

УДК 629.7:634.0

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.1.77.88>

Сергій ПАНЧЕНКО¹ (ORCID:0000-0002-1781-3935),

Вадим НІЖНИК², доктор технічних наук, старший науковий співробітник
(ORCID:0000-0003-3370-9027),

Артем БИЧЕНКО¹, кандидат технічних наук, доцент (ORCID:0000-0003-3788-3268),

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України,

²Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

АЛГОРИТМИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЖЕЖНОЇ АВІАЦІЇ ДЛЯ ГАСІННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Розкриті особливості алгоритму та покрокового методу для вирішення задачі з підвищення ефективності гасіння лісових пожеж за допомогою авіаційної техніки. Розглянуто загальний алгоритм для визначення успіху першого введення вогнегасних речовин, використовуючи індекс небезпеки лісової пожежі. Окреслено стратегії використання авіації під час гасіння лісових пожеж.

Періоди часу між виявленням, першим скиданням літака (t_a) та часом введення перших наземних підрозділів (t_g) використовувались як прогностичні змінні. Розрізнені за категоріями періоди часу з початку виявлення та до локалізації пожежі (t_{ca}) порівнюються з бінарними оцінками стримування. Алгоритм включає дані про погодні умови під час гасіння, а саме: індекс небезпеки лісової пожежі, максимальну температуру повітря, максимальну середньогодинну швидкість вітру на висоті 10 метрів на відкритій місцевості та мінімальну відносну вологість на період від виявлення до локалізації.

Показано приклад використання покрокового методу при гасінні лісової пожежі вітчизняним літаком АН-32П. Наведено комплекс диференціальних рівнянь для використання у розрахунках при авіаційному гасінні, прогнозування розподілу температури в зоні пожежі, транспортування вогнегасної речовини до зони пожежі та впливу потоків повітря на зони пожежі.

Ключові слова: авіаційне гасіння, математичне моделювання, алгоритми гасіння лісових пожеж, ймовірність успіху, гасіння лісових пожеж.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основний обсяг публікацій з проблем пожежогасіння із застосуванням авіації стосується технічних аспектів реалізації процесу скидання вогнегасних речовин в осередок пожежі [1]. Під час моделювання процесів гасіння вогнища пожежі необхідно розглядати три стадії: процес руйнування макрооб'єму рідини, що скидається зі зливного пристрою з утворенням первинної хмари полідисперсних крапель; еволюцію аерозольної хмари під час осідання в ізотермічних умовах, взаємодію рідинно-краплинної хмари з вогнищем пожежі [1]. У деяких роботах [1] розглянуто математичну модель еволюції аерозольної хмари, що утворюється після фрагментації макрооб'єму рідкого холодоагенту, і взаємодію крапель з осередком пожежі. Наводяться результати чисельного моделювання руху, нагріву та випаровування полідисперсних крапель води, що надходять в осередок пожежі. Зважаючи на складність процесу руйнування макрооб'єму рідини, теоретичний опис не дає змоги отримати прийнятних для практики рекомендацій щодо висоти утворення та характеристик первинної хмари крапель. Перспективним підходом є моделювання на

основі експериментальних досліджень на спеціальних установках з подальшим узагальненням результатів у вигляді критеріального рівняння, що включає числа Рейнольдса, Вебера, Бонда, Фруда, та відповідні симплекси.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. На сьогодні немає єдиної алгоритмічної системи, яка б могла розв'язати задачу з ефективного розрахунку щодо реагування та застосування авіаційної техніки [3-9]. На даний момент ще не визначені періоди часу між виявленням та першим скиданням літака, часом введення перших наземних підрозділів з використанням прогностичних змінних, які б враховували різноманітні стратегії застосування авіації, її тактико-технічні характеристики, які дозволять з математичною точністю визначити ефективність гасіння пожежі.

Постановка задачі та її розв'язання.

Метою даної роботи є розробка вітчизняної математичної моделі щодо обрахунку ефективності гасіння лісової пожежі авіаційною технікою, визначення оптимального шляху її використання на основі алгоритму оперативного реагування та покрокового розрахункового методу, в тому числі літаком АН-32П.

Для вирішення мети поставлено задачі:

- вдосконалення математичної моделі, яка базується на створенні регресійного дерева рішень для розрахунку ефективності успіху першого скидання вогнегасної речовини за допомогою авіаційної техніки;
- формування покрокового методу для точного визначення об'єму води, необхідного для гасіння пожежі літаком АН-32П;
- здійснення опису математичної моделі авіаційного гасіння пожежі, яка враховує конвективні потоки та властивості водних вогнегасних речовин.
- аналіз можливих шляхів розв'язання складних задач, пов'язаних із моделюванням та прогнозуванням авіаційного гасіння лісових пожеж.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів.

