

УДК: 623.368

Чередниченко О. Ю. ORCID: 0000-0002-0816-8321 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Паламарчук Н. А. ORCID: 0000-0001-8818-7794 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Шемендюк О. В. ORCID: 0000-0002-5594-2973 (ВІТІ ім. Героїв Крут)  
Мартинюк В. В. ORCID: 0000-0003-0244-7861 (ВІТІ ім. Героїв Крут)

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ НА БАЗІ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

*У статті проведено аналіз вибухонебезпечних предметів різних типів та надана їхня характеристика. Демаскуючою їхньою ознакою є матеріал основної частини (корпусу), відмічено, що для фугасних мін характерне використання пластикового корпусу, для мін осколкової дії – металевого, найбільш складними для виявлення є міни з пластиковим корпусом. Розглянуто способи виявлення вибухонебезпечних предметів порівняно з тими, що застосовуються на цей час в Україні. На жаль, з огляду на масштаб замінованих територій вони є малоефективними, тому вочевидь необхідна розробка більш ефективних рішень для їх виявлення і знешкодження на основі сучасних досягнень технічного прогресу. Зарубіжні країни розробили та використовують сучасні мобільні робототехнічні комплекси для розмінування на базі безпілотних літальних апаратів зі встановленими на них датчиками різного типу.*

*Доцільним є створення універсальної системи виявлення, яка може бути розгорнута на будь-якому безпілотному літальному апараті вертолітного типу (квадрокоптер, мультикоптер), на якому встановлено декілька датчиків виявлення одночасно з метою ведення розвідки мінної обстановки, виявлення мін і дистанційного їх знищення. В статті запропоновано синтез системи виявлення вибухонебезпечних предметів на базі безпілотного літального апарата зі встановленим на ньому тепловізором, в поєднанні з металощукачем та маніпулятором із вибухівкою для дистанційного розмінування. Розглянуто параметри виявлення вибухонебезпечних предметів, тип сенсорних датчиків та основні функції системи. Запропоновано алгоритм дій оператора системи з виявлення вибухонебезпечних предметів.*

**Ключові слова:** вибухонебезпечні предмети, міни, протипіхотні міни, виявлення вибухонебезпечних предметів, розмінування, дистанційне розмінування, безпілотний літальний апарат, тепловізор, металощукач.

**O. Cherednychenko, N. Palamarchuk, O. Shemendiuk, V. Martynyuk** *Synthesis of the system for detection of explosive objects on the base of an unmanned aerial vehicle.*

*The article analyzes explosive objects of various types and provides their characteristics. Their unmasking feature is the material of the main part (casing), it is noted that high-explosive mines are characterized by the use of a plastic casing, for fragmentation mines – a metal casing, and the most difficult to detect are mines with a plastic casing. Methods of detecting explosive objects compared to those currently used in Ukraine are considered. Unfortunately, given the scale of mined areas, they are ineffective, so it is obviously necessary to develop more effective solutions for their detection and neutralization based on modern achievements of technical progress. Foreign countries have developed and use modern mobile robotic complexes for demining based on unmanned aerial vehicles with various types of sensors installed on them.*

*It is expedient to create a universal detection system that can be deployed on any helicopter-type unmanned aerial vehicle (quadcopter, multicopter), on which several detection sensors are installed at the same time for the purpose of reconnaissance of the mine situation, detection of mines and their remote destruction. The article proposes the synthesis of a system for detecting explosive objects based on an unmanned aerial vehicle with a thermal imager installed on it, in combination with a metal detector and a manipulator with explosives for remote demining. The parameters of detection of explosive objects, the type of sensor sensors and the main functions of the system are considered. The algorithm of actions of the operator of the system for detecting explosive objects is proposed.*

**Keywords:** explosive objects, mines, anti-personnel mines, detection of explosive objects, demining, remote demining, unmanned aerial vehicle, thermal imager, metal detector.

**Постановка завдання.** Внаслідок повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну майже 30 % її території виявилася забруднена або потенційно забруднена різними типами вибухонебезпечних предметів (далі – ВВП), що становить значну загрозу для життя і здоров'я цивільного населення та військових, які здійснюють виконання бойових завдань у зонах бойових дій та на деокупованих територіях. