УДК 614.841.45

ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ОПЕРАЦІЯХ ІЗ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖ В ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.22-31

Хижняк В. В.*, ORCID iD 0000-0003-0437-749X
Шевченко В. Л., ORCID iD 0000-0002-8360-0217
*E-mail: ndc.avia@gmail.com

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ
Надійшла до редакції: 24.07.2023
Пройшла рецензування: 15.08.2023

КЛЮЧОВІ СЛОВА:
безпілотна авіаційна система, безпілотний літальний апарат, пожежі в екосистемах, повітряний пошук і моніторинг.

АНОТАЦІЯ
Послідовники світової практики боротьби з пожежами в екологічних системах, орієнтуючись на інтенсивний розвиток і розширення сфер застосування безпілотних авіаційних систем (далі – БАС), шукають шляхи ефективної реалізації їх зростаючого потенціалу, а також нормативно-організаційні підходи щодо застосування в єдиній авіаційній системі разом із пілотованими повітряними суднами. На сьогодні у контексті виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної з пожежами в екосистемах, БАС здатні здійснювати повітряну розвідку, контролювати та фіксувати поточні параметри, оперативно передавати відеоматеріали палаючого осередку та тенденції його розвитку. Крім цього, застосування БАС дає можливість визначити напрямок і швидкість поширення вогню, динаміку зміни конфігурації палаючої крайки, визначати найкоротші та безпечні маршрути висування аварійно-рятувальних команд, а також відстань до найближчих населених пунктів, яким загрожує лісова пожежа. Для оцінювання ефективності БАС, які належать до складних технічних засобів, мають застосовуватись методологічні підходи, які узгоджуються з визнаними поглядами на загальну теорію ефективності складних систем. У роботі обґрунтовано критерії та показники, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС в операціях з ліквідації пожеж в екологічних системах. Запропоновані критерії та показники ефективності застосування БАС дають змогу сформувати множину ефективних альтернативних варіантів БАС, спроможних вирішувати завдання, визначені для авіації ДСНС з ліквідації пожеж в екологічних системах, з подальшим вибором серед них оптимального поєднання характеристик та варіанта БАС. Аналіз та порівняння показників ефективності застосування різноманітних БАС для розв'язання однотипних завдань в інтересах ДСНС дають змогу суттєво підвищити оперативність отримання необхідної інформації для ухвалення своєчасних управлінських рішень відповідними органами у процесі планування та виконання операцій з ліквідації пожеж в екосистемах.

Постановка проблеми. Серед усіх типів наземних природних екосистем найбільш поширеними є ліси. Запас рослинної маси в лісах становить 82% фітомаси Землі, а сукупний запас деревини перевищує 300 млрд м^3. На сучасному етапі розвитку суспільства виникає все більше протиріч між людиною і природою. Посилення ненормованого рекреаційного навантаження на ліси після пригнічення у разі вирубування призводить до другого глобального чинника їх знищення – зростання кількості та збільшення масштабів лісових пожеж. Лісові пожежі зумовлюють виникнення стихійних лих, катастроф і надзвичайних ситуацій, наслідки яких можуть бути жахливими [1].

В Україні кожна третя пожежа виникає у природних екосистемах, а це в середньому понад 27 тис. пожеж на рік

загальною площею понад 25 тис. га (див. рис. 1–2) [2].

Що ж до лісових пожеж, то Україна вважалася відносно благополучною країною. За даними ФАО (Food and Agriculture Organization – Продовольча та сільськогосподарська організація ООН), річна площа пожеж останніми роками в Україні у перерахунку на один гектар лісових земель була однією з найнижчих у східноєвропейському регіоні [3–4]. Це підтверджує високий рівень ефективності охорони лісів від пожеж.

Рисунок 1 – Кількість лісових пожеж *[2]*

Рисунок 2 – Площа лісових пожеж *[2]*

Однак річна кількість лісових пожеж в Україні останніми роками збільшувалася, що, як уже зазначалося, є загальносвітовою тенденцією і відображає посилення антропогенного впливу на ліси та може бути результатом глобальних змін клімату [5]. Водночас, за оцінками фахівців із Німеччини, Франції, Англії, які ознайомлювалися із системою охорони лісів від пожеж в Україні, технічне забезпечення ліквідації лісових пожеж є на незадовільному рівні. Недостатнім також є рівень співпраці та взаємодії між лісовою пожежною охороною та регіональними підрозділами ДСНС України.