Гасіння лісових пожеж – це завдання, яке може бути дуже складним, залежно від розміру та місцезнаходження пожежі. У деяких випадках, для ефективного гасіння потрібна участь авіаційної техніки. Така техніка може бути використана для моніторингу та гасіння лісових пожеж. Одним з прикладів її ефективного використання для такого гасіння є програма США «Глобальний нагляд інформації про лісові пожежі». Ця програма використовує супутники та літаки для надання оперативної інформації про лісові пожежі, що дозволяє більш ефективно розподіляти ресурси для їх гасіння. Використання авіаційної техніки є важливим елементом успішного гасіння лісових пожеж, підтвердження якого описано в нашій попередній роботі щодо AFUE report [2]. Авіація здатна виконувати різні функції в процесі гасіння пожеж, такі як пошук і виявлення пожеж, надання інформації про розташування пожежі, транспортування вогнегасних речовин на місце пожежі та їх розпилення на осередки горіння.

Для ефективного використання авіації під час гасіння лісових пожеж використовуються різні алгоритми та стратегії. Такою із серії простих стратегій є тактика «розкидування», при якій авіаційна техніка орієнтується на залізничну трасу, залізничні станції та інші об'єкти, які можуть бути використані як штучні бар'єри пожежі. Такий підхід дозволяє зменшити ризик поширення пожежі від лісів до населених пунктів, що може привести до серйозних наслідків. Наступним ефективним методом є тактика «плаваючого бомбардування». Даний метод використовується в тому випадку, коли в зону пожежі немає здатності дістатися наземним транспортом або вона розташована в недосяжному, з точки зору тактики, місці. Зазвичай в цьому випадку використовують літаки, які розпилюють велику кількість води чи іншої

вогнегасної речовини, що забезпечує швидке та ефективне гасіння. [3] Ще одним методом є тактика «градієнтного бомбардування». Цей метод використовується в тому випадку, коли лісова пожежа розташована в гірському регіоні, де польоти над зонами пожежі небезпечні для літаків. Інші стратегії, що використовуються при гасінні лісових пожеж з допомогою авіаційної техніки, можуть бути різними, в залежності від конкретних умов та обставин пожежі. Однією з найбільш ефективних стратегій є використання димових шашок. Шашки розкидаються вздовж фронту пожежі, тим самим забезпечуючи чітку лінію, яка може бути використана для навігації літака під час розпилення води на пожежу. Також вона може поєднувати в собі використання теплових карт, які дозволяють визначати найгарячіші ділянки пожежі, напрямки та швидкість вітру, що допомагає пілоту точніше направляти вогнегасну речовину на пожежу.[9] Тим не менш, використання вищеперелічених стратегій буде мати ірраціональний характер без застосування точних та ефективних алгоритмів їх застосування, що дозволить з математичною точністю визначити ефективність гасіння пожежі.

Математичне моделювання гасіння лісових пожеж за допомогою авіаційної техніки є важливим інструментом у підготовці до ефективних вогнегасних операцій. Таке моделювання дозволяє прогнозувати поведінку пожежі та ефективність авіаційного гасіння за різних умов. Одним з прикладів використання математичного моделювання є створення алгоритмів для оптимального використання авіації під час гасіння пожеж. Наприклад, на основі математичної моделі визначається найкоротший шлях до пожежі, оптимальна висота польоту та швидкість руху літака для забезпечення максимальної ефективності вогнегасіння. [4] Також математичні моделі використовуються для прогнозування поведінки пожежі та її поширення. Це дозволяє визначити максимально можливий обсяг пожежі, швидкість її розповсюдження та спрогнозувати майбутній розвиток ситуації. На основі цих даних розробляються оптимальні плани гасіння пожежі, включаючи вибір місця посадки літака та безпечного маршруту. Інший приклад використання математичного моделювання – це створення алгоритмів для точного визначення об'єму води, який необхідний для гасіння пожежі. [5]

