

УДК 514.18

*Л. М. Куценко, д.т.н., професор (ORCID 0000-0003-1554-8848)**М. В. Ішук¹, ад'юнкт (ORCID 0009-0004-0170-1201)**А. Я. Калиновський², к.т.н., доцент, нач. упр. (ORCID 0000-0002-1021-5799)**Р. І. Коваленко¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-2083-7601)**¹Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна**²ДСНС України, м. Київ, Україна*

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПОРЯДЖЕННЯ ДИРИЖАБЛЯ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ МАСШТАБНИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Розроблено математичну модель руху дирижабля шляхом побудови системи диференціальних рівнянь, а також спосіб оцінки часу впродовж якого контейнер випущений з допомогою гармати пролетить в горизонтальному напрямку певну відстань до падіння на землю в зону ймовірної пожежі та висоти його падіння на основі геометричного підходу. Гасіння та моніторинг масштабних лісових пожеж зручно здійснювати за допомогою дирижабля. У тривіальному випадку вогнегасні хімічні речовини можна просто скидати з дирижабля безпосередньо на вогнище, захищаючись від розпечених теплових газів пожежі. На практиці для гасіння пожежі краще використовувати спеціальний контейнер, наповнений хімічними речовинами. В цьому випадку контейнер до осередку пожежі переміщують по попередньо розрахованій траєкторії. Стабілізований рух контейнера забезпечується його обертанням навколо осі. Проблема полягає у початковому визначенні необхідних значень параметрів, враховуючи які, можна прицільно потрапити контейнером у ділянку місцевості, де знаходиться осередок пожежі. Запропонована математична модель і спосіб є достатньо спрощеними у порівнянні з більш складними комп'ютерними моделями але поряд з цим вони дозволяють більш оперативно встановити основні характеристики руху дирижабля, а також спрогнозувати траєкторії контейнера випущеного горизонтально з гармати цього повітряного судна. Встановлено, що основними небезпеками для дирижаблів є їхня залежність від погодних умов, низька швидкість та маневреність. Небезпеку для дирижабля представляють висхідні потоки гарячого розрідженого повітря із властивою їм високою турбулентністю у зоні виникнення та розповсюдження лісової пожежі. Результати досліджень можуть бути використані під час проектування дирижаблів зі встановленими на них технічними засобами для дискретного подавання вогнегасних речовин.

Ключові слова: модель дирижабля, контейнер з вогнегасною речовиною, диференціальне рівняння, пожежа, траєкторія

1. Вступ

Часом важливу роль у гасінні лісових пожеж відіграють різного типу повітряні судна. Серед таких суден достатньо цікаві тактичні можливості мають дирижаблі. Гондола дирижабля у спрощеному варіанті має вигляд повітряної кулі, яка наповнена гелієм. Оскільки газ легший за повітря, то дирижабль отримує підйомну силу і може підніматися догори в повітря. Оболонка при необхідності може змінювати свою форму завдяки механічним засобам керування. Вони можуть бути залучені до доставки вогнегасних речовин та різних вантажів, а також проведення розвідки і пошукових робіт. Доставка вогнегасних речовин може бути здійснена з допомогою контейнерів спеціальної форми. Водночас проблема полягає у визначенні початкових значень параметрів врахувавши, які можна прицільно потрапити контейнером заповненим вогнегасною речовиною до осередку пожежі. Для цього необхідно розробити методику складання програм комп'ютерної анімації для передбачення положення траєкторії контейнера у просторі та способу визначення моменту досягнення контейнером осередку пожежі.

Таким чином, проблема точності потрапляння контейнера заповненого вогнегасною речовиною, який випущений з дирижабля під час його руху до осередку пожежі є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Існують різні варіанти дистанційної доставки вогнегасних речовин до пожежі з метою її ліквідації. Перелік таких пристроїв досить широкий – від механічної праці доісторичного мисливця до сучасного дирижабля.

В цей перелік входить сучасний варіант гасіння пожеж контейнерним методом та його різновидами – контейнерами циліндричним, конічним тощо [1].

Згідно [2] доставку контейнерів з вогнегасною речовиною до осередку пожежі можна здійснювати з використанням безпілотного літального апарату мультироторного типу. Поряд з цим вказані літальні апарати мають достатньо обмежений час перебування в повітрі, який залежить від ємності батареї, режиму роботи та погодних умов.