Світовий досвід свідчить про інтенсивне зростання ролі та поширення переліку завдань, які покладаються на парк БАС у складі єдиної авіаційної компоненти ДСНС у системі запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (далі – НС) [6]. А досвід застосування авіації ДСНС за двадцять років свідчить, що найбільш масштабними НС, коли авіація здійснювала забезпечення дій наземних сил, були НС, пов’язані з гасінням пожеж у природних екосистемах (лісах, степах та торфовищах), і евакуація постраждалих із місць НС.

Водночас ці надзвичайні ситуації для авіації ДСНС України є і найбільш складними, оскільки потребують масованого застосування сил і засобів у обмежений час, чіткої взаємодії, якісного управління та всебічного забезпечення.

В авіації ДСНС для боротьби з пожежами створено спеціальний протипожежний підрозділ у складі Спеціального авіаційного загону Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту (м. Ніжин), повітряні судна якого – літаки «Ан-32П» та вертольоти «Мі-8МТ», «ЄС225LP – Super Puma» з водозливними пристроями ВЗП-3, ВЗП-5 – успішно застосовуються для гасіння лісових пожеж не тільки на території нашої держави, а й за кордоном [7].

З огляду на зазначене БАС на сьогодні не є основним технічним засобом для прогнозування та проведення відповідних заходів щодо попередження і ліквідації НС, зокрема в екосистемах.

Однак нові виклики для авіації ДСНС, пов’язані зі зростанням на території України кількості пожеж в екосистемах, потребують і адекватної реакції щодо швидкої їх локалізації та своєчасної ліквідації наслідків, що може бути здійснено переважно із застосуванням як пілотованої авіації, так і БАС, зокрема для оперативного або цілодобового моніторингу природних

екосистем і технологічних об'єктів із високим ризиком.

БАС вважаються досить перспективними засобами для виконання завдань у сфері цивільного захисту стосовно одноманітної, брудної або небезпечної діяльності, тобто розв'язання яких пов'язане з монотонністю або небезпекою для пілота повітряного судна. Практичний досвід застосування БАС провідними країнами світу виявив широкий набір цивільних завдань, під час вирішення яких безпілотники показують високу ефективність [6].

За прогнозом компанії «Teal Group» (США) від 2019 р., у найближчі десять років найбільшими ринками для цивільних БАС будуть моніторинг нафто- та газопроводів, охорона прикордонної території та лісове господарство, тобто види діяльності, де потрібен регулярний моніторинг значних площинних і лінійних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фахівці, які досліджують пожежі в екосистемах на глобальному рівні, зазначають, що на найближчу перспективу слід очікувати збільшення кількості пожеж. В основі таких прогнозів лежать повідомлення урядів багатьох країн про катастрофічні пожежі та збитки, завдані ними [4].

За досвідом цих країн, значні лісові пожежі можуть тривати довго, і навіть розвинені в технологічному плані держави часом не можуть ефективно протистояти цій стихії. У країнах із надзвичайно посушливим та спекотним літом (південь США, деякі країни Центральної та Латинської Америки, Середземномор'я, Західної Європи) кількість лісових пожеж, що одночасно відбуваються, іноді становить не один десяток.

Ідея застосування авіаційних сил і засобів для виявлення пожеж у природних екосистемах уперше виникла у Сполучених Штатах Америки на початку минулого сторіччя. Однак практично її реалізувати вдалося лише у двадцятих роках, коли федеральний уряд передав декілька повітряних суден лісовій службі (U.S. Forest Service) для моніторингу пожеж у лісах штатів Вашингтон, Каліфорнія та Орегон [8].

У Північній Америці в середині XX ст. була значна кількість як легких сільськогосподарських, так і важких транспортних літаків. У тридцятих роках минулого століття розроблено понад 50 типів (з модифікацією) пожежних літаків-танкерів [9].

На сьогодні в лісовій галузі України створена і функціонує відомча пожежна охорона, основу якої становлять лісові пожежні станції [2]. Охорону лісів від пожеж забезпечують 311 державних лісових господарських та лісових мисливських підприємств, у складі яких функціонує понад 1,8 тис. лісництв та 263 лісові пожежні станції. Чисельність відомчої пожежної охорони становить понад 14 тис. осіб. У лісах створена мережа з-понад 500 пожежними спостережними вежами, з яких нині 337 обладнано сучасними телевізійними системами спостереження.

Авіаційну охорону лісів покладено на Державне підприємство «Українська державна база авіаційної охорони лісів». Однак на сьогодні авіаційне патрулювання лісових площ практично не здійснюється, що не дає змогу охопити значні території одним літальним апаратом, визначити площі, характер пожежі та відповідно призводить до затримки виявлення пожеж.

Оскільки Україна має значні площі та величезне різноманіття лісів, пріоритетними напрямами слід вважати авіаційну охорону лісів, залучення авіації до ліквідації пожеж у природних екологічних системах, зокрема і формування високомобільних груп пожежників-рятувальників.