Нами було розглянуто алгоритм для визначення успіху першого введення вогнегасних речовин, використовуючи індекс безпеки лісової пожежі. В даному алгоритмі використовуються змінні, залежні від часу, а саме: періоди часу між виявленням та першим скиданням літака (t_a) та часом введення перших наземних підрозділів (t_g) (використовувались як прогностичні змінні); розрізнені за категоріями періоди часу з початку виявлення та до локалізації пожежі (t_{ca}) (порівнюються з бінарними оцінками стримування), у разі ж якщо для аналізу були використані лише наземні ресурси (t_{cg}). Дані про погодні умови під час гасіння кожної пожежі включають індекс безпеки лісової пожежі (далі – ІНЛП), максимальну температуру повітря, максимальну середньогодинну швидкість вітру на висоті 10 м на відкритій місцевості та мінімальну відносну вологість на період від виявлення до локалізації. Ці дані отримуються від найбільш репрезентативних автоматизованих метеостанцій або ж під час польових вимірювань. [6] У дослідженні виявленої пожежі використовуються візуальні оцінки безпеки горючих речовин для опису їх характеристик. Метод оцінки безпеки горючих речовин дозволяє швидко оцінити шари горючих речовин на основі їх безперервності, глибини, висоти та залишків ЛГМ. Оцінки безпеки ЛГМ були розглянуті для 4 шарів ЛГМ: поверхневого шару, приповерхневого шару, чагарникового шару та деревного шару. Загальний рейтинг безпеки ЛГМ визначали за методом [7]. Рейтинги паливної безпеки були приблизно середніми для площі, що була знищена вогнем до локалізації, на основі оцінок попередньо спалених ЛГМ або з прилеглих неспалених ділянок. Для аналізу п'яти рейтингових класів (низький, помірний, високий, дуже високий та екстремальний) були присвоєні порядкові значення (1-5).

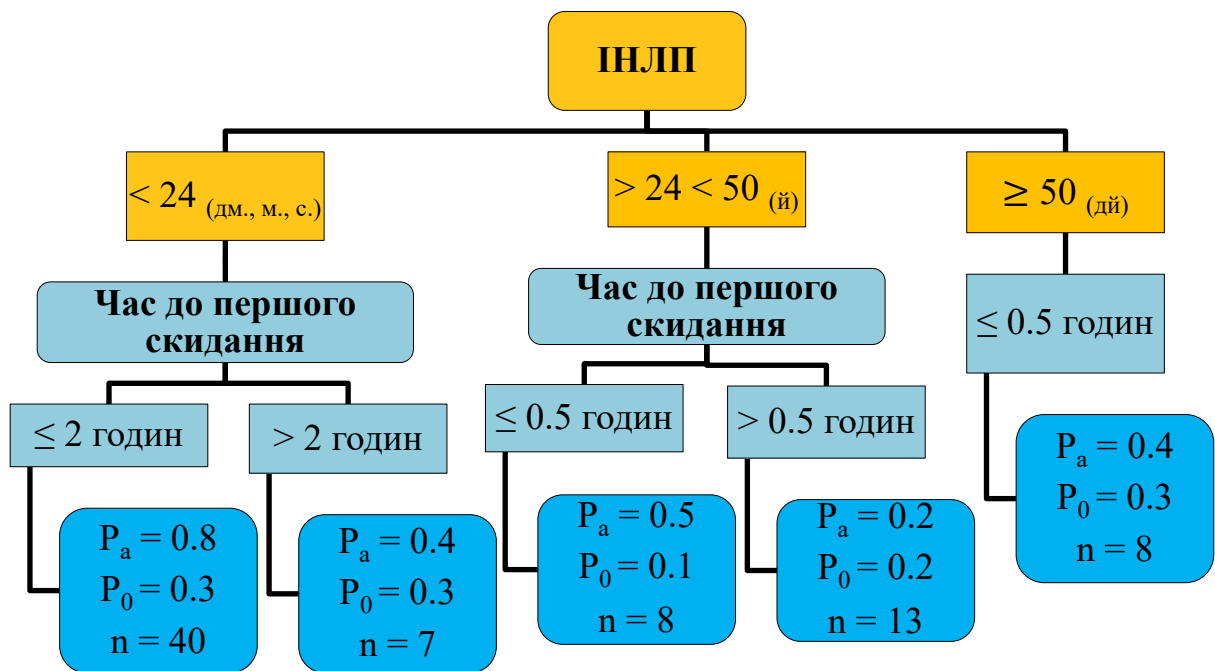


Рисунок 1. Регресійне дерево рішень для визначення успіху першого скидання, використовуючи ІНЛП та час до першого скидання, де: P_a – ймовірність успіху первинного гасіння пожежі з використанням авіаційної техніки; P_0 – ймовірність первинного гасіння пожежі без використання авіаційної техніки; n – кількість пожеж в кожній секції

Наявність чагарникового шару була використана для категоризації структурного типу рослинності в наборі даних за допомогою бінарної категорійної змінної. Пожежам, які горіли в рослинності, яка характеризувалася помітним ярусом чагарнику, було присвоєно значення 1 для цієї змінної, тоді як пожежі, які не мали чагарникового шару, отримали значення 0. Пожежі із значенням чагарнику 1 горіли в таких типах рослинності, як: чагарники, вересові угіддя та ліси з чагарниковим підліском. На відміну від попередніх, значення чагарнику 0, як правило, зустрічалися в районах, що складаються з лісів та лісистих угідь із значною кількістю ЛГМ на землі.