В [3] розглянуто можливі випадки застосування безпілотних літальних апаратів для доставки контейнерів заповнених вогнегасними речовинами до осередку пожежі. Використання їх для гасіння пожеж в будівлях визначено як неефективне через те, що потрапляння контейнера в середину будівлі заважає скління. Водночас використання цього способу для гасіння пожеж в природних екосистемах є достатньо ефективним. Навіть невеликі за розмірами контейнери залежно також від виду вогнегасної речовини дозволяли загасити значні площі пожежі.

Як було вказано раніше для доставки контейнера з вогнегасними речовинами до осередку пожежі можуть бути використані різні платформи, зокрема, дирижаблі. З їх допомогою також можна виявляти пожежі ще на початковій стадії їх виникнення. Згідно [4] завдяки поєднанню методів дистанційного зондування з повітря із наземними системами моніторингу можна значно підвищити точність та охоплення систем раннього виявлення. Таке поєднання дозволяє використовувати мультимодальний підхід, який фіксує як масштабну, так і локалізовану інформацію про активність лісових пожеж.

З метою підвищення ефективності процесу виявлення і гасіння пожеж повітряні судна, а серед них також і дирижаблі, можуть здійснювати свої польоти по раніше встановленому маршруту в автономному режимі. Система керування такими повітряними суднами може бути роботизованою але для цього необхідна модель руху дирижабля за різних умов [5]. Особливо складним є процес моделювання руху дирижабля за умови виникнення несправності в його системі автоматизованого керування. Поряд з цим вже існують автоматизовані системи керування в основі яких використані технології штучного інтелекту, які дозволяють підвищити надійність у випадках, коли трапляються аварійні ситуації [6].

Значної ефективності під час гасіння пожеж у випадку застосування для цього декількох дирижаблів в яких автоматизовано процес керування можна досягти при використанні тактики роїв. Відомо, що вже існують розроблені алгоритми [7] для безпілотних літальних апаратів, які дозволяють реалізувати такий спосіб гасіння. Ці алгоритми дозволяють на основі отриманої інформації про місця розміщення осередків пожежі встановлювати черговість для залучень безпілотних літальних апаратів до процесу гасіння з урахуванням відстаней на яких вони знаходяться від цих місць. При такому способі гасіння в першу чергу відправляють безпілотні авіаційні комплекси, які знаходяться якомога ближче до осередків пожежі.

Застосування безпілотних авіаційних апаратів типу дирижаблів можливе також для моніторингу виявлення пожеж в приміщеннях різного призначення [8]. Дирижаблі завдяки своїй конструкції мають здатність тривалий час здійснювати політ автономно. Для виявлення пожежі в дирижаблі встановлюється спеціальна

система у вигляді камери відеоспостереження, яка працює в автоматичному режимі. Ця система може розпізнавати об'єкт та відображати центроїд об'єкта у форматі 2D за допомогою графічного інтерфейсу користувача. Така система здатна виявляти та визначати центроїд об'єкта в координатах x та y .

Важливе значення має форма дирижабля та особливості розміщення його основних конструктивних елементів, що напряму впливає на аеродинамічні характеристики. Частіше всього обираються прості форми але за певних умов експлуатації на значних висотах або на дуже низьких висотах більш ефективними в плані керованості можуть бути багатопелюсткові гібридні дирижаблі [9]. Процес їх проектування є непростим, бо через складну форму навіть провівши розрахунки і отримавши результати встановити рівень їх достовірності буде важко через відсутність перевірених для цього методів.

Значною перевагою дирижаблів у порівнянні з іншими повітряними суднами є те, що за рахунок своєї конструкції вони є легшими за повітря, а тому не потребують великих витрат енергії для зльоту і утримання у повітрі [10]. Також їх перевагою є те, що вони є більш екологічно безпечними з точки зору кількості шкідливих речовин, які утворюються під час згоряння авіаційного палива і мають вплив на навколишнє природне середовище. В деяких моделях дирижаблів взагалі пропонується встановлення зовні оболонки екзоскелета і розміщення на ньому сонячних панелей для генерації електроенергії, яка може бути використана з метою живлення його двигунів.

В роботах [4–10] дирижаблі в більшості розглядаються у якості технічних засобів, які дозволяють з повітря проводити моніторинг оперативної обстановки в певних територіальних зонах на землі.

