 247.5 N when using water and 134 N when using compressed foam. This confirms the feasibility of using lightweight extinguishing agents, which significantly reduce UAV load and increase both operational efficiency and flight duration. The study also established that as firefighting height increases, the weight of the extinguishing agent column in the hose rises significantly, requiring enhanced UAV thrust characteristics or the use of lighter extinguishing mixtures. Furthermore, it was proven that the reactive force generated by pressurized fluid delivery increases exponentially with flow rate, but its impact on the overall lifting force remains relatively small compared to the static component.

Conclusions. The theoretical study of key factors affecting the performance of firefighting UAVs during high-altitude firefighting operations showed that the most significant influence on lifting force comes from the height of the operation and the weight of the extinguishing agent column. The use of compressed foam as an extinguishing medium reduces the system load by up to 85% compared to water, which significantly enhances drone efficiency and allows their use at greater heights. The obtained results form the basis for further experimental investigations of the proposed model.

Key words: fire, unmanned aerial vehicle, fire extinguishing, lifting force, fire danger.

Постановка проблеми. Зростання висотності міської забудови й ускладнення конструктивних рішень будівель створюють значні виклики для традиційних методів пожежогасіння, особливо на висотах, що не завжди уможливлює використання автодрабин і колінчастих або телескопічних підіймачів. Пожежі у висотних спорудах вимагають негайного, точного й безпечного реагування, що часто обмежено часом прибуття, розгортання, а також фізичними можливостями рятувальників. У цьому контексті безпілотні літальні апарати (БпЛА) або пожежні БпЛА можуть стати інноваційною технологією, яка здатна кардинально підвищити ефективність пожежогасіння. Вони можуть забезпечувати оперативну розвідку, моніторинг ситуації з використанням тепловізійних

камер і, що найважливіше, пряму доставку вогнегасних речовин до осередку горіння, мінімізуючи ризики для особового складу [1; 2; 3; 4].

Незважаючи на значний потенціал, упровадження пожежних БпЛА у практичну діяльність потребує глибокого наукового обґрунтування їхніх технічних характеристик, які б враховували як окреслену продуктивність подачі, так і висоту пожежі, а також вид вогнегасної речовини.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Можливості гасіння пожеж за допомогою БпЛА з різним рівнем автономності та функціональності досліджували низка науковців, що відображено в багатьох публікаціях [5]. Зокрема, у науковій роботі [6] авторами Пенья П. Ф., Рагаб А. Р., Луна М. А., Але Ісак М. С., Кампой П. представлено нову платформу БпЛА, призначену для гасіння лісових пожеж із запасом води 600 літрів та часом роботи 30 хвилин. Механізм використовує повітряний потік від двигунів для перетворення води у водяний туман. Автори Бхат Н. С., Шашідхара К. С., Дакулагі В. у роботі [7] запропонували гексакоптер, який використовується для скидання вогнегасної кулі в осередок пожежі. Ще інноваційній спосіб запропоновано дослідниками [8], що полягає у використанні вогнегасних куль, які в разі контакту з високою температурою вибухають і розповсюджують хімічні компоненти, які припиняють горіння. Науковці у праці [9] дослідили систему самоорганізованих роїв пожежних БпЛА для автономної боротьби з пожежами, основна увага зосереджена на механізмах самокоординації для досягнення оптимальної поведінки під час гасіння пожеж. Дослідники [10] запропонували систему моніторингу лісових пожеж на основі БпЛА для віддалених і важкодоступних районів для мінімізації втручання людини в зонах ризику лісових пожеж. Автори у праці [11] розробили БпЛА для пожежогасіння на відкритому повітрі. Запропонована система пожежогасіння на основі БпЛА, яка складається з квадрокоптера як платформи, системи передачі інформації для збору та скидання води, кінематичної навігаційної системи в реальному часі (RTK) та системи управління польотами для моніторингу та координації БпЛА. У запропонованій автономній структурі БпЛА спочатку знаходить оптимальний шлях (щодо відстані та споживання енергії) до осередку пожежі. Після прибуття до місця виникнення пожежі система управління польотами спрямовує БпЛА для гасіння пожежі. У публікації [12] науковці продемонстрували БпЛА довжиною близько 2 м, який може стабільно літати, використовувати струмінь води та змінювати напрямок вогнегасного струменя для точного гасіння осередків пожежі. У роботі [13] дослідники запропоновали концепцію використання БпЛА для транспортування та скидання в осередок пожежі вогнегасної кульки наповненої гелієм – інертним газом, що сприяє зниженню концентрації кисню в зоні горіння.