Формулювання цілей дослідження. Метою роботи є обґрунтування критеріїв, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС України в операціях з ліквідації пожеж у природних екологічних системах.

Для досягнення поставленої мети слід:

– сформувати перелік і види робіт, які доцільно виконувати із залученням БАС під час моніторингу та ліквідації пожеж в екосистемах;

– обґрунтувати ймовірності розпізнання об'єкта за виглядом, класом і типом об'єкта як основні показники ефективності моніторингових місій БАС;

– обґрунтувати продуктивність пошуку з урахуванням імовірності невідхилення об'єкта та ймовірності отримання з ним контакту за усіма видами пошуку: контрольного (у районі), на рубежі (на лінії) і за викликом (вторинний);

– для забезпечення заданої ефективності пошуку визначити залежності розрахунку потрібних значень часу пошуку або площі району пошуку.

Методи дослідження. В роботі застосовано сукупність загальнонаукових і спеціальних методів, зокрема: методи експертного оцінювання, метод аналізу ієрархій, методи системного аналізу, методи структурно-функціонального моделювання, методи імітаційного моделювання, методи дослідження операцій.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні БАС все більше застосовуються у аерознімальних процесах як недорога альтернатива традиційному аерозніманню з пілотованих повітряних суден та у космічному (супутниковому) зніманні.

Повітряний пошук та моніторинг із застосуванням встановленої на цьому типі БАС різноманітної номенклатури фото-, телевізійної, тепловізійної, інфрачервоної апаратури – це найбільш відома сфера використання БАС. Це за своєю значущістю, оперативністю отримання та наочністю результатів є надзвичайно ефективним інструментом досягнення заданої мети під час виконання пошукових та моніторингових операцій з ліквідації пожеж в екологічних системах.

Створення та впровадження в практику роботи ДСНС сучасних зразків БАС дає змогу суттєво скоротити витрати на виконання цілої низки завдань, а також позбавляє необхідності застосування пілотованих повітряних суден у ризикованих ситуаціях, пов'язаних насамперед із ліквідацією пожеж в екосистемах [10].

Реальний практичний інтерес для відповідних структурних підрозділів ДСНС України (Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям та державного нагляду (контролю), Департамент реагування на надзвичайні ситуації, Департамент організації заходів цивільного захисту, управління авіації та авіаційного пошуку і рятування, управління гідрометеорології тощо), а також Державного агентства України з управління зоною відчуження становлять види робіт, які доцільно виконувати із залученням БАС [11].

Серед них такі:

– авіаційний моніторинг районів ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж, протипожежних смуг та узлісся, здійснення їх аеро-, фото- та відеознімання;

– проведення пошукових робіт під час виникнення ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж;

– отримання необхідних відеоданих у реальному часі з місця надзвичайної ситуації для забезпечення організації ліквідації надзвичайної ситуації, інформування керівництва ДСНС України та держави;

– проведення оцінки масштабів ландшафтних степових, лісових і торф'яних пожеж.

Відповідно весь перелік задач, які можливо та доцільно розв'язувати за допомогою БАС, умовно можна поділити на дві групи: пошуку та моніторингу (спостереження). Задачі споріднені за своїм функціоналом та спрямованістю, а також за необхідним складом апаратури на борту безпілотного літального апарату (БпЛА) зі складу БАС, але розв'язуються із застосуванням різних тактичних схем виконання польоту та алгоритмів керування.

Здебільшого перед повітряним пошуком та моніторингом ставляться задачі отримання інформації про місцевість та об'єкти не усюди і завжди, а в певному конкретному районі, який визначається на основі інформації, отриманої з додаткових джерел.

Задача повітряного пошуку та моніторингу для БАС зазвичай формулюється як задача суцільного перегляду деякої (зазвичай прямокутної (лісові угіддя), іноді лінійно витягнутої (дорога, узлісся, протипожежні смуги тощо)) ділянки місцевості або елемента інфраструктури з отриманням знімків об'єкта на електронному або іншому матеріальному носії.

Типовий алгоритм повітряного пошуку та моніторингу включає: БпЛА зі складу БАС виконує політ у задані райони під управлінням оператора або за програмою. Під час польоту в заданому районі БпЛА через радіоканал передають інформацію в реальному масштабі часу на наземний пункт управління для її обробки про місцевість і об'єкти на ній.

Для ухвалення обґрунтованих інженерних і управлінських рішень щодо захисту людей та екологічних систем необхідно постійно аналізувати процеси формування вражаючих факторів, знати характеристики небезпечних речовин і джерел, уміти прогнозувати масштаби та наслідки пожеж.

