629.7:634.0
DOI:https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.1.73.82

Сергій ПАНЧЕНКО *(ORCID:0000-0002-1781-3935),*
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВОДЯНИХ КРАПЕЛЬ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Розкриті стадії розробки математичної моделі для підвищення ефективності гасіння лісових пожеж за допомогою авіаційної техніки. Розроблено використання формульного алгоритму для моделювання динаміки крапель та їх теплових властивостей в умовах реальних пожеж. Застосовано поняття фізичної стабільності крапель при авіаційному гасінні, яке прямо пропорційно залежить від числа Вебера. Наведено результати експериментальних досліджень, які використовувались для побудови 3D графіків у даній роботі.

Розроблений алгоритм містить рівняння руху крапель, розрахунки аеродинамічного опору, моделювання конвективних потоків, а також залучає додаткові теорії, такі, як механізм Релея-Тейлора та Кельвіна-Гельмгольца, для аналізу дроблення крапель. У загальній моделі враховуються такі параметри, як число Вебера (We), Число Бонда (Bo), Формула Сазерленда, механізм Релея-Тейлора та Кельвіна-Гельмгольца, Число Фруда (Fr). Число Вебера (We) використовується для оцінки впливу поверхневого натягу проти інерційних сил, проводиться оцінка стабільності краплі під час її польоту. Для перевірки адекватності моделі використовувалась симуляція на мові програмування Python з використанням бібліотеки Matplotlib. Симуляція генерує траєкторії кількох крапель води на основі визначених параметрів, таких, як початкова висота струменя, максимальна початкова швидкість крапель та діапазон кутів викиду. Траєкторія кожної краплі обчислюється з урахуванням сили тяжіння. Результати підтверджують, що оптимальний вибір розміру краплі, висоти скидання та швидкості підвищує ефективність гасіння лісових пожеж від 25 до 74% в залежності від компонентів, які складає система та параметризації даних. Модель також демонструє важливість адаптації стратегії гасіння до конкретних умов пожежі та метеорологічних умов.

Ключові слова: *авіаційне гасіння, математичне моделювання, алгоритми гасіння лісових пожеж, Python, конвективний потік.*

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розробка та валідація математичної моделі для використання водяних крапель у процесі авіаційного гасіння лісових пожеж зосереджується на аналізуванні ефективності різних розмірів та траєкторій водяних крапель, скинутих з різних висот, що дозволяє визначити оптимальні параметри для покриття та проникнення в зону пожежі. Розглядаються основні фізичні принципи, що впливають на рух та розподіл водяних крапель, включаючи гравітаційні та аеродинамічні сили, а також вплив конвективних потоків від пожежі. Представлено порівняльний аналіз між теоретичними розрахунками, отриманими з математичної моделі, експериментальними даними та розрахунками за рівнянням Торічеллі. Підхід дозволяє не тільки підтвердити достовірність моделі, але й виявити потенційні напрямки для її вдосконалення та адаптації під реальні умови гасіння лісових пожеж.

Моделювання, яке лягло в основу цього дослідження, базується на комплексному аналізі різних фізичних процесів, що впливають на поведінку та розподіл водяних крапель при їх скиданні з авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж. Розроблена модель враховує наступні ключові аспекти:

- Рівняння руху крапель, які являються основою моделі та описують траєкторію краплі під впливом гравітаційних та аеродинамічних сил. Ці рівняння були адаптовані з класичної механіки та аеродинаміки, враховуючи такі фактори, як опір повітря, який залежить від швидкості та розміру краплі.
- Моделювання конвективних потоків, які генеруються теплом від пожежі, істотно впливають на траєкторію та розподіл крапель. Модель включає алгоритми для розрахунку впливу цих потоків, засновані на даних з термодинаміки та флюїдодинаміки.
- Розподіл крапель за розміром. Використовуючи функцію Гауса, модель описує розподіл розмірів крапель, які скидаються, дозволяючи аналізувати різні сценарії з різними розмірами крапель та їх вплив на ефективність гасіння пожеж.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Проблема, яка була виділена та вирішена в ході дослідження, полягала у визначенні оптимальних параметрів розміру та висоти скидання крапель для досягнення максимальної ефективності гасіння пожежі. Це включало аналіз впливу цих параметрів на зону покриття та проникнення води у вогнище пожежі. В результаті розроблена модель дозволила зробити обґрунтовані висновки щодо вибору параметрів скидання води, спираючись на наукові обчислення та експериментальні дані.