У роботі [14] запропонували новий підхід гасіння пожеж із використанням ансамблів різних типів БпЛА, здатних здійснювати патрулювання, моніторинг і безпосереднє гасіння за допомогою куль. Авторами [15] представлено шестироторний БпЛА, призначений для виявлення та гасіння пожеж на ранніх стадіях у висотних будівлях. У праці [16] продемонстровано БпЛА із запасом вогнегасних речовин, який після прибуття до місця пожежі орієнтується в напрямку розташування вогню та цілеспрямовано гасить полум'я.

Аналіз даних літературних джерел свідчить про те, що переважна більшість досліджень зосереджена переважно на первинному застосуванні вогнегасних засобів та оцінці їх ефективності в окремих експериментальних чи практичних умовах. Водночас питання впливу багаторазового застосування або заміни вогнезахисних матеріалів на загальну ефективність систем пожежогасіння залишається дослідженим недостатньо. Така наукова прогалина вказує на потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на вивчення довготривалої працездатності та стабільності вогнезахисних засобів за повторних застосувань.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розкритті закономірностей впливу чинників (продуктивності подачі, виду вогнегасної речовини, реактивної сили на стволі, а також умовної висоти пожежі) на корисну піднімальну силу БпЛА.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі: проаналізувати аналітичні залежності, що описують реактивні сили, які виникають на стволі під час виходу з нього вогнегасних речовин; навести залежність, яка б враховувала продуктивність подачі, вид вогнегасної речовини, реактивну силу на стволі, а також умовну висоту пожежі на корисну піднімальну силу БпЛА; з використанням наведеної залежності дослідити вплив зазначених чинників на корисну піднімальну силу БпЛА.

Методи дослідження. У роботі використано теоретичний метод дослідження, який передбачав проведення комплексного аналізу й узагальнення сучасних наукових праць, присвячених гасінню пожеж за допомогою БпЛА, а також можливості подачі різного роду вогнегасних речовин.

Виклад основного матеріалу. Застосування БпЛА для гасіння висотних пожеж є одним із найбільш перспективних напрямів у сучасних

системах пожежогасіння, що дає змогу оперативно транспортувати та подавати вогнегасні речовини у важкодоступні місця, мінімізуючи безпекові ризики для особового складу. Для забезпечення ефективної роботи БпЛА необхідним є розрахунок підіймальної сили як ключового параметра, який забезпечить ефективний процес пожежогасіння. На рисунку 1 відображено принципову схему використання пожежного БпЛА під час гасіння пожежі, а також основні сили, які виникають і діють на БпЛА під час подачі вогнегасних речовин.

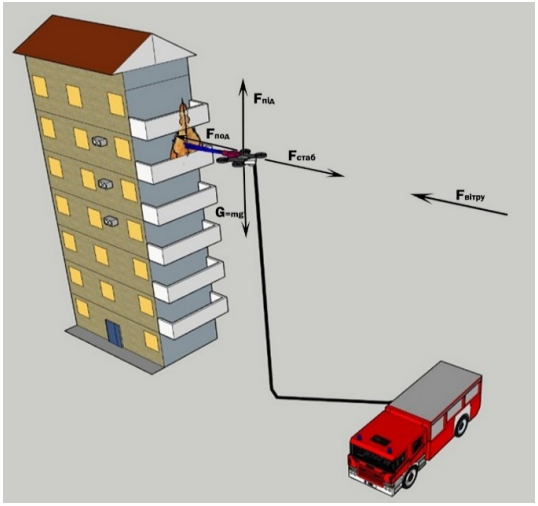


Рис. 1. Візуалізація використання БпЛА і сил, які діють під час гасіння пожежі

Під час гасіння витрата вогненосної речовини є одним із ключових параметрів, які обумовлюють успішну локалізацію та ліквідацію пожежі.