Таким чином, дирижаблі мають ряд переваг у порівнянні з іншими повітряними суднами і можуть бути застосовані для моніторингу та гасіння пожеж. Для точної доставки вогнегасних речовин до осередків пожежі може бути використаний контейнерний метод. Реалізація цього методу може полягати у метанні контейнера заповненого вогнегасною речовиною з допомогою гармати, яка встановлена на дирижаблі. Поряд з цим забезпечення точного попадання контейнера заповненого вогнегасною речовиною до осередку пожежі з допомогою гармати встановленої на дирижаблі є достатньо складним завданням. Відповідно від точність попадання буде напряму впливати на ефективність гасіння пожежі таким способом.

Отже, невирішеною частиною розглянутої проблеми є те, що залишається малодослідженим взаємовідношення параметрів, які необхідні для реалізації моделі дирижабля обладнаного гарматою для точного метання контейнерів заповнених вогнегасною речовиною до осередку пожежі.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є удосконалення процесу гасіння пожеж шляхом дискретної доставки вогнегасних речовин в контейнері спеціальної конструкції з допомогою дирижаблів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити математичну модель руху дирижабля;
- розробити спосіб оцінки часу впродовж якого контейнер випущений з допомогою гармати пролетить в горизонтальному напрямку певну відстань до падіння на землю в зону ймовірної пожежі та висоти його падіння.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом досліджень є стратегія керування літальним апаратом (балонного типу), який наповнений газом. Мета керування полягає у можливості досягнення необхідної траєкторії контейнера (випущеного з гармати) з метою потрапляння у певну точку зони пожежі. Предметом досліджень є елементи керування дирижаблем, завдяки яким апарат рухається у необхідному напрямку незалежно від напрямку повітряних потоків. Гіпотеза досліджень полягає у можливості гнучкого керування дирижаблем, що призведе до зручності його експлуатації, наприклад, при зльоті або посадці.

Для проведення дослідження обрано метод якісного моделювання – це використання аналогій та узагальнень для створення спрощених представлень складних систем або процесів з метою їх вивчення. Якісні моделі часто легше зрозуміти та інтерпретувати, ніж складні математичні моделі. Метод комп'ютерного моделювання – це згенеровані комп'ютером моделі реальних об'єктів, процесів або систем. При цьому знаходяться раціональні (оптимальні) рішення, часто уникаючи небезпечних експериментів як у реальному світі. Одержані моделі на комп'ютері втілюються у вигляді алгоритму.

5. Розробка математичної моделі руху дирижабля

Рух дирижабля доцільно розглядати як комбінацію двох незалежних переміщень: горизонтального, який відбувається з постійною швидкістю (якщо нехтувати опором повітря), і вертикального, який зазнає впливу гравітації, тобто прискорення вільного падіння. На дирижабль діє сила тяжіння, яка спричиняє прискорення вільного падіння, тобто $9,8 \text{ м/с}^2$. Це означає, що вертикальна швидкість дирижабля змінюється з часом, прискорюючись донизу. Важливо пам'ятати, що ці два рухи є незалежними. Горизонтальний рух не впливає на вертикальний, і навпаки. Єдине, що є спільним для обох рухів – це час.

Наприклад, щоб знайти дальність польоту дирижабля, спочатку потрібно визначити час польоту, виходячи з вертикального руху (враховуючи початкову вертикальну швидкість і прискорення вільного падіння), а потім використовувати цей час для розрахунку горизонтальної дальності, враховуючи горизонтальну швидкість.

Дирижаблі можуть швидко переміщуватися між місцями пожеж і скидати вогнегасну суміш на велику площу, що робить їх корисними для гасіння. Дирижаблі можуть дістатися до місць, куди пожежна техніка не може проїхати, наприклад, у лісистій місцевості або гірських районах. Для досягнення максимальної ефективності гасіння необхідно точно розрахувати траєкторію польоту дирижабля, швидкість вітру та обсяг вогнегасної речовини. Сильний вітер та інші погодні умови можуть ускладнити або унеможливити використання дирижабля для гасіння пожеж. У певних випадках дирижаблі можуть бути використані для евакуації людей із зон, охоплених пожежею.

Гасіння масштабних пожеж за допомогою дирижабля має низку особливостей. Дирижаблі, як літальні апарати, можуть перевозити великі обсяги води або вогнегасної піни, що дозволяє ефективно боротися з вогнем на значних площах, особливо у важкодоступних місцях, таких як ліси або райони з обмеженим доступом для наземної техніки. Дирижаблі можуть швидко переміщуватися між різними ділянками пожежі, що дозволяє оперативно реагувати на зміни у вогнищі загоряння. Вони можуть перевозити значно більшу кількість вогнегасної речовини.