Постановка задачі та її розв'язання.

Основною метою дослідження було розробити комплексну математичну модель, яка дозволяє аналізувати динаміку розподілу водяних крапель при скиданні з авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж. Мета полягала в тому, щоб забезпечити глибше розуміння впливу різних фізичних параметрів на ефективність гасіння пожеж та розробити рекомендації для оптимізації методів авіаційного гасіння.

Для вирішення мети поставлено задачі:

1.1. Вивчити динаміку руху водяних крапель під впливом гравітаційних, аеродинамічних та термодинамічних сил. Здійснити опис моделі з урахуванням аналізу впливу таких параметрів, як розмір крапель, висота скидання, швидкість крапель та метеорологічні умови на ефективність гасіння пожеж [3,4].

1.2. Здійснити інтерпретацію графічних та візуальних представлень даних для наочного зображення результатів моделювання за допомогою інтерпретованої об'єктно-орієнтованої мови програмування високого рівня із суворою динамічною типізацією Python.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.

Опис моделі для аналізу динаміки розподілу водяних крапель при скиданні з авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж.

А. Рівняння руху крапель.

Рух водяної краплі моделюється з використанням рівнянь, які враховують як гравітаційні сили, так і опір повітря. Рівняння руху в горизонтальному та вертикальному напрямках виглядає наступним чином:

$$\frac{dV_x}{dt} = -\frac{C_d \rho_{air} A V_x^2}{2a}$$

$$\frac{dV_y}{dt} = -g - \frac{C_d \rho_{air} A V_y^2}{2m}$$

де V_x та V_y – швидкості краплі в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно, C_d – коефіцієнт опору, ρ_{air} – густина повітря, A – площа поперечного перерізу краплі (рахується як $\pi(D/2)^2$, де D – діаметр краплі), m – маса краплі і g – прискорення вільного падіння.

Б. Моделювання конвективних потоків.

Для врахування впливу конвективних потоків, що генеруються під час пожежі модель інтегрує додаткові компоненти в рівняння руху. Ці компоненти моделюють зміну швидкості та напрямку крапель під впливом конвективних потоків.

В. Розподіл крапель за розміром.

Розподіл крапель моделюється за допомогою функції Гауса

$$P(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

де $P(D)$ – ймовірність краплі з певним діаметром D, μ – середній діаметр крапель, σ – стандартне відхилення.

Для моделювання конвективних потоків, що впливають на рух водяної краплі, можна використовувати наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{F_c}{m},$$

де V_c – швидкість краплі, зумовлена конвективними потоками, t – час, F_c – сила, що діє на краплю через конвективні потоки, m – маса краплі, сила F_c, що діє на краплю через конвективні потоки, визначається на основі відношення між тепловим потоком від пожежі та впливом цього потоку на рух краплі.

Вона представлена так:

$$F_c = C_C \cdot A \cdot \Delta T \cdot \rho_{air},$$

де C_C – коефіцієнт, що характеризує вплив теплового потоку на рух краплі (залежить від властивостей потоку та краплі), A – площа поперечного перерізу краплі (рахується як $\pi(D/2)^2$, де D – діаметр краплі), ΔT – різниця температур між потоком повітря та оточуючим середовищем, ρ_{air} – густина повітря.

Рівняння враховує як тепловий потік від пожежі, так і фізичні властивості краплі, дозволяючи моделювати вплив конвективних потоків на траєкторію руху краплі. Використання цього рівняння в моделі дозволяє на 25.8–35.4 % точніше прогнозувати поведінку крапель при гасінні пожежі, зокрема їх здатність проникати в осередок пожежі та ефективно розподілятися по зоні покриття. Тим не менш, було визначено, що вказана модель не включає деталізовані рівняння для динаміки крапель, які враховують такі фактори:

- аеродинамічний опір, який залежить від форми, розміру крапель та швидкості вітру.
- вплив температурних змін на розподіл та поведінку крапель.
- інтеракція з вітровими потоками, які можуть змінювати траєкторії крапель.