Витрату вогнегасних речовин, яка впливатиме на корисну підіймальну силу Q, відображено у рівності (1).

$$Q = I \cdot S_г = 6 \cdot 10^{-4} \cdot I \cdot S_г \ (\text{л/с}), \qquad (1)$$

де I – інтенсивність, л/(хв · м^2);

$S_г$ – площа гасіння, м^2.

Виходячи із цього, швидкість руху вогнегасної речовини можна описати рівністю (2):

$$\upsilon = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \qquad (2)$$

де $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу ствола;

d – діаметр ствола, м.

Унаслідок витоку вогнегасних речовин зі ствола утворюється реактивна сила, яка діє в протилежний бік до напрямку витоку та визначається за рівністю (3):

$$F_{под} = \rho \cdot Q \cdot \upsilon, \qquad (3)$$

де ρ – густина вогнегасної речовини, кг/м^3;

Q – витрата, л/с;

υ – швидкість витоку, м/с.

При цьому сила, яка протидіє корисній підіймальній силі БпЛА, описується рівністю (4):

$$G = \left(\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l + m_p + k \right) \cdot g, \qquad (4)$$

де m_p – маса одиниці довжини рукава, кг/м;

k – маса додаткового обладнання, кг;

g – прискорення вільного падіння 9,81, м/с^2;

l – висота гасіння, м.

Таким чином, сумарне зусилля, яке виникає в системі, визначатиметься сумою G і $F_{под}$:

$$F_{заг} = \sqrt{G^2 + F_{под}^2 + 2 \cdot G \cdot F_{под} \cdot \cos\alpha}, \qquad (5)$$

де α – кут між силами $F_{под}$ та G, який дорівнює 90°,

однак швидкість витоку (υ) залежатиме від тиску в системі (Р), на який впливає кінетична енергія потоку, втрати на підйом та опір в рукаві.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \upsilon^2 + \rho \cdot g \cdot l + A, \qquad (6)$$

де A – втрата внаслідок тертя.

Тоді звідси швидкість витоку можна розраховувати з використанням закону Бернуллі:

$$\upsilon = \sqrt{\frac{2\left(P - \rho \cdot g \cdot l - A\right)}{\rho}}, \qquad (7)$$

де P – статичний тиск у системі, Па.

Тоді формула витрати набуде вигляду:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\left(P - \rho \cdot g \cdot l - A\right)}{\rho}}. \qquad (8)$$

Загальна формула зусилля в системі, отримується з (5) та набуде вигляду:

$$F_{заг} = \sqrt{\left(\rho \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot l + m_p + k\right)^2 \cdot g^2 + \left(\rho \cdot Q \cdot \frac{4Q}{\pi d^2}\right)^2} \quad (9)$$

За результатами аналізу наукових праць [17; 18; 19] визначено, що діаметр рукава 19 мм використовується для подачі вогнегасних речовин за участі пожежних БпЛА. Це обґрунтовано балансом гідравлічних характеристики та пропускної здатності рукава такого діаметра.

З використанням наведених залежностей дослідимо вплив продуктивності подачі води та компресійної піни, а також умовної висоти пожежі на корисну піднімальну силу БпЛА. Припустимо, що для гасіння умовної пожежі використовується БпЛА, вогнегасна речовина до якого подається по рукаву діаметром 19 мм, зовнішня пожежа виникла на висоті 48 метрів і спричинена горінням блока кондиціонера, який ініціював займання фасадного утеплювача. Маса додаткового обладнання становить (запірна арматура, ствол тощо) становить 0,5 кг, а маса одиниці довжини рукава – 0,14 кг/м [20].

Аналіз сучасних наукових праць [21; 22; 23; 24] показав, що інтенсивність гасіння такого роду пожеж для води становить 0,1–0,12 л/с м^2, а для компресійної піни – 0,04–0,06 л/с·м^2. Використання пожежного БпЛА найбільш ефективне на ранніх стадіях розвитку пожежі, себто на незначних площах, тому робимо припущення, що площа такої пожежі не перевищує 8 м^2. Виходячи із цього, можна дійти висновку, що продуктивність подачі не перевищуватиме 1 л/с, що є достатнім для ліквідації пожежі за окреслених умов.

На рис. 2 наведено графічну залежність впливу продуктивності подачі від корисної підіймальної сили, де 1 – залежність підіймальної сили від реактивної сили, 2 – залежність підіймальної сили від висоти умовної пожежі, 3 – результуюча підіймальна сила.

З графіка (рис. 2) помітно, що навантаження, яке складає стовп води в рукаві, має статичний характер (лінія – 2) і не залежить від продуктивності подачі. Разом із тим зі збільшенням продуктивності подачі понад 0,4 л/с реактивна сила (лінія – 1) на стволі помітно зростає в експоненціальній залежності, що відображається на результуючій корисній підіймальній силі (лінія – 3). За досягнення продуктивності подачі води 1 л/с реактивна сила на стволі становить 17,5 Н, а результуюча підіймальна сила – 247,5 Н. Отже, зміна продуктивності подачі води в діапазоні 0,1–1,0 л/с (за умов проведення дослідження) впливає на підіймальну силу лише на 0,9–7,6 %.

У випадку подачі як вогнегасної речовини компресійної піни (рис. 3) спостерігається аналогічна залежність, однак абсолютні значення підіймальної сили є меншими, що пояснюється істотно нижчою густиною компресійної піни (150 кг/м^3). Як результат, корисна підіймальна сила залишається практично стабільною в усьому діапазоні витрат (реактивна складова становить лише 3–4 Н, а результуюча підіймальна сила 134 Н). Варто відмітити, що у випадку використання компресійної піни для гасіння зазначеної пожежі корисна підйомна сила є на 85 % меншою порівняно з водою.

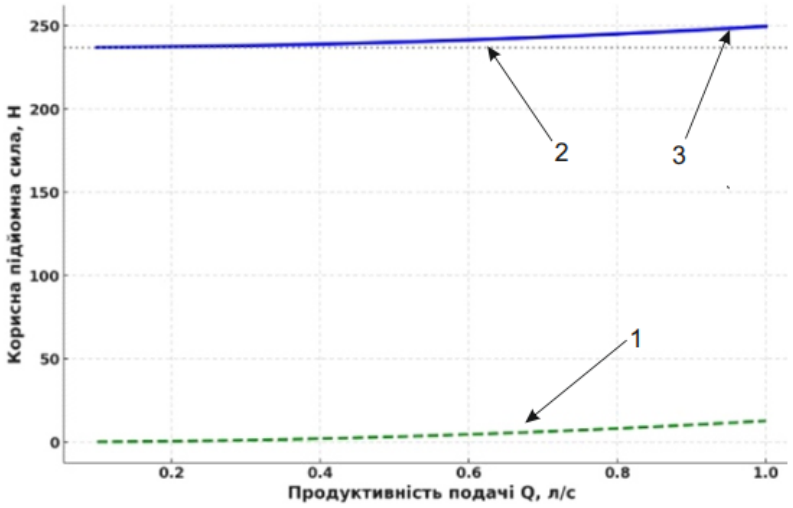


Рис. 2. Залежність корисної підйомної сили від продуктивності подачі для води за умови використання рукава діаметром 19 мм за подачі на висоту 48 м