У разі використання БАС зі встановленими на БпЛА цифровими системами можливо здійснювати екологічне патрулювання і моніторинг, фото-, відеоспостереження територій, забезпечувати зв'язком та навігаційною інформацією системи управління особовим складом аварійно-рятувальних команд та системи підтримки ухвалення рішень.

Завдання повітряного пошуку розв'язуються методами застосування одного з видів пошуку: на рубежі (на лінії), контрольного (у районі) і за викликом (вторинний) [11–12].

Пошук на рубежі містить у собі обстеження уздовж заданої протяжної лінії (дороги, узлісся, протипожежної смуги тощо). Він проводиться тоді, коли є дані про ймовірний напрямок руху (курс) об'єкта і місце його можливого перетинання рубежу. Пошуку на рубежі відповідає рівнопропорційний розподіл ймовірних місць перетинання об'єкта лінії рубежу.

Контрольний пошук містить у собі обстеження заданого району літальним апаратом для виявлення об'єкта або встановлення його відсутності. Він проводиться у разі якщо немає даних на певний момент часу про місце перебування об'єкта. Контрольному пошуку також відповідає рівнопропорційний розподіл імовірних місць перебування об'єкта у районі, що підлягає обстеженню.

Пошук за викликом містить у собі обстеження місця виявлення об'єкта через певний час після того, як це відбулося. Він проводиться у разі якщо є дані на певний момент часу про місце перебування об'єкта. Пошуку за викликом відповідає нерівномірний розподіл ймовірних місць об'єкта біля точки його первинного виявлення.

Критеріями ефективності пошуку є продуктивні та ймовірнісні показники.

Зазвичай продуктивними показниками пошуку вважаються теоретична та реальна продуктивності та відношення реальної до теоретичної продуктивності пошуку.

Імовірнісними показниками пошуку є ймовірність виявлення об'єкта до заданого терміну, математичне сподівання числа об'єктів, виявлених до заданого терміну, і математичне сподівання часу, необхідного для виявлення об'єкта (середній час, що очікується для виявлення об'єкта).

У разі припущення максимальної ефективності пошуку ширина смуги обстеження БпЛА дорівнює:

$$Ш_{п.о.} = 2E_{об} \qquad (1)$$

де $E_{об}$ – математичне сподівання дальності дії технічного засобу виявлення, що є на борту БпЛА, (середня дальність виявлення, що очікується).

Зважаючи на це, теоретична продуктивність пошуку W_T дорівнює

$$W_T = Ш_{п.о.} Vn_{від} \quad (2)$$

де $Vn_{відн}$ – середня відносна швидкість польоту БпЛА.

Водночас середня відносна швидкість польоту БпЛА буде визначатися, як:

$$Vn_{відн} = k_V (Vn + Vоб) \quad (3)$$

де k_V – коефіцієнт швидкості (вибирається з табл. 1);

Vn і $Vоб$ – швидкості польоту БпЛА і переміщення об'єкта відповідно.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта швидкості [13]

$Vn/Vц$	k_V	$Vn/Vц$	k_V
0,00	1,00	0,60	0,68
0,10	0,91	0,70	0,66
0,20	0,84	0,80	0,65
0,30	0,79	0,90	0,64
0,40	0,74	1,00	0,64
0,50	0,71		

Реальна або ефективна продуктивність пошуку $W_{еф}$ дорівнює:

$$We_{еф} = cS_p / Nц\ t_n \quad (4)$$

де c – загальне число об´єктів, виявлених за час пошуку;

S_p – площа району пошуку;

$Nц$ – середня кількість об'єктів, що перебували в районі під час пошуку;

t_n – фактична тривалість пошуку БпЛА.

Відносна продуктивність (*ВП*) дорівнює:

$$ВП = W_{еф} / W_T \quad (5)$$

Імовірність виявлення об'єкта до заданого терміну $P_{об}$ дорівнює:

$$P_{об} = 1 - exp\ (u\ t_n / S_p) \quad (6)$$

де u – продуктивність пошуку з урахуванням імовірності невідхилення об'єкта $P_{неук}$ та ймовірності отримання з ним контакту $P_к$.

Якщо в процесі пошуку об'єкт перетинає район пошуку, то

$$t_n = (\sqrt{Д^2_p + Ш^2_p}) / 2V_ц \quad (7)$$

де $Д_p$ і $Ш_p$ – довжина і ширина району пошуку відповідно.

$$u = Ш_{п.о.} Vn\ P_{неук} P_к \quad (8)$$

Імовірність невідхилення об'єкта $P_{неук}$ дорівнює:

$$P_{неук} = (1 - P_{вих})(1 - P_{пр}), \quad (9)$$

де $P_{вих}$ – імовірність виходу об'єкта зі смуги пошуку;

$P_{пр}$ – імовірність перетинання об'єктом смуги, що переглядається за допомогою БпЛА.