ни, ніж традиційні літаки або гелікоптери, що збільшує ефективність гасіння. На відміну від літаків, дирижаблі можуть працювати на низьких висотах, що дозволяє більш точно направляти потік вогнегасної речовини на вогнище пожежі. Вони можуть проникати у райони, куди не можуть дістатися наземні пожежні команди, наприклад, у ліси, гори або райони з обмеженим доступом. Дирижаблі можуть використовувати воду, піну, порошок та інші вогнегасні речовини, що дозволяє адаптувати їх до різних типів пожеж. Але дирижаблі чутливі до погодних умов, таких як сильний вітер або опади, що може впливати на їхню маневреність і ефективність. Крім того, вартість експлуатації дирижаблів може бути вищою, ніж у традиційних літальних апаратів.

Перед розробкою математичної моделі руху дирижабля необхідно чітко розуміти, що вага (у фізичному сенсі) – це сила, яка залежить від гравітації, а маса – це характеристика тіла, яка не змінюється в залежності від місця знаходження. Отже, вага – це сила, а маса – це величина, що характеризує тіло.

Диференціальні рівняння руху моделі дирижабля описують його переміщення в просторі, враховуючи сили, що діють на нього. Ці рівняння зазвичай складаються з системи рівнянь, що включають лінійні та кутові переміщення, а також їх похідні за часом, які представляють швидкість та прискорення. Три лінійні координати (x , y , z) визначають положення дирижабля в просторі та три кутові координати (нахил, тангаж, ролання), що визначають його орієнтацію. Сила тяги залежить від потужності двигунів та кута нахилу, визначає рух вперед, вгору/вниз. Сила підйомна виникає через різницю тиску повітря та визначає вертикальний рух. Сила тяжіння діє вертикально вниз, залежить від маси дирижабля. Сила опору повітря залежить від швидкості та форми дирижабля, діє у протилежному напрямку руху. Сила вітру – це зовнішня сила, яка може значно впливати на рух дирижабля. Моменти сил визначають обертальний рух навколо осей, пов'язані з силою тяги та аеродинамічними силами.

Система диференціальних рівнянь руху дирижабля має вигляд:

$$m \cdot a = F_{\text{тяги}} + F_{\text{підйома}} + F_{\text{тяжіння}} + F_{\text{опору}} + F_{\text{вітру}}, \quad (1)$$

$$I \cdot \alpha = M, \quad (2)$$

де m – маса дирижабля; a – прискорення; F – сили, що діють на дирижабль; I – момент інерції дирижабля; α – кутове прискорення; M – моменти сил.

Диференціальні рівняння дирижабля описують його рух у повітрі, враховуючи сили, що діють на нього, такі як тяжіння, підйомна сила, опір повітря та тяга двигунів. Ці рівняння зазвичай є нелінійними і можуть бути дуже складними, особливо для дирижаблів великих розмірів або при врахуванні змін умов навколишнього середовища. Математична модель дирижабля може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описують рух у трьох вимірах, а також обертання навколо трьох осей. Для спрощення, можна розглянути рух дирижабля у двох вимірах (наприклад, на горизонтальній площині). У цьому випадку, рівняння будуть виглядати наступним чином:

$$m \cdot dV_x / dt = F_x - D_x - W_x \cdot V_x^2, \quad (3)$$

$$m \cdot dV_y / dt = F_y - D_y - W_y \cdot V_y^2, \quad (4)$$

$$I \cdot d\omega / dt = M_z, \quad (5)$$

де m – маса дирижабля; V_x , V_y – складові швидкості по осях x та y ; dV_x/dt , dV_y/dt – прискорення по осях x та y ; F_x , F_y – сили, що діють на дирижабль по осях x та y (тяги двигунів); D_x , D_y – сили опору повітря по осях x та y ; W_x , W_y – коефіцієнти опору повітря по осях x та y ; I – момент інерції дирижабля відносно вертикальної осі; ω – кутова швидкість навколо вертикальної осі; M_z – момент, що діє на дирижабль, який викликає обертання (наприклад, від рулів).