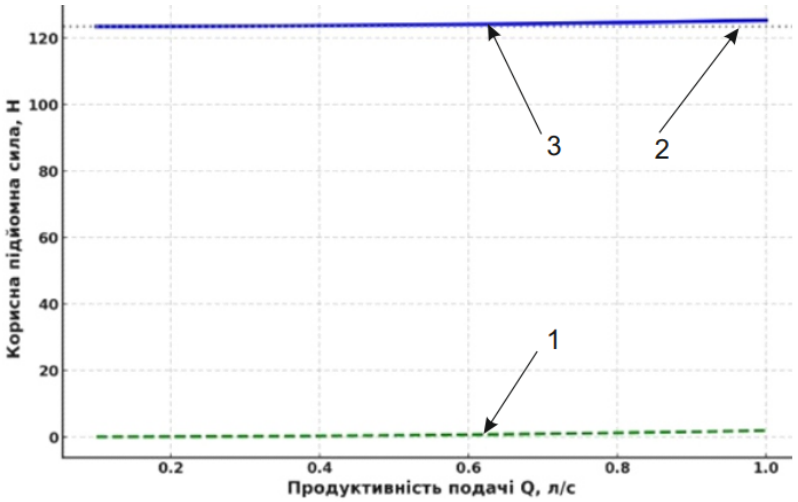


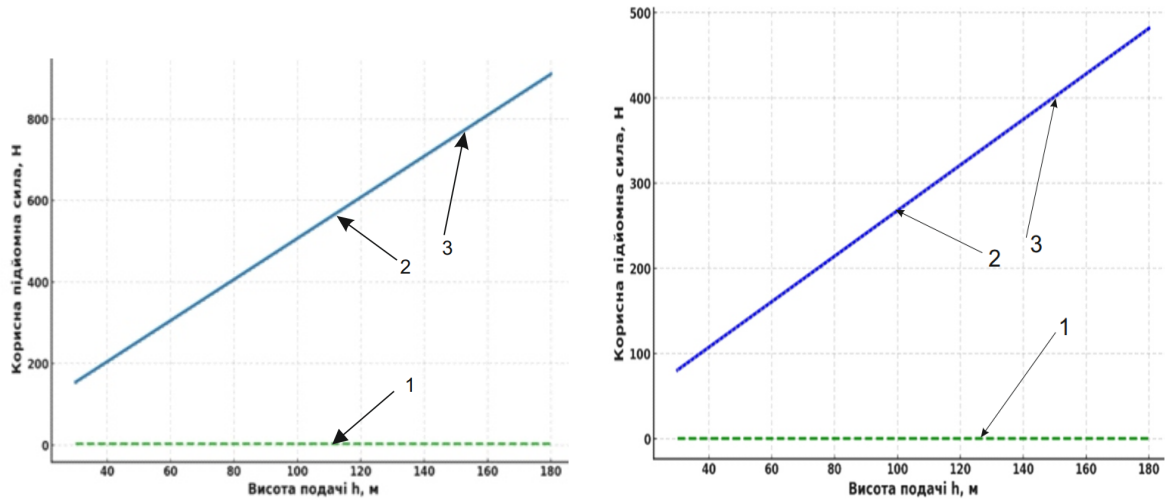
Рис. 3. Залежність корисної підйомної сили від продуктивності подачі за умови використання рукава діаметром 19 мм за подачі на висоту 48 м

На наступному етапі дослідимо, як впливає висота умовної пожежі на корисну підйомну силу. Вважатимемо середню продуктивність подачі як води, так і компресійної піни 0,5 л/с. На рисунку 4 відображено корисну підйомну силу від висоти умовної пожежі в разі подачі води (а) і компресійної піни (б).

Оскільки абсолютне значення реактивної складової порівняно зі значенням сили, яку створює наповнений рукав із вогнегасною речовиною, є незначним, криві 2 і 3 практично збігаються на обох графіках. Продуктивність подачі – у межах 0,5 л/с, реактивна складова при цьому є прямою лінією, що позначена лінією 1.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що умовна висота подачі вогнегасних речовин є домінуючим чинником, який визначає корисну підйомну силу для пожежних БпЛА, а реактивна складова, яка виникає на стволі, визначається витратою та густиною вогнегасної речовини і за продуктивності до 1 л/с становить лише 0,9–7,6 % у разі використання води та 0,5–3 % з використанням компресійної піни за умови висоти подачі вогнегасних речовин на висоту 48 м. За цих умов мінімальна підйомна сила для БпЛА має становити 247,5 Н у разі подачі води і 134 Н у разі подачі компресійної піни з урахуванням маси додаткового навантаження 0,5 кг.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами теоретичного дослідження впливу ключових чинників на корисну підіймальну силу БпЛА, що використовуються