Імовірність виходу об'єкта зі смуги

$$P_{вых} = \begin{cases} 2Д_{ук}\ tg\ Q / Ш_{п.о.} & \text{при} \quad Д_{ук} \geq Ш_{п.о.} \\ 2Д_{ук}\ tg\ Q / Ш_{п.о.} & \text{при} \quad Д_{ук} < Ш_{п.о.} \end{cases} \quad (10)$$

де $Д_{ук}$ – відстань початку відхилення об'єкта від БпЛА;

Q – критичний курсовий кут, що визначається, як:

$$Q = arcsin\ Vц / Vn \quad (11)$$

$$P_{пр} = Ф\ (Д_{об} / E) \quad (12)$$

де $Ф$ – приведена функція Лапласа, вибрана з таблиць [13];

E – серединна помилка в місці перетинання об'єктом смуги.

Імовірність контакту $P_к$ з об'єктом, що потрапив у зону дії засобів спостереження БпЛА, дорівнює:

$$P_к = 1 - exp\ [-\ k\ E_{об}Ω / (Vn + Vц)T_o] \quad (13)$$

$$k = \pi / 360^0 \cdot 2 = 0.00436\ \ 1/град;$$

де $Ω$ – сектор обстеження засобом спостереження БпЛА, *град.;*

T_o – час обстеження сектора.

Математичне сподівання числа об'єктів $MO_{об}$, виявлених до заданого терміну, дорівнює:

$$MO_{об} = N_{ц1} P_{об1} + N_{ц2} P_{об2} + ... + N_{цп} P_{обп} = \sum_{i=1}^{n} N_{ці} P_{обі} \quad (14)$$

де $N_{ці}$ – кількість об'єктів, що перебувають в *і-ому* районі пошуку;

$P_{обі}$ – імовірність виявлення об'єктів в *і-ому* районі пошуку.

Математичне сподівання часу $T_{об}$, необхідного для виявлення об'єкта

(середній час виявлення об'єкта, який очікується), що визначає час у середньому, який очікується для виявлення об'єкта з моменту початку пошуку, дорівнює:

$$T_{об} = S_p / u. \qquad (15)$$

Для забезпечення заданої ефективності пошуку $P_{об.зад}$ необхідно розрахувати потрібні значення часу пошуку або площі району пошуку:

$$t_n = [- \ln (1 - P_{об.зад}) S_p] / u; \qquad (16)$$
$$S_p = t_n u / [- \ln (1 - P_{об.зад})] .$$

Задача спостереження вирішується за допомогою БпЛА через їх перебування над заданим районом протягом тривалого часу і ведення спостереження за підстильною поверхнею або за наявними в районі спостереження об'єктами (вдень – за допомогою фото- або телекамер, вночі – за допомогою інфрачервоних систем, а в складних метеоумовах – за допомогою радіолокаційної станції міліметрового діапазону або радарів із синтезованою апертурою).

Водночас основним показником ефективності моніторингу (спостереження) є ймовірність розпізнавання $P_{оп}$ об'єкта за виглядом $P^{В}_{оп}$, за класом $P^{К}_{оп}$ і за типом $P^{Т}_{оп}$ об'єкта:

$$P_{оп} = 1 - (1-P_{зад})(1-P_к) \qquad (17)$$

де $P_{зад}$ – задана ймовірність розпізнавання об'єкта за детальністю (за виглядом, класом або типом).

$$P_{зад} = \begin{cases} 0{,}95 \text{ (для розпізнавання об'єкта за виглядом – } P^{В}_{оп}) \\ 0{,}90 \text{ (для розпізнавання об'єкта за класом – } P^{К}_{оп}) \\ 0{,}85 \text{ (для розпізнавання об'єкта за типом – } P^{Т}_{оп}); \end{cases} \qquad (18)$$

$P_к$ – імовірність контакту з об'єктом, що потрапив у зону дії засобів спостереження БпЛА:

$$P_к = 1 - exp [- k E_{об} \Omega / (Vn + Vц) T_o] \qquad (19)$$

Порівняння показників ефективності застосування БАС дає змогу зрозуміти, що для розв'язання задач оперативного пошуку об'єктів та моніторингу пожеж в екосистемах більш доцільним є залучення багатофункціональних БАС, зокрема виробництва авіаційної компанії «Скаетон».

Тактичний безпілотний авіаційний комплекс військового призначення ACS-3 виробництва цієї компанії з 2019 року експлуатується у Збройних Силах України (рис. 3). На зовнішній ринок компанія постачає безпілотні авіаційні системи Raybird-3 [14].

Рисунок 3 – БпЛА ACS-3 в польоті [14]

Характеристики БпЛА ACS-3M

Максимальна дальність польоту, км	2500
Максимальний радіус дії при польоті в програмованому режимі, км	1000
Робота в умовах радіоелектронної протидії (глушіння GPS та каналу управління)	+
Максимальна тривалість польоту, год (підтверджена заводськими випробуваннями з силовою установкою інжекторного типу)	>30
Швидкість максимальна/крейсерська/мінімальна, км/год	160/120/80
Максимальна висота польоту, м (з використанням силової установки інжекторного типу)	4500
Розмах крила/довжина/висота, мм	2985/1830/320
Максимальна злітна маса, кг	23
Силова установка	інжекторний двигун
Витрата палива у крейсерському режимі, кг/год (залежить від аеродинаміки цільового навантаження та особливостей польотного завдання)	0,3
Об'єм паливного бака в штатній версії БпЛА, л	9
Потужність силової установки, к.с.	3
Габарити транспортного контейнера для одного БпЛА, мм	1350x650x450

Рисунок 4 – Характеристики БпЛА ACS-3 [14]

Максимальна злітна вага БпЛА становить 21 кг, маса цільового спорядження – 5 кг, максимальна дальність польоту – 2 500 км. Крейсерська швидкість БпЛА – 120 км/год, максимальна – 160 км/год, що дає можливість оперативно реагувати на подію чи виконувати будь-яку операцію (див. рис. 4). Інтегральне поєднання у комплексах «Скаетон» швидкості та

тривалості польоту, надійності, захищеності та зручності експлуатації забезпечує перевагу розроблення над аналогами.

Водночас прямих конкурентів за тривалістю польоту за співмірної злітної маси БпЛА від компанії «Скаетон» є лише п'ять. Це американський ScanEagle (Insitu), французький Fulmar X (Thales), ізраїльський Bluebird (Aero Systems), португальський Tekever AR3 (Tekever), латвійський Pengiun B (UAV factory). Проте за показником «ефективність-надійність-вартість» під час виконання споріднених місій польоту перевага буде однозначно на боці української розробки.

Висновки та напрями подальших досліджень. На практиці використовуються різні підходи до оцінки ефективності БАС, адже цільова ефективність – це системна характеристика, яка визначається рамками функціональної операції. Безпосередній опис усієї сукупності дій в багатоетапній операції складний через їх різноманітність і значну кількість елементів системи, що виконують ці дії, тому під час розрахунку виділяються типові складові операції, для кожної з яких розробляються типові математичні моделі.

Для отримання оцінок ефективності використовується досить широкий арсенал методів, вибір яких у кожному конкретному випадку зумовлений цілями отримання такого роду оцінок і особливостями як функціонування зразка (самостійно або в групі виробів), так і будови самого технічного пристрою. Безумовно, БАС, які належать до складних технічних засобів, не є винятком, і для оцінювання їх ефективності мають застосовуватись методологічні підходи, які узгоджуються з визнаними підходами в загальній теорії ефективності складних систем.

У роботі обґрунтовано критерії та показники, що характеризують ефективність застосування різних зразків БАС під час виконання завдань ДСНС України в операціях з ліквідації пожеж в екологічних системах. Наведені критерії та показники досить об'єктивно характеризують ступінь технічної досконалості зразків БАС, що порівнюються. Для більш детальної оцінки необхідно формувати групи параметрів, що визначають окремі властивості БАС, за якими можна деталізувати рівень розроблення деяких елементів БАС як складної технічної системи.

Аналіз та порівняння показників ефективності застосування різноманітних БАС для розв'язання однотипних завдань в інтересах ДСНС України вказує на доцільність і необхідність прискореного впровадження в практику діяльності авіаційної компоненти різноманітної номенклатури БАС, що дасть змогу суттєво зекономити ресурси та водночас підвищити оперативність отримання необхідної інформації для ухвалення своєчасних управлінських рішень відповідними органами у процесі планування та виконання операцій з ліквідації пожеж в екосистемах.

На основі запропонованих критеріїв і показників ефективності застосування різних зразків БАС доцільно розробити низку методик порівняльної оцінки БАС, що дасть змогу системно порівнювати технічні характеристики різних БАС, зіставляти їх з витратами на придбання та застосування. Також ці методики можуть використовуватися як засіб підтримки ухвалення рішення під час аналізу відповідності різних варіантів БАС вимогам, що встановлені.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення НС в Україні у 2020 році. URL : https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36455.pdf (дата звернення : 15.08.2023).
2. Публічний звіт голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2022 рік. URL : https://forest.gov.ua › publichnii-zvit-za-2022 (дата звернення : 15.08.2023).
3. Fire management – global assessment 2006 : FAO forestry paper. Rome, 2007. Vol. 151. 156 p.
4. Global Forest Resources Assessment 2010 : FAO forestry paper. Rome, 2010. Vol. 163. 378 p.

5. Зібцев С. В. Стан охорони лісів від пожеж в Україні та головні напрямки її покращення. *Науковий вісник НАУ*. 2000. Вип. 25. С. 319–329.
6. Руснак І. С. Ємець В. І., Хижняк В. В. Безпілотна авіація у сфері цивільного захисту України. Стан і перспективи розробки та застосування. *Наука і оборона*. 2014. № 2. С. 34–39.
7. Обґрунтування вимог до перспективних та модернізованих літальних апаратів для авіаційного забезпечення виконання завдань ДСНС, визначення їх необхідного складу, типажу та розміщення по регіонах України : Звіт про науково-дослідну роботу. Київ : УкрНДІЦЗ, 2015. 215 с.
8. Stein-Janney T. Airtankers, an historic overview / California Fire Pilots Ass. 2012. 14 p.
9. Баскакова А. О., Воронов М. А., Крамаренко Ю. А. История авиационной охраны лесов России. Пушкино : Авиалесоохрана, 2017. 294 с.
10. Литовченко А. О., Хижняк В. В., Ядченко Д. М. Підвищення спроможностей авіації ДСНС України за рахунок територіального базування безпілотних авіаційних систем відповідно до регіональних оцінок природно-техногенного навантаження : матеріали 22 Всеукр. наук.-практич. конф. (за міжнар. участю), м. Київ, 27 жовт. 2021. Київ, 2021. С. 100–106.
11. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту *:* колективна монографія / Д. В. Бондар та ін. Київ : ІДУНДЦЗ, 2022. 312 с.
12. Лещенко Г. А., Мандрик Я. С., Стратонов В. М., Давидов С. А. Способи застосування безпілотних літальних апаратів під час авіаційного пошуку і рятування. *Наукоємні технології*. 2021. № 3(51). С. 271–280.
13. Абезгауз Г. Г., Тронь А. П., Копенкин Ю. Н., Коровина И. А. Справочник по вероятностным расчетам. М. : Воениздат, 1970. 536 с.
14. Рекордний політ українського безпілотника компанії «Скаетон» : Аерокосмічний портал. URL : https://space.com.ua/2019/07/01/rekordnij-polit-ukrayinskogo-bezpilotnika-kompaniyi-Skaeton (дата звернення : 15.04.2023).