Наведені рівняння описують рух дирижабля як функції часу, враховуючи сили, що діють на нього та його інерційні властивості. Розв'язання цих диференціальних рівнянь дозволяє прогнозувати траєкторію руху дирижабля та його поведінку в різних умовах. Диференціальні рівняння руху дирижабля можуть бути дуже складними, особливо при врахуванні нелінійних ефектів та змінних умов. Для розв'язання цих рівнянь зазвичай використовуються чисельні методи, оскільки аналітичні розв'язки часто недосяжні. Врахування початкових умов (початкова швидкість, положення, кути) є необхідним для визначення конкретного розв'язку системи диференціальних рівнянь.

6. Розробка способу оцінки часу польоту контейнера випущеного з гармати дирижабля

Динаміка дирижабля описує рух і поведінку його в повітрі, враховуючи супутні сили – такі як підйомна сила, тяга, опір повітря і гравітація. Динаміка дирижабля вивчає, як літальний апарат змінює своє положення в просторі, як він маневрує, і як він реагує на зміни умов навколишнього середовища. Траєкторії руху дирижабля можу бути описані за допомогою диференціальних рівнянь, які враховують сили, що діють на дирижабль, та його масу. Ці рівняння дозволяють моделювати рух дирижабля в різних умовах та проектувати його поведінку. Вивчення динаміки дирижабля є важливим для проектування, будівництва та експлуатації цих повітряних суден, забезпечуючи їх безпеку та ефективність.

Для розробки способу оцінки часу впродовж якого контейнер випущений з допомогою гармати пролетить в горизонтальному напрямку певну відстань до падіння на землю в зону ймовірної пожежі та висоти його падіння попередньо необхідно прийняти певні умови та обмеження. Вважатимемо, що з гармати, яка знаходиться на висоті H на борту дирижабля, пролунав постріл, і контейнер вилітає у горизонтальному напрямку (рис. 1). Потужність пострілу не повинна спричиняти аварійну ситуацію на борту дирижабля (необхідний енергетичний запас принаймні в сотню разів). Нехай початкова швидкість снаряда V_0 , сила опору середовища $R = k \cdot V$ ($k = \text{const}$). Вага контейнера P умовних одиниць.

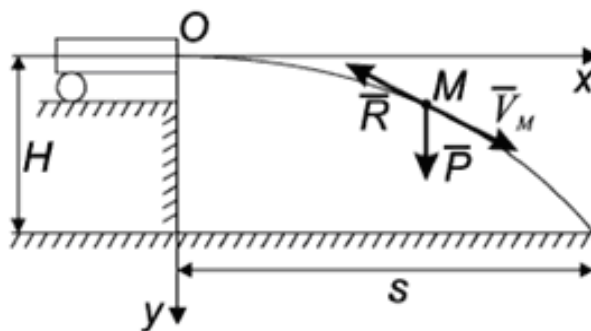


Рис. 1. Умовна схема гармати в дирижаблі, яка розташовану на висоті H на рівні дирижабля

З урахуванням вказаних раніше умов необхідно визначити:

1) час t_1 , впродовж якого контейнер пролетить в горизонтальному напрямку відстань S до падіння на землю (до зони пожежі);

2) відстань H , на яку контейнер опуститься до низу за цей час при русі у «майже» горизонтальному напрямку.

Для знаходження шуканих величин наведемо ілюстрації компонентів диференціальних рівнянь руху снаряду в проекціях на осі O_x та O_y :

$$\frac{P}{g} \cdot \ddot{x} = R_x, \frac{P}{g} \cdot \ddot{y} = P + R_y, \quad (6)$$

де $R_x = -k \cdot \dot{x}$, $R_y = -k \cdot \dot{y}$ – проекції сили опору на осі координат.

Введемо позначення $\frac{k \cdot g}{P} = \omega_0^2$, тоді одержимо:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \ddot{y} + \omega_0^2 y = g. \quad (7)$$

Загальний розв'язок першого рівняння системи рівнянь має вигляд:

$$x = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} = C_1 + C_2 e^{-\omega_0^2 t}, \quad (8)$$

де $k_1 = 0$, $k_2 = -\omega_0^2$ – корені характеристичного рівняння.

Враховуючи початкові, при $t = 0$; $x = 0$; $\dot{x} = V$, співвідношення (2) приймає вигляд:

$$x = \frac{V_0}{\omega_0^2} \cdot (1 - e^{-\omega_0^2 t}). \quad (9)$$

На основі (4) визначимо час t_1 , протягом якого контейнер пролетить відстань S в горизонтальному напрямку, тобто при якому $x = S$.

$$t_1 = -\frac{1}{\omega_0^2} \ln \left(1 - \frac{S \cdot \omega_0^2}{V_0} \right). \quad (10)$$

Загальний розв'язок другого рівняння системи (1) і має вигляд:

$$y = y + y_1, \quad (11)$$

де $y_1 = C_1 + C_2 e^{-\omega_0^2 t}$ – загальний розв'язок відповідного однорідного рівняння;

$$y \rightarrow \frac{g}{\omega_0^2} \cdot t$$

Частковий розв'язок неоднорідного рівняння одержуємо, враховуючи початкові умови.

При $t = 0$, $y = 0$, $y' = 0$ одержимо:

$$y = \frac{g}{\omega_0^2} \cdot \left(\frac{1}{\omega_0^2} e^{-\omega_0 t} + t - \frac{1}{\omega_0^2} \right), \quad (12)$$

Так як при $t = t_1$, $y = H$, то на основі (7) матимемо:

$$H = \frac{P}{k} \cdot \left(\frac{P}{k \cdot g} e^{-\frac{k \cdot g}{P} \cdot t_1} + t_1 - \frac{P}{k \cdot g} \right), \quad (13)$$

$$t_1 = \frac{P}{k \cdot g} \ln \left(1 - \frac{S \cdot k \cdot g}{P \cdot V_0} \right). \quad (14)$$

В результаті було визначено взаємовідношення параметрів, які необхідні для реалізації спрощеної моделі дирижабля, що «стріляє». З допомогою рівняння (13) можна оцінити висоту H на яку контейнер опуститься за час подолавши певну горизонтальну відстань S , а рівняння (14) дозволяє визначити час t_1 за який контейнер пролетить горизонтально відстань S .

Необхідно зазначити, що величини параметрів взаємопов'язані і нелінійно залежать один від одного. Саме в цьому полягає складність розрахунків.

Для пояснення розглянемо траєкторії контейнера випущеного горизонтально з гармати на дирижаблі. Для розрахунків приймаємо значення $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Значення інших параметрів наведені в табл. 1.

Табл. 1. Значення параметрів для розрахунку траєкторії контейнера випущеного горизонтально з гармати на дирижаблі

P	k	V_0	S
Вага контейнера, кг	Коефіцієнт пропорційності	Початкова швидкість, м/с	Відстань вздовж горизонталі, м
10	0,5	25	29

Підставивши вказані значення в рівняння (13) та (14) отримаємо наступні результати:

- контейнер пролетить в горизонтальному напрямку відстань 29 м до падіння на землю (до зони пожежі) за час 2,8864 с;
- відстань, на яку контейнер опуститься за цей час складає 18,559 м.

7. Обговорення результатів використання моделі дирижабля

Запропоновані в роботі спрощені рівняння моделі руху дирижабля як функції часу, враховуючи сили, що діють на нього та його інерційні властивості дозволяють проектувати траєкторію та його поведінку в різних умовах. Поряд з цим, також були запропоновані рівняння для оцінки часу за який контейнер пролетить горизонтально певну відстань та висоту на яку від опуститься за цей час. Варто відмітити, що ці рівняння є достатньо спрощеними у порівнянні з більш складними комп'ютерними моделями але поряд з цим вони дозволяють більш оперативно встановити основні характеристики руху дирижабля, а також спрогнозувати траєкторії контейнера випущеного горизонтально з гармати цього повітряного судна.

Використання запропонованої моделі руху та рівнянь обмежується тим, що постійно необхідно початково задавати певні умови та значення величин для отримання відповідного результату. Це ускладнює процес дослідження залежностей різних змінних, які можуть впливати на рух дирижабля і контейнера випущеного

з його гармати. В такому випадку достовірність отриманих результатів на пряму буде залежати від кількості розглянутих варіантів комбінації змінних.

Недоліком запропонованих моделі та способу оцінки часу і висоти падіння контейнера випущеного з гармати є те, що вони не враховують ряд важливих характеристик, як наприклад, форму оболонки, гондоли, кілів і інших елементів. Водночас ці характеристики дозволяють врахувати інші більш складні комп'ютерні моделі.

Подальший розвиток цього дослідження може полягати в удосконаленні запропонованої моделі та способу оцінки часу і висоти падіння контейнера випущеного з гармати за рахунок введення додаткових змінних та побудови на їх основі комп'ютерної моделі дирижабля, яка дозволить імітувати його аеродинамічні характеристики, поведінки в різних умовах і оцінювати також його стійкість.

8. Висновки

1. Розроблена математична модель руху дирижабля, яка являє собою систему диференціальних рівнянь та враховує ряд важливих змінних, а саме: масу дирижабля; складові швидкості по осях x та y ; прискорення по осях x та y ; сили, що діють на дирижабль по осях x та y (тяга двигунів); сили опору повітря по осях x та y ; коефіцієнти опору повітря по осях x та y ; момент інерції дирижабля відносно вертикальної осі; кутову швидкість навколо вертикальної осі та момент, що діє на дирижабль, який викликає обертання (наприклад, від рулів).

2. Розроблено спосіб оцінки часу впродовж якого контейнер випущений з допомогою гармати пролетить в горизонтальному напрямку певну відстань до падіння на землю в зону ймовірної пожежі та висоти його падіння. Для розрахунків з використанням запропонованого способу попередньо необхідно прийняти певні умови та обмеження. Цей спосіб є розрахунковим, тому для знаходження шуканих величин необхідно задавати вагу контейнера, значення коефіцієнта пропорційності, початкову швидкість та відстань вздовж горизонталі. При заданих значеннях ваги контейнера в 10 кг, коефіцієнта пропорційності 0,5, початкової швидкості 25 м/с та відстані вздовж горизонталі 29 м розрахунковий час падіння на землю (до зони пожежі) контейнера складатиме 2,8864 с, а відстань на яку він опуститься за цей час становитиме 18,559 м. Для отримання залежностей різних змінних, які можуть впливати на рух дирижабля і контейнера випущеного з його гармати необхідно розглядати декілька варіантів комбінації змінних.

Література

1. Калиновський А. Я. Розробка моделей багатограних контейнерів для доставки вогнегасних речовин. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2021. Вип. 101. С. 108–123. Url: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2021_21_19
2. Abdel Ilah N. Alshbatat. Fire Extinguishing System for High-Rise Buildings and Rugged Mountainous Terrains Utilizing Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing. 2018 Vol. 10. P. 23–29. doi: 10.5815/ijigsp.2018.01.03
3. Burchan A., Emre S., Jian T., Michael J. S. Use of Fire-Extinguishing Balls for a Conceptual System of Drone-Assisted Wildfire Fighting. Drones. 2019. Vol. 3. doi: 10.3390/drones3010017
4. Carta F., Zidda C., Putzu M., Loru D., Anedda M., Giusto D. Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. Sensors. 2023. 23(14). 6635. URL:

https://www.researchgate.net/publication/372744432_Advancements_in_Forest_Fire_Prevention_A_Comprehensive_Survey

5. Wang Y., Zhou W., Luo J., Yan H., Pu H., Peng Y. Reliable Intelligent Path Following Control for a Robotic Airship Against Sensor Faults. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2019. Vol. 24. P. 2572–2582. doi: 10.1109/TMECH.2019.2929224

6. Yu Z., Zhang Y., Jiang B., Su C-Y., Fu J., Jin Y. Distributed Fractional-Order Intelligent Adaptive Fault-Tolerant Formation-Containment Control of Two-Layer Networked Unmanned Airships for Safe Observation of a Smart City. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022. Vol. 52. P. 9132–9144. doi: 10.1109/TCYB.2021.3052875

7. Ghamry K. A., Kamel M. A., Zhang, Y. Zhang. Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (13–16 June 2017, Miami, FL, USA). 2017. doi: 10.1109/ICUAS.2017.7991527

8. Shah H. N. M., Ab Rashid M. Z., Kamis Z., Aras M. S. M., Ali N. M., Wasbari F., Abu Bakar B. Design and Develop an Autonomous UAV Airship for Indoor Surveillance and Monitoring Applications. *International Journal on Informatics Visualization*. 2018. Vol. 2. № 1. URL: https://www.researchgate.net/publication/323194960_Design_and_Develop_an_Autonomous_UAV_Airship_for_Indoor_Surveillance_and_Monitoring_Applications

9. Manikandan M., Shah R. R., Priyan P., Singh B., Pant R. S. A parametric design approach for multi-lobed hybrid airships. *The Aeronautical Journal*. 2024. Vol. 128. doi: 10.1017/aer.2023.37

10. Alhamzah A., S Olutunde O. Design, Analysis and Development of a Mini Airship. *IEEE Conference on Aerospace* (01–08 March 2025, Big Sky, MT, USA). doi: 10.1109/AERO63441.2025.11068472

L. Kutsenko, DSc, Professor

M. Ishchuk¹, Adjunct

A. Kalynovskiy², PhD, Associate Professor, Head of the Department

R. Kovalenko¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

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

²State Emergency Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GEOMETRIC MODELING OF AIRSHIP DEVICE FOR EXTENSION OF LARGE FOREST FIRES

A mathematical model of the airship's motion has been developed by constructing a system of differential equations, as well as a method for estimating the time during which a container released from a cannon will fly horizontally a certain distance before falling to the ground in the zone of a probable fire and the height of its fall based on a geometric approach. Extinguishing and monitoring large-scale forest fires is conveniently carried out using an airship. In a trivial case, fire-extinguishing chemicals can simply be dropped from the airship directly onto the fire, protecting against the hot thermal gases of the fire. In practice, it is better to use a special container filled with chemicals to extinguish a fire. In this case, the container is moved to the fire center along a pre-calculated trajectory. Stabilized movement of the container is ensured by its rotation around its axis. The problem lies in the initial determination of the necessary parameter values, taking into account which, it is possible to accurately hit the container into the area where the fire center is located. The proposed mathematical model and method are quite simplified compared to more complex computer models, but at the same time they allow to more quickly establish the main characteristics of the airship's motion, as well as to predict the trajectories of a container released horizontally from the cannon of this airship. It has been established that the main dangers for airships are their dependence on weather conditions, low speed and maneuverability.

The danger for the airship is represented by ascending flows of hot rarefied air with their inherent high turbulence in the zone of occurrence and spread of a forest fire. The results of the research can be used when designing airships with technical means installed on them for discrete supply of fire extinguishing agents.

Keywords: airship model, container with fire extinguishing agent, differential equation, fire, trajectory

References

1. Kalynovskyi, A. (2021). Rozrobka modelei bahatohrannykh konteineriv dlia dostavky vohnenasnykh rehovyn. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 101, 108–123. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2021_21_19
2. Abdel, I. (2018). Fire Extinguishing System for High-Rise Buildings and Rugged Mountainous Terrains Utilizing Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing, 10, 23–29. doi: 10.5815/ijigsp.2018.01.03
3. Burchan, A., Emre, S., Jian, T., Michael, J. (2019). Use of Fire-Extinguishing Balls for a Conceptual System of Drone-Assisted Wildfire Fighting. Drones, 3. doi: 10.3390/drones3010017
4. Carta, F., Zidda, C., Putzu, M., Loru, D., Anedda, M., Giusto, D. (2023). Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. Sensors, 23(14), 6635. Available at: https://www.researchgate.net/publication/372744432_Advancements_in_Forest_Fire_Prevention_A_Comprehensive_Survey
5. Wang, Y., Zhou, W., Luo, J., Yan, H., Pu, H., Peng, Y. (2019). Reliable Intelligent Path Following Control for a Robotic Airship Against Sensor Faults. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 24, 2572–2582. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8765402>
6. Yu, Z., Zhang, Y., Jiang, B., Su, C-Y., Fu, J., Jin, Y. (2022). Distributed Fractional-Order Intelligent Adaptive Fault-Tolerant Formation-Containment Control of Two-Layer Networked Unmanned Airships for Safe Observation of a Smart City. IEEE Transactions on Cybernetics, 52, 9132–9144. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9364927>
7. Ghamry, K. A., Kamel, M. A., Zhang, Y. (2017). Multiple UAVs in forest fire fighting mission using particle swarm optimization. International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7991527>
8. Shah, H. N. M., Ab Rashid, M. Z., Kamis, Z., Aras, M. S. M., Ali, N. M., Wasbari F., Abu Bakar B. (2018). Design and Develop an Autonomous UAV Airship for Indoor Surveillance and Monitoring Applications. International Journal on Informatics Visualization, 2, 1. Available at: https://www.researchgate.net/publication/323194960_Design_and_Develop_an_Autonomous_UAV_Airship_for_Indoor_Surveillance_and_Monitoring_Applications
9. Manikandan, M., Shah, R. R., Priyan, P., Singh, B., Pant, R. S. (2024). A parametric design approach for multi-lobed hybrid airships. The Aeronautical Journal, 128. doi: 10.1017/aer.2023.37
10. Alhamzah, A., S Olutunde, O. (2025). Design, Analysis and Development of a Mini Airship. IEEE Conference on Aerospace. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11068472>

Надійшла до редколегії: 17.09.2025

Прийнята до друку: 20.10.2025