а б

Рис. 4. Залежність корисної підйомної сили від висоти пожежі за продуктивності подачі 0,5 л/с за умови використання рукава діаметром 19 мм

для гасіння висотних пожеж із подачею вогнегасних речовин через рукав, отримано такі висновки:

1. Встановлено, що умовна висота пожежі, а отже, вага стовпа вогнегасної речовини у рукаві є домінуючим чинником, що визначає загальну корисну підіймальну силу БпЛА. Статичне навантаження від рукава (лінія 2, рис. 2) є незмінним за фіксованих висоти та діаметра рукава, що свідчить про його критичне значення для вибору підіймальних характеристик БпЛА.

2. Реактивна сила, що виникає на стволі під час витоку вогнегасної речовини, має залежність від продуктивності подачі, проте її внесок у загальне навантаження є відносно незначним. У разі використання води з продуктивністю на стволі 0,1–1,0 л/с (за висоти подачі 48 м) реактивна сила становить лише 0,9–7,6 % від сумарного зусилля, що протидіє підйому. А з використанням компресійної піни цей показник ще менший – 0,5–3 % загального навантаження, що підтверджує доцільність використання піни для зменшення навантаження на БпЛА.

3. Для забезпечення гасіння умовної пожежі на висоті 48 м із використанням рукава діаметром 19 мм і додаткового обладнання масою 0,5 кг мінімальна необхідна корисна підіймальна сила БпЛА має становити: 247,5 Н – у разі подачі води та 134 Н – у разі подачі компресійної піни (за продуктивності 1 л/с).

4. Підтверджено, що використання компресійної піни як вогнегасної речовини значно знижує вимоги до підіймальної сили БпЛА на 85 % менше навантаження, ніж у разі використання води (за описаних умов), що є ключовим фактором для підвищення доступної робочої висоти та тривалості польоту БпЛА.

На основі отриманих теоретичних результатів подальші дослідження будуть зосереджені на експериментальній валідації моделі, а саме проведення повномасштабних натурних експериментів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. Vol. 5 (3), 75. DOI: https://doi.org/10.3390/fire5030075.

2. Viegas C., Chehreh B., Lourenço J. Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2022. Vol. 104, 48. DOI: https://doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w.

3. Fattori F., Cocuzza R., Garbugli M., Cattrysse E., Nitti M. Tethered drones: A comprehensive review of technologies, challenges and applications. *Drones*. 2025. Vol. 9 (6), 425. DOI: https://doi.org/10.3390/drones906042.

4. Yamauchi Y., Kondoh Y., Hagihara A., Aiba S. Development of a remotely controllable 4 m long aerial-hose-type firefighting robot. *Frontiers in Robotics and AI*. 2023. Vol. 10, 1273676. DOI: https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1273676.

5. Tavakol Sadrabadi M. T., Peiró J., Innocente M., Rein G. Conceptual design of a wildfire emergency response system empowered by swarms of unmanned aerial vehicles. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. Vol. 124, 105493. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105493.

6. Peña P. F., Ragab A. R., Luna M. A., Ale Isaac M. S., Campoy P. WILD HOPPER: A heavy duty UAV for day and night firefighting operations. *Heliyon*. 2022. Vol. 8 (6), e09588. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09588.

7. Bhat N. S., Shashidhara K. S., Dakulagi V. Fire Fighting Un-manned Air Vehicle for Remote Areas. In: Pawar P. M., Balasubramaniam R., Ronge B. P., Salunkhe S. B., Vibhute A. S., Melinamath B. (eds). Techno-Societal 2020. Cham: Springer, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69921-5_60.

8. Aydin B., Selvi E., Tao J., Starek M. J. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. *Drones*. 2019. Vol. 3 (1), 17. DOI: https://doi.org/10.3390/drones3010017.

9. Innocente M. S., Grasso P. Self organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi robot systems. *Journal of Computational Science*. 2019. Vol. 34. P. 80–101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.04.009.

10. Afghah F., Razi A., Chakareski J., Ashdown J. Wildfire monitoring in remote areas using autonomous unmanned aerial vehicles. *IEEE INFOCOM 2019 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Paris, France, 2019, pp. 835–840. DOI: https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2019.8845309.