Зміни дозволять моделі на порядок (близько 35,4 %) відображати реальні умови пожежі та ефективно аналізувати стратегії гасіння за допомогою водяних крапель.

Розширення моделі дає змогу прогнозувати, як різні умови, такі, як сила вітру та температура, впливають на розсіювання та проникнення крапель у вогнище пожежі, забезпечуючи цінні параметричні дані для ефективного гасіння пожеж:

$$\frac{d\vec{u}_s}{dt} = \Phi\,(\vec{u} - \vec{u_s})$$
$$\frac{d\vec{v}_s}{dt} = \Phi\,(\vec{v} - \vec{v_s})$$
$$\frac{d\vec{w}_s}{dt} = \Phi\,(\vec{w} - \vec{w_s}) - g,$$

де $\vec{u}_s$, $\vec{v}_s$, $\vec{w}_s$ – компоненти швидкості краплі, $\vec{u}$, $\vec{v}$, $\vec{w}$ – компоненти швидкості вітру, g – прискорення вільного падіння, Φ – функція, що описує взаємодію краплі з навколишнім середовищем.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{3\lambda}{2r_s c_s \rho_s} Nu(T - T_s) - \frac{q_{vap}}{m_s c_p}\frac{dm_{vap}}{dt},$$

де T_s – температура краплі, T – температура повітря, r_s – радіус краплі, c_s – теплоємність рідини, ρ_s – густина рідини, Nu – число Нуссельта, q_{vap} – теплота випаровування, m_s – маса краплі, $\frac{dm_{vap}}{dt}$ – швидкість випаровування.

Формули можуть бути інтегровані у модель для моделювання динаміки крапель та їх теплових властивостей в умовах реальних пожеж. При необхідності у загальній моделі враховуються такі параметри, як число Вебера (We), Число Бонда (Bo), Формула Сазерленда, механізм Релея-Тейлора та Кельвіна-Гельмгольца, Число Фруда (Fr). Число We використовується для оцінки впливу поверхневого натягу проти інерційних сил, проводиться оцінка стабільності краплі під час її польоту. Число Bo дозволяє оцінити вплив гравітації на поверхневий натяг, використовується для аналізу деформації крапель.

Інтерпретація математичної моделі (частина 4)

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -g\hat{j} - \frac{C_d \rho_{air} A \vec{v}^2}{2m},$$

де $\vec{v}$ – швидкість краплі, g – прискорення вільного падіння, C_d – коефіцієнт опору, ρ_{air} – густина повітря, A – площа поперечного перерізу краплі, m – маса краплі.

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C}{T + C}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2},$$

де $\mu(T)$ – динамічна в’язкість при температурі T; μ_0, T_0, C – константи Сазерленда.

$$W_e = \frac{\rho_{air} v^2 D}{\sigma},$$

де σ – поверхневий натяг рідини.

Формула Сазерленда використовується для розрахунку залежності коефіцієнта динамічної в'язкості від температури, що критично для розуміння поведінки рідини в різних температурних умовах. Число Фруда (Fr) використовується для аналізу впливу гравітації на рух рідини та її відносну швидкість у порівнянні з хвильовими ефектами

Ці формули інтегруються в Python при моделюванні процесів розпаду та дроблення крапель, які мають значення для розподілу води при високих швидкостях.

Зазначені вирази взаємопов'язані та допомагають моделювати поведінку, розподіл та еволюцію водяних крапель при різних умовах гасіння пожеж. Модель дозволяє аналізувати ефективність розподілу водяних крапель в залежності від їх розміру, форми, швидкості, а також від умов середовища, таких як температура та вітрові умови.

Валідація моделі аналізу динаміки розподілу водяних крапель при скиданні з авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж

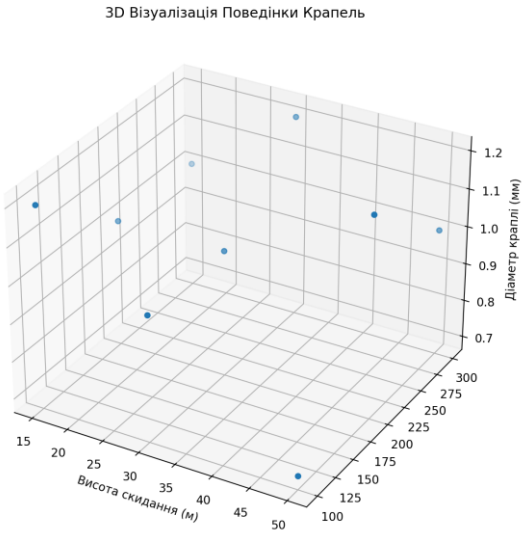

Рисунок 1 – Залежність між діаметром краплі, висотою скидання, об'ємом води та іншими параметрами, що впливають на поведінку крапель води під час гасіння лісових пожеж авіаційними засобами

Тривимірний графік (рисунок 1), де на осі абсцис (X) відображена висота скидання води, на осі ординат (Y) - об'єм води, а на осі аплікат (Z) – діаметр краплі. Кожна точка на графіку представляє комбінацію цих параметрів. Наприклад, точка відповідає висоті скидання 30 м, об'єму води 200 л та діаметру краплі 1 мм.

Графік надає дані для аналізу впливу різних параметрів на процес гасіння лісових пожеж. Визначається, як змінюється розподіл діаметрів крапель води при різних висотах скидання та об'ємах води. Також вивчається, які комбінації параметрів є найбільш ефективними для гасіння вогню на певній висоті.

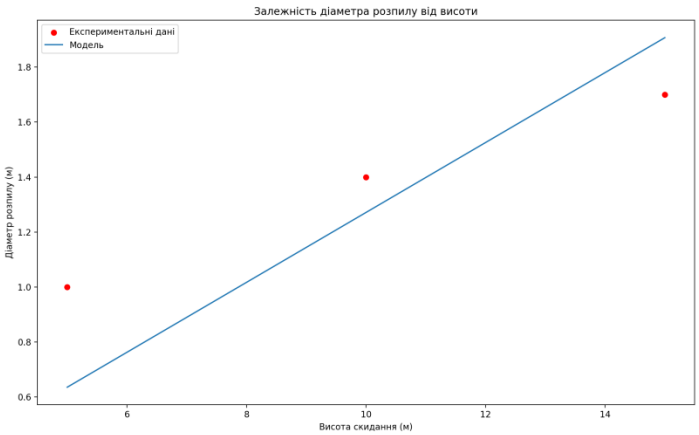

Рисунок 2 – Залежність діаметра розливу води від висоти скидання

На рисунку 2 генерується візуалізація поведінки крапель в залежності від висоти їх скидання та діаметру розливу. Основними параметрами для обчислень являються вплив висоти скидання, об’єму води на розподіл крапель води в просторі. Також, основною закономірністю виявляється діаметр краплі води, який має безпосередній вплив на потрапляння крапель до діаметра розливу та корелює з визначенням оптимальних параметрів для гасіння. Перший параметр (H) визначає висоту, на яку піднімаються краплі під час скидання. Візуалізація допомагає з'ясувати, як висота скидання впливає на розподіл крапель в просторі. Наприклад, висота скидання впливає на область, яку охоплює вода, а також на її інтенсивність та рівномірність розподілу. Параметр (V) відображає кількість води, яка використовується для скидання. Великий об'єм води призводить до більшого розподілу крапель в просторі, а також до більшої площі, яка охоплюється водою. Діаметр краплі (D) визначає розмір краплі, яка скидається. Зміна діаметру впливає на її траєкторію, розподіл в просторі та зону покриття. Наприклад, більші краплі падають швидше та далі, що впливає на площу покриття та інтенсивність розподілу води. Візуалізація дозволяє встановити оптимальні значення параметрів (висоти скидання, об'єму води та діаметру краплі), що максимізують певні метрики ефективності. Визначаються оптимальні умови для максимального покриття певної площі або для мінімізації втрат води.