Середній ухил (S) для зони вогню під час першого скидання був поміщений в один із чотирьох класів схилів: 0 = рівний ґрунт (0°), 1 = низький ухил ($<5^\circ$), 2 = помірний ухил ($5-15^\circ$), або 3 = крутий схил ($>15^\circ$). Оцінки початкової площі пожежі (A_i) були отримані від пілотів, які першими прибували на місце НС.

$$\ln [P/(1 - P)] = b_0 + b_1 f_1 + \dots + b_n f_n \quad (1)$$

де P – це ймовірність що $t_{cg} > 2,4,8$ або 24 годин у відповідних наборах даних про пожежі, де $t_{ca} \leq 2$, $2 < t_{ca} \leq 4$, $4 < t_{ca} \leq 8$, або $8 < t_{ca} \leq 24$ годин, b_0 , b_1 або b_n є коефіцієнтами регресії та f_1 і f_n є прогностичними змінними.

Логістичні моделі для кожного набору даних були сформульовані з використанням покрокового методу, заснованого на тестах відношення правдоподібності [10] з тестуванням взаємодій між усіма змінними, обраними в моделі. Граничний показник для значущих змінних, включених у моделі, було визначено за

допомогою інформаційного критерію Акаїке (AIC) [11]. Цей процес використовувався для визначення впливових факторів у кожному з наборів даних. Моделювання дерева класифікації було використано як альтернативний метод для визначення основних змінних щодо прогнозування оцінки стану локалізації пожежі без повітряного гасіння. Моделювання дерева класифікації передбачає перевірку незалежних змінних на підмножинах даних. Класифікаційні дерева були сформульовані з використанням методів, описаних [12] та [13], при цьому кількість розділів у кожному дереві визначається за допомогою техніки перехресної перевірки v -fold. Відповідність логістичних моделей і дерев класифікації порівнювали з використанням частки правильно класифікованих прогнозів (точність передбачення) та коефіцієнта кореляції Метью (МСС) [14]. Для обох цих показників передбачувана ймовірність успіху 0,5 була використана як межа. МСС був використаний, тому що він дає більш збалансований показник відповідності, ніж точність передбачення, коли моделі мають низьку чутливість (частина істинно позитивне передбачення) або специфічність (частка істинно негативне передбачення) або коли групи класів мають нерівномірний розмір. МСС, рівний 1, вказує на ідеальне передбачення, тоді як МСС, рівні 0 і -1, вказують на випадкове та зворотне передбачення.