11. Qin H. et al. Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions. *12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Kathmandu, Nepal, 2016, pp. 62–67. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505253.

12. Ando H. et al. Aerial hose type robot by water jet for fire fighting. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2018. Vol. 3 (2). P. 1128–1135. DOI: https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792701.

13. Ogawa S., Kudo S., Koide M., Torikai H., Iwatani Y. Development and control of an aerial extinguisher with an inert gas capsule. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, Bali, Indonesia, 2014, pp. 1320–1325. DOI: https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090516.

14. Sherstjuk V., Zharikova M., Sokol I. Forest fire fighting using heterogeneous ensemble of unmanned aerial vehicles. *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehi-*

cles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 2019, pp. 218–223. DOI: https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943826.

15. Chen H., Cao H., Cheng J., Xie J. Study on urban emergency firefighting flying robots based on UAV. *IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chengdu, China, 2019, pp. 1890–1893. DOI: https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997723.

16. Manimaraboopathy M., Christopher H., Vignesh S. Unmanned fire extinguisher using quadcopter. *International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2017. Vol. 10 (3). P. 471–481.

17. Wang K., Yuan Y., Chen M., Lou Z., Zhu Z., Li R. A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. *Fire*. 2022. Vol. 5 (3), 75. DOI: https://doi.org/10.3390/fire5030075.

18. Advancing firefighting technology: Testing extinguishing drones for high-rise fires. *Fire Safety World*, 2024, February 18. URL: https://firesafeworld.com/advancing-firefighting-technology-testing-extinguishing-drones-for-high-rise-fires/.

19. Quollnet. Advanced fire safety solution for high rise buildings. 2025, April 7. URL: https://quollnet.com/article/Advanced-Fire-Safety-Solution-for-High-Rise-Buildings.

20. European Committee for Standardization (CEN). Fire-fighting hoses – Semi-rigid hoses for fixed systems (EN 694:2014). Brussels: CEN, 2014.

21. U.S. Department of Energy. Fire Protection (DOE-STD-1066-2016). Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2016. 162 p.

22. National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection. 2022 ed. Quincy, MA: NFPA, 2022. 98 p.

23. Weinschenk C. G., Madrzykowski D. M., Stakes K., Willi J. M. Examination of Compressed Air Foam (CAF) for Interior Fire Fighting (NIST Technical Note 1927). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2017. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1927.

24. Society of Fire Protection Engineers (SFPE). Fire Flow in Fire Protection Engineering (FPE eXTRA). December 2024. Bethesda, MD: SFPE, 2024.

REFERENCES

1. Wang, K., Yuan, Y., Chen, M., Lou, Z., Zhu, Z., & Li, R. (2022). A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. Fire, 5 (3), 75. https://doi.org/10.3390/fire5030075.

2. Viegas, C., Chehreh, B., & Lourenço, J. (2022). Tethered UAV with combined multi-rotor and water jet propulsion for forest fire fighting. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 104, 48. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01532-w.

3. Fattori, F., Cocuzza, R., Garbugli, M., Cattrysse, E., & Nitti, M. (2025). Tethered drones: A comprehensive review of technologies, challenges and applications. Drones, 9 (6), 425. https://doi.org/10.3390/drones906042.

4. Yamauchi, Y., Kondoh, Y., Hagihara, A., & Aiba, S. (2023). Development of a remotely controllable 4 m long aerial-hose-type firefighting robot. Frontiers in Robotics and AI, 10, 1273676. https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1273676.

5. Tavakol Sadrabadi, M. T., Peiró, J., Innocente, M., & Rein, G. (2025). Conceptual design of a wildfire emergency response system empowered by swarms of unmanned aerial vehicles. International Journal of Disaster Risk Reduction, 124, 105493. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105493.