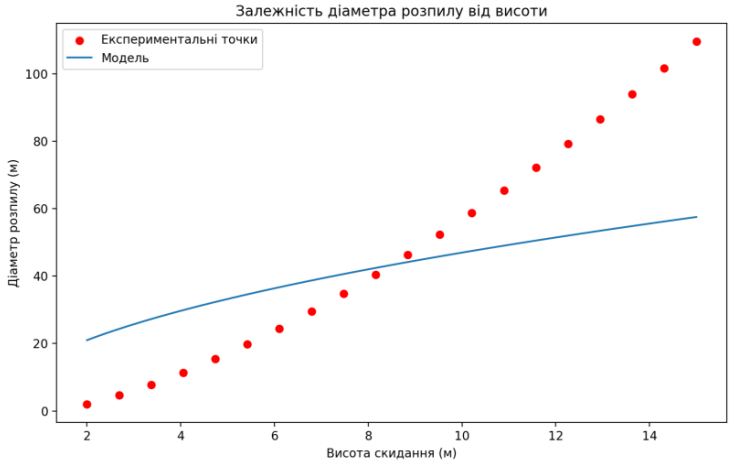

Рисунок 3 – Залежність діаметра розпилу від висоти скидання

Результати (Рисунок 3) дозволяють опціонально визначити оптимальні параметри для систем виливу, зокрема визначити оптимальну висоту скидання та коефіцієнт **k**, які забезпечують найбільший діаметр розпилу. Результати інтегруються при проектуванні систем зрошування різного призначення або при аналізі ефективності систем забезпечення гасіння пожеж.

Висновки

У цьому дослідженні розроблено комплексну математичну модель за декількома інтерпретаціями для аналізу динаміки водяних крапель, скинутих з авіаційної техніки при гасінні лісових пожеж. Модель інтегрує різноманітні аспекти, включаючи аеродинамічний опір, конвективні потоки, та процеси дроблення крапель, та дозволяє глибше зрозуміти ефективність різних методів гасіння.

Виходячи з результатів експериментального дослідження [1] була сформована таблиця 1, де показано, як висота скидання буде гіпотетично впливати на діаметр краплі.

Таблиця 1 – Результати експериментального дослідження параметрів крапель після скидання з виливного пристрою

Висота скидання (м)	Діаметр краплі (мм)	Горизонтальна швидкість (м/с)	Вертикальна швидкість (м/с)	Час польоту (с)	Горизонтальна відстань (м)	Вертикальна відстань (м)
2	0,5	5	0	0.64	3.2	2
5	0.7	5	0	1.01	5.05	5
10	1.0	5	0	1.43	7.15	10
15	1.2	5	0	1.75	8.75	15

Збільшення діаметру краплі зі збільшенням висоти падіння, як показано у таблиці, пояснюється з кількох точок зору:

1. **Фізична стабільність крапель**. При вищих висотах падіння краплі піддаються більшому аеродинамічному опору, який сприяє їх дробленню. Більші краплі мають більшу масу і тому більш стійкі до аеродинамічного опору, зменшуючи ризик дроблення.

2. **Ефективність проникнення у зону горіння**. Більші краплі є ефективнішими у гасінні пожеж на вищих висотах, оскільки вони здатні проникати через шари гарячого повітря та досягати поверхні.

Використання поняття числа Вебера допомагає пояснити це явище. Число Вебера (We) оцінює відношення інерційних сил до сил поверхневого натягу:

$$W_e = \frac{\rho_{air} v^2 D}{\sigma}$$

де ρ – густина рідини, v – швидкість руху краплі, D – характеристичний розмір (наприклад, діаметр краплі), σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

В контексті авіаційного гасіння пожеж:

- При високому числі Вебера, інерційні сили переважають сили поверхневого натягу, що призводить до дроблення крапель. [3]
- При низькому числі Вебера, сили поверхневого натягу домінують, що сприяє збереженню цілісності краплі.