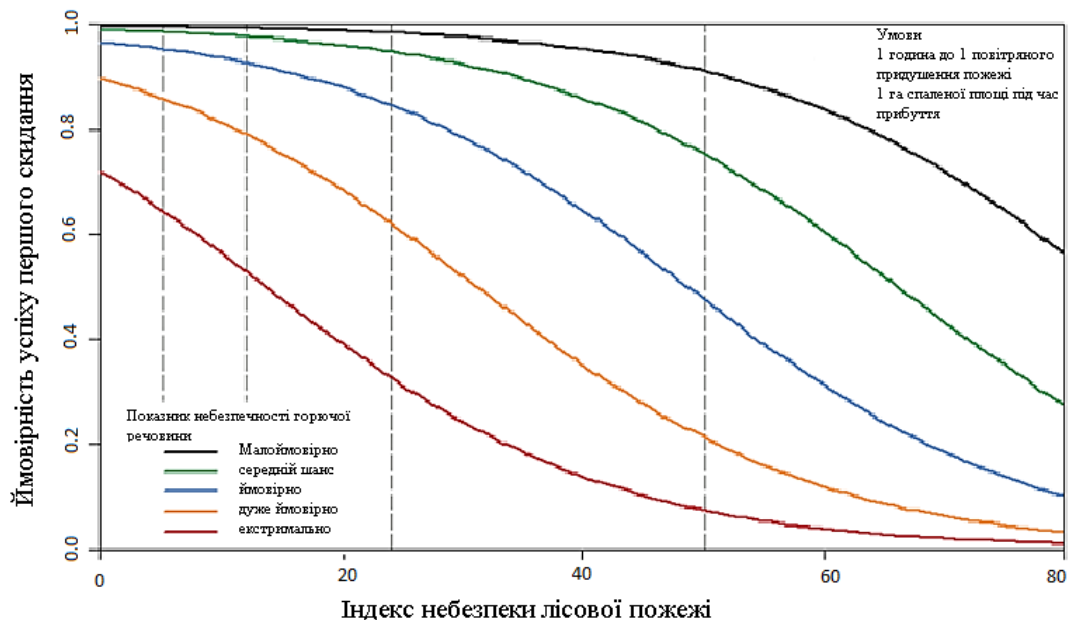


Рисунок 2. Ймовірність успіху першого ефективного скидання вогнегасної речовини

Інтерпретація виявилася досить складною. Використані описи в рис. 1. були визначені в роботах [15,16], а саме:

- <1 % – вкрай мало ймовірно;
- від 1 до 10% – дуже малий шанс;
- від 10 до 33% – мало ймовірно;
- від 33 до 66% – середній шанс;
- від 66 до 90% – ймовірно;
- від 90 до 99% – дуже ймовірно;
- > 99 % – віртуальна впевненість.

Приклади результатів аналізу операційних даних проілюстровані на діаграмі вище (рисунок 2).

Ця діаграма показує ймовірність успіху першого скидання згідно з (FFDI – індекс небезпеки лісової пожежі) з урахуванням різного пожежного навантаження [17], та у разі якщо літак починає гасіння 1 Га пожежі через годину після виявлення.

Спираючись на вищезазначений алгоритм, формуємо послідовність для точного визначення об'єму води, необхідного для гасіння пожежі літаком АН-32П [1] (Таблиця 1):

1. Визначити потужність системи гасіння пожежі літака АН-32П, використовуючи дані з технічних характеристик літака.
2. Обчислити час, необхідний для польоту літака до місця пожежі та повернення на аеродром.
3. Визначити швидкість польоту літака до місця пожежі та відстань до неї.
4. Обчислити час, необхідний для покриття площі пожежі водою, використовуючи відстань та швидкість розповсюдження пожежі, з урахуванням індексу ІНЛП.
5. Визначити об'єм води, який необхідно розпилити на площі пожежі, використовуючи потужність системи гасіння пожежі та час, необхідний для покриття площі водою.

Таблиця 1. Послідовність для точного визначення об'єму води

№	Формула	Пояснення
1	$P = Q \times \Delta H \times g \times \eta$	Де P – потужність системи гасіння пожежі; Q – кількість води, що постачається на борт; ΔH – різниця у висоті між джерелом води та пожежею; g – прискорення вільного падіння; η – коефіцієнт корисної дії системи гасіння пожежі
2	$T = 2 \times d \div v$	Де T – час, необхідний для польоту літака до місця пожежі та повернення на аеродром; d – відстань до місця пожежі; v – швидкість польоту літака
3	$v = d \div t$	Де v – швидкість польоту літака до місця пожежі; d – відстань до місця пожежі; t – час, необхідний для польоту до місця пожежі
4	$T = d \div (v \times (1 + \text{ІНЛП}))$	Де T – час, необхідний для покриття площі пожежі водою; d – відстань до площі пожежі; v – швидкість розповсюдження пожежі; ІНЛП – індекс небезпеки лісової пожежі
5	$V = P \times T$	Де V – об'єм води, який необхідно розпилити на площі пожежі; P – потужність системи гасіння пожежі; T – час, необхідний для покриття площі водою

Наприклад, потужність системи гасіння пожежі складає 12 тонн води на 10 секунд. При швидкості розповсюдження пожежі 30 метрів за секунду на площі 2 гектари необхідно покрити вогонь водою за 5 хвилин. Тоді об'єм води, необхідний для гасіння пожежі, буде 12 тонн на 10 секунд, помножено на 30 секунд (час покриття 2 гектарів водою), що складає 360 тонн води. Таким чином, для точного визначення об'єму води, необхідного для гасіння пожежі літаком АН-32П на площі 2 гектари, необхідно враховувати потужність системи гасіння пожежі, швидкість польоту літака, індекс небезпеки лісової пожежі, швидкість розповсюдження пожежі та площу, яку необхідно покрити водою. [1]

Далі змодельємо задачу з наступними умовами. «Яку кількість літаків АН-32П потрібно використати для повного гасіння верхової лісової пожежі площею 10 гектарів з інтенсивністю поширення 15-20 метрів за секунду, яка розташована в Донецькій