6. Peña, P. F., Ragab, A. R., Luna, M. A., Ale Isaac, M. S., & Campoy, P. (2022). WILD HOPPER: A heavy duty UAV for day and night firefighting operations. Heliyon, 8 (6), e09588. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09588

7. Bhat, N. S., Shashidhara, K. S., & Dakulagi, V. (2021). Fire fighting unmanned air vehicle for remote areas. In P. M. Pawar, R. Balasubramaniam, B. P. Ronge, S. B. Salunkhe, A. S. Vibhute, & B.Melinamath(Eds.),Techno-Societal2020(pp.835–840). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69921-5_60.

8. Aydin, B., Selvi, E., Tao, J., & Starek, M. J. (2019). Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. Drones, 3(1), 17. https://doi.org/10.3390/drones3010017.

9. Innocente, M. S., & Grasso, P. (2019). Self-organising swarms of firefighting drones: Harnessing the power of collective intelligence in decentralised multi-robot systems. Journal of Computational Science, 34, 80–101. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.04.009.

10. Afghah, F., Razi, A., Chakareski, J., & Ashdown, J. (2019). Wildfire monitoring in remote areas using autonomous unmanned aerial vehicles. In IEEE INFOCOM 2019 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS) (pp. 835–840). IEEE. https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2019.8845309.

11. Qin, H., Li, Y., Zhang, X., & Zhang, Y. (2016). Design and implementation of an unmanned aerial vehicle for autonomous firefighting missions. In 2016 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) (pp. 62–67). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCA.2016.7505253.

12. Ando, H., et al. (2018). Aerial hose type robot by water jet for fire fighting. IEEE Robotics and Automation Letters, 3 (2), 1128–1135. https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2792701.

13. Ogawa, S., Kudo, S., Koide, M., Torikai, H., & Iwatani, Y. (2014). Development and control of an aerial extinguisher with an inert gas capsule. In 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014) (pp. 1320–1325). IEEE. https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090516.

14. Sherstjuk, V., Zharikova, M., & Sokol, I. (2019). Forest fire fighting using heterogeneous ensemble of unmanned aerial vehicles. In 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)

(pp. 218–223). IEEE. https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943826.

15. Chen, H., Cao, H., Cheng, J., & Xie, J. (2019). Study on urban emergency firefighting flying robots based on UAV. In 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) (pp. 1890–1893). IEEE. https://doi.org/10.1109/IAEAC47372.2019.8997723.

16. Manimaraboopathy, M., Christopher, H., & Vignesh, S. (2017). Unmanned fire extinguisher using quadcopter. International Journal of Smart Sensing and Intelligent Systems, 10 (3), 471–481.

17. Wang, K., Yuan, Y., Chen, M., Lou, Z., Zhu, Z., & Li, R. (2022). A study of fire drone extinguishing system in high-rise buildings. Fire, 5 (3), 75. https://doi.org/10.3390/fire5030075.

18. Fire Safety World (2024, February 18). Advancing firefighting technology: Testing extinguishing drones for high-rise fires. Retrieved from: https://firesafeworld.com/advancing-firefighting-technology-testing-extinguishing-drones-for-high-rise-fires/.

19. Quollnet (2025, April 7). Advanced fire safety solution for high rise buildings. Retrieved from: https://quollnet.com/article/Advanced-Fire-Safety-Solution-for-High-Rise-Buildings.

20. European Committee for Standardization (CEN). (2014). Fire-fighting hoses – Semi-rigid hoses for fixed systems (EN 694:2014). CEN.

21. U.S. Department of Energy (2016). Fire protection (DOE-STD-1066-2016). U.S. Department of Energy.

22. National Fire Protection Association (NFPA) (2022). NFPA 15: Standard for water spray fixed systems for fire protection (2022 ed.). NFPA.

23. Weinschenk, C. G., Madrzykowski, D. M., Stakes, K., & Willi, J. M. (2017). Examination of compressed air foam (CAF) for interior fire fighting (NIST Technical Note 1927). National Institute of Standards and Technology. https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1927.

24. Society of Fire Protection Engineers (SFPE). (2024, December). Fire flow in fire protection engineering (FPE eXTRA). SFPE.

© І. І. Калужняк, А. Ф. Гаврилюк, Д. В. Фреюк

Науково-методична стаття.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2025

Стаття прийнята 13.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025