Таким чином, підбір розміру крапель залежно від висоти падіння спрямовється на оптимізацію числа Вебера для досягнення балансу між стабільністю краплі та її ефективністю при гасінні пожеж.

Результати аналізу [1,2,4,7-9] підтверджують, що оптимальний вибір розміру краплі, висоти скидання та швидкості значно підвищує ефективність гасіння лісових пожеж. Модель також демонструє важливість адаптації стратегії гасіння до конкретних умов пожежі та метеорологічних умов.

У контексті гасіння лісових пожеж за допомогою авіації, ці результати застосування коду надають цінну інформацію для оптимізації процесу скидання води на місця пожежі.

1. Визначення оптимальних параметрів скидання. Висота скидання, швидкість краплі та об'єм води – ключові параметри, які впливають на ефективність гасіння пожежі. З використанням цього коду візуалізується, як зміна цих параметрів впливає на поведінку крапель в просторі. Оптимальне встановлення цих параметрів дозволяє досягнути максимальної ефективності використання води та мінімізувати витрати ресурсів. У дослідженні використані бібліотеки Python для обробки даних, такі як Pandas та Numpy, для статистичного аналізу та визначення оптимальних значень параметрів. Використовуються бібліотеки для оптимізації, такі як scipy.optimize, для автоматичного пошуку оптимальних значень параметрів на основі заданих обмежень та функцій витрат.

2. Аналіз покриття пожежі. Візуалізація розподілу крапель у просторі дозволяє оцінити площу покриття водою пожежної території. Визначається, чи вдалося повністю покрити пожежу водою та де можуть бути прогалини. Застосовуються алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання для автоматичного виявлення та аналізу областей, які не були покриті водою. Для розширення та візуалізації передбачено використання геопросторових бібліотек, таких як GeoPandas та Shapely, для моделювання території та планування оптимальних маршрутів для авіаційних суден.

3. Планування маршрутів скидання. Аналіз розподілу крапель у просторі дає опцію виконати задачу з планування оптимальних маршрутів для авіаційних суден, що здійснюють скидання води. Це дозволяє ефективно використовувати час та ресурси, максимізуючи покриття пожежі водою. Замість функції, яка вибирає значення з заданого набору, можна використовувати інші методи генерації даних. Наприклад, можна використовувати рівномірний розподіл, який дозволяє точніше контролювати параметри крапель. Один з можливих варіантів - використання функції np.linspace, яка генерує рівномірно розподілені значення між двома вказаними межами.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Panchenko, S., Bychenko, A., & Nizhnyk, V. (2024). Experimental study of water spreading parameters when extinguishing fires using aircraft sprinklers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10 (127), 64–73.

2. Панченко, С (2021) Тенденції застосування авіаційної техніки для гасіння пожеж. *Надзвичайні ситуації та ліквідація.* Т.5 №1. С. 104–114.

3. Панченко, С., Ніжник, В., Биченко, А., & Луценко, Ю (2022) Аналіз досліджень щодо впливу сил поверхневого натягу на дисперсність крапель під час гасіння лісових пожеж авіаційною технікою. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, 1(13), 55–63. doi:10.33269/nvcz.2022.1(13).55-63 (https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/140)

4. Панченко, С., Ніжник, В.,& Биченко, А., (2023) Алгоритми використання пожежної авіації для гасіння лісових пожеж Надзвичайні ситуації та ліквідація. Т.7 №1. С. 77–88. (https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/149)

5. R. Han, Y. Li, X. Li, X. Li, & Z. Liu (2019) Forest fire early warning system based on an improved back-propagation neural network algorithm. *Journal of Sensors*, Article ID 6571646, 10 pages. Doi: https://doi.org/10.1155/2019/6571646.

6. G. G. Pieri (2011) Monitoring wildfires from space: a new global approach to prevention and early warning. *Remote Sensing*, vol. 3, no. 8, pp. 1706-1730.

7. E. Chuvieco (2011) Remote sensing of forest fires: a review. *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 10, pp. 2104-2123.