області, з урахуванням базування літаків в місті Київ?» Для розв'язання задачі необхідно спочатку визначити кількість води, яка необхідна для гасіння пожежі. Згідно з алгоритмом, який ми створили раніше, для гасіння площі 2 гектарів необхідний об'єм води 240 м³. Отже, для гасіння площі 10 гектарів необхідний об'єм води буде в 5 разів більший, тобто 1200 м³. При швидкості розповсюдження пожежі 15-20 метрів за секунду, літак АН-32П [1] може здійснити розлив води з висоти 150 метрів, покриваючи смугу землі шириною 50 метрів. Отже, для покриття 10 гектарів (100000 кв. метрів) площі, необхідно здійснити $100000 / 5000 = 20$ проходів літака. Припустимо, що час на підйом та зниження літака з бази в Києві складає 1 годину, а час на один прохід займає 10 хвилин. Отже, загальний час для повного гасіння пожежі складає:

$$(20 \text{ проходів}) \times (10 \text{ хвилин на прохід} + 60 \text{ хвилин на підйом та зниження літака}) = 2400 \text{ хвилин, або } 40 \text{ годин.}$$

Отже, для повного гасіння лісової пожежі потрібно працювати в дві зміни, або використовувати більше літаків.

Загалом, точна кількість літаків АН-32П, яка потрібна для гасіння такої пожежі, залежить від багатьох факторів, таких як інтенсивність поширення пожежі, погодні умови, швидкість літаків, об'єм води на борту, доступність базування тощо. Під час розрахунку кількості літаків АН-32П для гасіння верхової лісової пожежі було отримано, що для повного гасіння необхідно від 15 до 21 рейсів цього типу літака.

Для більш поглибленого та точного розрахунку може бути створена математична модель водного гасіння пожежі, яка враховує конвективні потоки та властивості водних вогнегасних речовин. Вона може бути описана за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса та законів термодинаміки. Використовуючи метод обмежених об'ємів та метод фронтів, можна розбити область на внутрішні та зовнішні зони пожежі. Зовнішню зону можна моделювати як рівномірний потік тепла та газів від пожежі, а внутрішню – як область пожежі, яка розглядається як джерело тепла та маси. Для водного гасіння пожежі можна використовувати закон дифузії Фіка для опису переміщення водних вогнегасних речовин в газовій фазі. Також можна врахувати процеси перетворення води в пар та зворотного конденсації пару в воду. Для цього можна використовувати рівняння збереження маси та енергії, а також закони термодинаміки для опису теплового балансу. За допомогою цих рівнянь можливо отримати розподіл температур, концентрації водних вогнегасних речовин та інших параметрів у просторі та часі. Результати моделювання можуть допомогти в оптимізації використання водних вогнегасних речовин та зменшенні шкоди від пожежі. Для математичного моделювання водного гасіння пожежі з конвективними потоками та властивостями водних вогнегасних речовин використовуються ряд рівнянь та законів термодинаміки. Одним із найбільш важливих рівнянь є рівняння Нав'є-Стокса, яке описує рух рідини або газу. Воно включає три складові:

- рівняння збереження маси,
- рівняння збереження кількості руху,
- рівняння збереження енергії.

Для випадку водного гасіння пожежі це рівняння може бути модифіковано для врахування конвективних потоків. Крім того, для опису переміщення водних вогнегасних речовин використовується рівняння дифузії Фіка, яке включає в себе концентрацію речовини та градієнт концентрації. Для опису процесів перетворення води в пар та зворотної конденсації пару в воду ми можемо використати рівняння збереження маси та енергії, а також закони термодинаміки для опису теплового балансу. Послідовність розрахунку є наступною [19]:

1. Розбиття області на внутрішні та зовнішні зони пожежі.
2. Моделювання зовнішньої зони як рівномірний потік тепла та газів від пожежі.
3. Моделювання внутрішньої зони як області пожежі, яка розглядається як джерело тепла та маси.
4. Використання рівнянь Нав'є-Стокса та дифузії Фіка для опису руху водних вогнегасників та розподілу температур.
5. Використання рівнянь збереження маси.

Загальне математичне формулювання моделі створене за допомогою чат-боту ChatGPT, що описує процес водного гасіння пожежі з урахуванням конвективних потоків та властивостей водних вогнегасних речовин, може бути подане у вигляді системи трьох диференціальних рівнянь в частинних похідних, представлена в математичній нотації:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial T}{\partial x} + S(x,t) \\ \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Mv) &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) &= 0 \end{aligned}$$

де, перше рівняння – це рівняння теплопровідності, яке описує часову еволюцію розподілу температури в матеріалі.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial T}{\partial x} + S(x, t) \quad (2)$$

Перша частина системи, в якій швидкість зміни температури за часом пропорційна другій похідній температури за положенням, мінус добуток швидкості та першої похідної температури за положенням, плюс вихідний член, який залежить як від положення, так і від часу. Повертаючись до загального математичного формулювання у цьому рівнянні $T(x,t)$ – температура в точці x і часу t , α – коефіцієнт теплової дифузії, v – швидкість матеріалу, а $S(x,t)$ – термін описуючий джерело, яке буде поглинати тепло. Це рівняння використовується для моделювання розподілу температури в зоні пожежі та дифузії тепла від зони пожежі.

Друге рівняння – це рівняння збереження маси, яке описує збереження маси вогнегасної речовини, якою зазвичай є вода при авіаційному гасінні.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Mv) = 0 \quad (3)$$

Друга частина системи, в якій швидкість зміни маси по відношенню до часу плюс швидкість зміни потоку маси по відношенню до положення дорівнює нулю. У цьому рівнянні $M(x,t)$ – це маса вогнегасної речовини в точці x і в момент часу t , а v – це швидкість матеріалу. Це рівняння використовується для моделювання транспортування вогнегасної речовини до зони пожежі.

Третє рівняння – це рівняння нерозривності, яке описує збереження маси повітря.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \quad (4)$$

Третя частина системи, в якій швидкість зміни густини за часом плюс швидкість зміни потоку густини за положенням дорівнює нулю. У цьому рівнянні $\rho(x,t)$ –

густина повітря в точці x і часу t , а v – швидкість матеріалу. Це рівняння використовується для моделювання потоку повітря в напрямку зони пожежі. В результаті моделювання можна отримати розподіли температури, концентрації води та парового середовища в просторі та часі, що дозволить визначити ефективність гасіння та підібрати оптимальні параметри для максимально швидкого та ефективного загасання пожежі.

Висновки. Для ефективного гасіння лісових пожеж за допомогою авіаційної техніки необхідно проводити комплексний аналіз умов гасіння та використовувати математичні моделі для точного розрахунку кількості літаків та об'єму води, що необхідний для гасіння пожежі. Нами були розкриті особливості алгоритму для вирішення конкретної задачі, в нашому випадку використанню авіаційної техніки для гасіння лісових пожеж та розробці методу точного визначення об'єму води, необхідного для гасіння пожежі літаком АН-32П. Однак, варто зазначити, що під час розрахунків було використано середні значення ІНЛП для інтенсивності поширення пожежі та розміру лісової пожежі. У реальній ситуації ці значення можуть відрізнятися від середніх, тому кількість літаків може бути змінена залежно від реальних умов гасіння пожежі. Крім того, при розрахунку було враховано базування літаків в місті Київ, що може збільшувати час доставки води до місця пожежі, якщо вона розташована далеко від цього міста. Також слід враховувати, що гасіння пожежі літаками є складним процесом, який вимагає належної координації між пілотами та командами на землі.

Аналіз літературних джерел показав, що у світі, на даний момент, не існує єдиного конкретного та точного алгоритму, який зможе максимально ефективно визначити послідовність дій для реагування, залучення, взаємодії авіаційної техніки під час гасіння лісових пожеж з різним пожежним навантаженням. Базування літаків та час їхнього підльоту виявляється критично визначальним фактором при розрахунках. Алгоритми, які б враховували вплив конвективних потоків на пожежу та особливості водних вогнегасних речовин є визначним аспектом з іншої сторони.

Наведений нами комплекс диференціальних рівнянь може бути використаний в авіаційному гасінні для прогнозування розподілів температур в зонах пожежі, транспортування вогнегасної речовини до зони пожежі та потоку повітря до зони пожежі. Прогнозований розподіл температур може бути використаний для оптимізації місця і кількості вогнегасної речовини, що застосовується. Особливості транспортування вогнегасної речовини і потоків повітря можуть бути використані для оптимізації траєкторії і часу застосування вогнегасної речовини. Таким чином, цей комплекс диференціальних рівнянь може бути потужним інструментом для підвищення ефективності та результативності авіаційного пожежогасіння.

Перспективи подальших досліджень.