REFERENCES

1. Informatsijno-analitychna dovidka pro vynyknennia NS v Ukraini u 2020 rotsi (2020). Retrieved from https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36455.pdf [in Ukrainian].
2. Publichnyj zvit holovy Derzhavnoho ahentstva lisovykh resursiv Ukrainy za 2022 rik (2022). Retrieved from https://forest.gov.ua › publichnii-zvit-za-2022 [in Ukrainian].
3. FAO forestry paper. (2007). *Upravlinnia pozhezhamy – hlobal'na otsinka 2006* [Fire management – global assessment 2006]. Rome [in English].
4. FAO forestry paper. (2010). *Hloba'lna otsinka lisovykh resursiv 2010* [Global Forest Resources Assessment 2010]. Rome [in English].
5. Zibtsev, S. V. (2000). Stan okhorony lisiv vid pozhezh v Ukraini ta holovni napriamky ii pokraschennia [The state of forest protection against fires in Ukraine and the main directions for its improvement]. *Naukovyj visnyk NAU*, 25, 319–329. [in Ukrainian].
6. Rusnak, I. S., Yemets', V. I. & Khyzhniak, V. V. (2014). Bezpilotna aviatsiia u sferi tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. Stan i perspektyvy rozrobky ta zastosuvannia [Unmanned aircraft in the field of civil protection of Ukraine. Status and prospects for development and application]. *Nauka i oborona*, 2, 34–39. [in Ukrainian].
7. Ukrains'kyj naukovo-doslidnyj instytut tsyvil'noho zakhystu (2015). *Obgruntuvannia vymoh do perspektyvnykh ta modernizovanykh lital'nykh aparativ dlia aviatsijnoho zabezpechennia vykonannia zavdan' DSNS, vyznachennia ikh neobkhidnoho skladu, typazhu ta rozmischennia po rehionakh Ukrainy* [Justification of the requirements for promising and modernized aircraft for the aviation support of the tasks of the State Emergency Service, determination of their necessary composition, type and placement in the regions of Ukraine]. Kyiv: UkrNDITsZ [in Ukrainian].
8. Stein-Janney, T. (2012). *Aviatankery, istorychnyj ohliad* [Airtankers, an historic overview]. California Fire Pilots Ass. [in English].
9. Baskakova, A. O., Voronov, M. A. & Kramarenko, Yu. A. (2017). *Istoriya aviacionnoj ohrany lesov Rossii* [History of aviation protection of forests in Russia]. Pushkino: Avialesookhrana [in Russian].
10. Lytovchenko, A. O., Khyzhniak, V. V. & Yadchenko, D. M. (2021). Pidvyschennia spromozhnostej aviatsii DSNS Ukrainy za rakhunok terytorial'noho bazuvannia bezpilotnykh aviatsijnykh system vidpovidno do rehional'nykh otsinok pryrodno-tekhnohennoho navantazhennia [Increasing the aviation capabilities of the State Emergency Service of Ukraine due to the territorial basing of unmanned aircraft systems in accordance with regional assessments of the natural and man-made load], materialy 22 Vseukrains'koi naukovo-praktychnoi konferentsii (za mizhnarodnoiu uchastiu) [Proceedings of the 22nd All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (with international participation)]. Kyiv [in Ukrainian].
11. Bondar, D. V., Hurnyk, A. V., Lytovchenko, A. O., Khyzhniak, V. V., Shevchenko, V. L. & Yadchenko, D. M. (2022). *Zastosuvannia bezpilotnykh aviatsijnykh system u sferi tsyvil'noho zakhystu* [Application of unmanned aerial systems in the field of civil protection]. Kyiv: IDUNDTsZ [in Ukrainian].
12. Leschenko, H. A., Mandryk, Ya. S., Stratonov, V. M. & Davydov, S. A. (2021). Sposoby zastosuvannia bezpilotnykh lital'nykh aparativ pid chas aviatsijnoho poshuku i riatuvannia [Ways of using unmanned aerial vehicles during aviation search and rescue]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 3(51), 271–280. [in Ukrainian].
13. Abezgauz, G. G., Tron, A. P., Kopenkin, Yu. N. & Korovina, I. A. (1970). *Spravochnik po veroyatnostnym raschetam* [Handbook of probabilistic calculations]. Moscow: Voenizdat [in Russian].
14. Rekordnyj polit ukrains'koho bezpilotnyka kompanii «Skaeton»: Aerokosmichnyj portal (2019). Retrieved from https://space.com.ua/2019/07/01/rekordnij-polit-ukrayinskogo-bezpilotnika-kompaniyi-Skaeton [in English].

SELECTION AND JUSTIFICATION OF CRITERIA FOR THE EFFECTIVENESS OF THE USE OF UNMANNED AERIAL SYSTEMS IN FIREFIGHTING OPERATIONS IN ECOLOGICAL SYSTEMS

V. Khizhnyak, V. Shevchenko
Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS

unmanned aerial system, unmanned aerial vehicle, ecosystem fires, aerial search and monitoring.

ANNOTATION

The global practice of fighting fires in ecological systems, focusing on the intensive development and expansion of the fields of application of unmanned aerial systems (UAS), is looking for ways to effectively implement their growing potential, as well as regulatory and organizational approaches to use in a single aviation system together with manned aircraft. Today, in the context of an emergency situation related to fires in ecosystems, UAS are able to carry out aerial reconnaissance, control and record current parameters, promptly transmit video footage of the burning cell and its development trends. In addition, the use of UAS makes it possible to determine the direction and speed of fire spread, the dynamics of changes in the configuration of the burning edge, to determine the shortest and safest routes for the deployment of emergency and rescue teams, as well as the distance to the nearest settlements that are threatened by the elements of a forest fire. Methodological approaches that are consistent with the generally accepted approaches in the general theory of the effectiveness of complex systems should be used to evaluate the effectiveness of UAS, which belong to complex technical means. The work substantiates the criteria and indicators that characterize the effectiveness of the use of various types of UAS in the performance of the tasks of the State Emergency Service of Ukraine in operations to eliminate fires in ecological systems. The proposed criteria and indicators of the effectiveness of the UAS application make it possible to form a set of effective alternative UAS options capable of solving the tasks defined for the aviation of the State Emergency Service of Ukraine for the elimination of fires in ecological systems, with the subsequent selection among them of the optimal combination of characteristics and the UAS option. Analysis and comparison of indicators of the effectiveness of the use of various UAS to solve the same type of tasks in the interests of the State Emergency Service of Ukraine makes it possible to significantly increase the efficiency of obtaining the necessary information for making timely management decisions by the relevant bodies in the process of planning and carrying out operations to eliminate fires in ecosystems.