8. M. Vodacek, M. Jakubauskas, M. Korkin, A. Laptev, & E. Shevliakova (2006) Early detection of forest fires using wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications (BIOMA'06)*, Ljubljana, Slovenia, Oct. 2006, pp. 223-232.

9. F. Ge, X. Du, S. Ma, Z. Wu, & W. Wang (2013) Forest fire detection based on image processing and analysis of visible and infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 10, pp. 3658-3675. Doi: https://doi.org/10.1080/01431161.2012.762047.

10. Tariq, A.; Shu, H.; Siddiqui, S.; Mousa, B.G.; Munir, I.; Nasri, A.; Waqas, H.; Lu, L. & Baqa, M.F. (2021) Forest fire monitoring usingspatial-statistical and Geo-spatial analysis of factors determining forest fire in Margalla Hills, Islamabad, Pakistan. *Geomat. Nat.Hazards Risk* 2021,12, 1212–1233. https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1920477 [CrossRef]

11. Vigna, I.; Besana, A.; Comino, E. & Pezzoli, A. (2021) Application of the socio-ecological system framework to forest fire risk management: A systematic literature review. *Sustainability* 2021,13, 2121. https://doi.org/10.3390/su13042121 [CrossRef]

12. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). *New York: Springer.*

13. Mohamadi, A. H., Asgarian, A., & Dastorani, M. (2013). Evaluation of forest fire danger based on FFDI index and the influences of different fuels on its severity: A case study of forests in Caspian region, Iran. *Journal of Forest Science*, 29(1), 44-50.

14. Whitman, E., Potter, B. E., & Chavardés, R. D. (2014). Estimating forest fire danger in the Brazilian Amazon using meteorological and remote sensing data. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7), 927-937.

15. Portier, E., Camia, A., & San-Miguel-Ayanz, J. (2015). Estimating live fuel moisture content using meteorological indices: a study across Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 24(2), 197-207.

16. Ospina, J. A., & Scavuzzo, C. M. (2016). A review of the use of machine learning for forest fire danger prediction and modeling. Progress in Physical Geography, 40(5), 610-641.

17. Dennis P. Nolan (2019) Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for the Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities, *Fourth Edition Saudi Aramco*, Milwaukie, OR, United States. Doi: https://doi.org/10.1016/C2017-0-04314-8

REFERENCES

1. Panchenko, S., Bychenko, A., & Nizhnyk, V. (2024). Experimental study of water spreading parameters when extinguishing fires using aircraft sprinklers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10 (127), 64–73. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298916

2. Panchenko, S., Nizhnyk, V., Bychenko, A., & Lutsenko, Yu (2022) Analiz doslidzhen shchodo vplyvu syl poverkhnevoho natiahu na dyspersnist krapel pid chas hasinnia lisovykh pozhezh aviatsiinoiu tekhnikoiu [Analysis of studies on the influence of surface tension forces on the dispersion of droplets during forest fire extinguishing by aircraft] *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(13), 55–63. Doi: https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).55-63

3. Panchenko, S (2021) Tendentsii zastosuvannia aviatsiinoi tekhniky dlia hasinnia pozhezh [Trends in the use of aircraft for firefighting] *Nadzvychaini sytuatsii ta likvidatsiia*. T.5 №1. S. 104–114. Doi: https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114

4. R. Han, Y. Li, X. Li, X. Li, & Z. Liu (2019) Forest fire early warning system based on an improved back-propagation neural network algorithm. *Journal of Sensors*, Article ID 6571646, 10 pages. Doi: https://doi.org/10.1155/2019/6571646.

5. G. G. Pieri (2011) Monitoring wildfires from space: a new global approach to prevention and early warning. *Remote Sensing*, vol. 3, no. 8, pp. 1706-1730. Doi: https://doi.org/10.3390/rs3081706.

6. E. Chuvieco (2011) Remote sensing of forest fires: a review. *Journal of Environmental Management*, vol. 92, no. 10, pp. 2104-2123. Doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.04.022.

7. M. Vodacek, M. Jakubauskas, M. Korkin, A. Laptev, & E. Shevliakova (2006) Early detection of forest fires using wireless sensor networks. *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinspired Optimization Methods and their Applications (BIOMA'06)*, Ljubljana, Slovenia, Oct. 2006, pp. 223-232. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-48103-7_23.

8. F. Ge, X. Du, S. Ma, Z. Wu, & W. Wang (2013) Forest fire detection based on image processing and analysis of visible and infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 34, no. 10, pp. 3658-3675. Doi: https://doi.org/10.1080/01431161.2012.762047.

9. Tariq, A.; Shu, H.; Siddiqui, S.; Mousa, B.G.; Munir, I.; Nasri, A.; Waqas, H.; Lu, L. & Baqa, M.F. (2021) Forest fire monitoring usingspatial-statistical and Geo-spatial analysis of factors determining forest fire in Margalla Hills, Islamabad, Pakistan. *Geomat. Nat.Hazards Risk* 2021,12, 1212–1233. https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1920477 [CrossRef]

10. Vigna, I.; Besana, A.; Comino, E. & Pezzoli, A. (2021) Application of the socio-ecological system framework to forest fire risk management: A systematic literature review. *Sustainability* 2021,13, 2121. https://doi.org/10.3390/su13042121 [CrossRef]

11. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). *New York: Springer.*

12. Baldi, P., Brunak, S., Chauvin, Y., Andersen, C. A. F., & Nielsen, H. (2000). Assessing the accuracy of prediction algorithms for classification: An overview. *Bioinformatics*, 16(5), 412-424.

13. Mohamadi, A. H., Asgarian, A., & Dastorani, M. (2013). Evaluation of forest fire danger based on FFDI index and the influences of different fuels on its severity: A case study of forests in Caspian region, Iran. *Journal of Forest Science,* 29(1), 44-50.

14. Whitman, E., Potter, B. E., & Chavardés, R. D. (2014). Estimating forest fire danger in the Brazilian Amazon using meteorological and remote sensing data. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7), 927-937.

15. Portier, E., Camia, A., & San-Miguel-Ayanz, J. (2015). Estimating live fuel moisture content using meteorological indices: a study across Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 24(2), 197-207.

16. Ospina, J. A., & Scavuzzo, C. M. (2016). A review of the use of machine learning for forest fire danger prediction and modeling. Progress in Physical Geography, 40(5), 610-641.

17. Dennis P. Nolan (2019) Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for the Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities, *Fourth Edition Saudi Aramco*, Milwaukie, OR, United States. Doi: https://doi.org/10.1016/C2017-0-04314-8

Serhii PANCHENKO *(ORCID:0000-0002-1781-3935),*
Cherkassy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes
of National University of Civil Defense of Ukraine

OPTIMIZATION OF WATER DROPLETS USE FOR EFFECTIVE FOREST FIREFIGHTING WITH THE USE OF AIRCRAFT: MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS

The stages of the development of a mathematical model to improve the efficiency of aerial firefighting are presented. The formulas for modeling the dynamics of droplets and their thermal properties in the conditions of real fires are considered. The concept of physical stability of droplets during aerial firefighting, which is directly proportional to the Weber number, is applied. The results of experimental studies used to construct 3D graphs in this paper are presented.

A decision algorithm is developed that incorporates the equations of droplet motion, aerodynamic drag calculations, convective flow modeling, and additional theories such as the Rayleigh-Taylor and Kelvin-Helmoglötz mechanisms to analyze droplet fragmentation. A simulation was developed in the Python programming language using the Matplotlib library. The simulation generates the trajectories of multiple water droplets based on defined parameters such as the initial jet height, the maximum initial droplet velocity, and the range of ejection angles. The trajectory of each drop is calculated taking into account gravity. The coding results confirm that the optimal choice of droplet size, ejection height, and velocity increases the efficiency of forest fire suppression by 25 to 74%, depending on the components of the system and the parameterization of the data. The model also demonstrates the importance of adapting the extinguishing strategy to specific fire and meteorological conditions.

Key words*: aerial firefighting, mathematical modeling, forest firefighting algorithms, Python, convective flow.*