В майбутньому нами планується визначити можливості використання теоретичного досвіду наших досліджень на практиці. На даний момент ми зауважимо, що включений в роботу алгоритм та покроковий метод, які будуть застосовані послідовно, зможуть дати загальну оцінку щодо можливостей застосування авіаційної техніки під час гасіння лісових пожеж.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. 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: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1\(13\).55-63](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).55-63)

2. Панченко, С (2021) Тенденції застосування авіаційної техніки для гасіння пожеж. *Надзвичайні ситуації та ліквідація*. Т.5 №1. С. 104–114. Doi: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114>
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. M. Vodacek, M. Jakubauskas, M. Korkein, 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.
7. 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>.
8. Tariq, A.; Shu, H.; Siddiqui, S.; Mousa, B.G.; Munir, I.; Nasri, A.; Waqas, H.; Lu, L. & Baqa, M.F. (2021) Forest fire monitoring using spatial-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]
9. 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]
10. Legmann, P. (1986). Testing all interactions in multiple regression. *Journal of the American Statistical Association*, 81(396), 321–327.
11. Sakamoto, Y., Ishiguro, M., & Kitagawa, G. (1986). Akaike information criterion statistics. Dordrecht, Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*.
12. Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., & Olshen, R. A. (1984). Classification and regression trees. Belmont, CA: *Wadsworth International Group*.
13. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). *New York: Springer*.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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., 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](https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1(13).55-63)
2. Panchenko, S (2021) Tendentsii zastosuvannya aviatsiinoi tekhniki dlia hasinnia pozhezh [Trends in the use of aircraft for firefighting] *Nadzvychni situatsii ta likvidatsiia*. T.5 №1. S. 104–114. Doi: <https://doi.org/10.31731/2524-2636.2021.5.1.104.114>
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. M. Vodacek, M. Jakubauskas, M. Korin, 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.
7. 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>.
8. 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]
9. 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]
10. Legmann, P. (1986). Testing all interactions in multiple regression. *Journal of the American Statistical Association*, 81(396), 321-327.
11. Sakamoto, Y., Ishiguro, M., & Kitagawa, G. (1986). Akaike information criterion statistics. Dordrecht, Netherlands: *Kluwer Academic Publishers*.
12. Breiman, L., Friedman, J., Stone, C. J., & Olshen, R. A. (1984). Classification and regression trees. Belmont, CA: *Wadsworth International Group*.
13. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction (2nd ed.). *New York: Springer*.
14. 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.
15. 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.
16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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 PANCHENKO¹ (ORCID:0000-0002-1781-3935),

Vadim NIZHNYK², Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher
(ORCID:0000-0003-3370-9027),

Artem BYCHENKO¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
(ORCID:0000-0003-3788-3268),

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine,*

²*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection*

ALGORITHMS OF USING FIRE AVIATION TO EXTINGUISH FOREST FIRES

The features of the algorithm and step-by-step method for solving the problem of increasing the efficiency of extinguishing forest fires with the help of aviation equipment are revealed. The general algorithm for determining the success of the first introduction of extinguishing agents using the forest fire hazard index is considered. The strategies for using aviation in extinguishing forest fires are outlined.

The time periods between detection, the first airdrop (t_a), and the time of the first ground units (t_g) were used as predictive variables. The categorized time periods from detection to fire containment (t_{ca}) are compared to binary containment scores. The algorithm includes data on weather conditions during suppression, namely: wildfire danger index, maximum air temperature, maximum average hourly wind speed at an altitude of 10 meters in open terrain, and minimum relative humidity for the period from detection to containment. These data are obtained from the most representative automated weather stations or during field measurements. In the study of a detected fire, visual assessments of the hazard of combustibles are used to describe their characteristics. The combustible hazard rating method allows for a quick assessment of combustible layers based on their continuity, depth, height, and residuals of the (FCM – forest combustible materials)

The scientific novelty of this work is to reveal the features of the algorithm for solving a specific problem, in our case, the use of aviation equipment to extinguish forest fires. Our main goal was to emphasize that there is currently no single specific and accurate algorithm in the world that can most effectively determine the sequence of actions for responding, engaging, and interacting with aircraft during forest firefighting with different fire loads. Aircraft basing and approach time is another crucial factor in the calculations. Algorithms for taking into account convective flows and the properties of water-based extinguishing agents are another important aspect. So, in the future, we plan to apply the method of combining algorithmic functions and draw parallels between them that could be used in practice. At the moment, we note that the algorithm and step-by-step method included in the work, if applied sequentially, will be able to provide a general reasonable assessment of the possibilities of using aircraft in forest firefighting.

Keywords: *aerial firefighting, mathematical modeling, forest firefighting algorithms, probability of success, forest firefighting.*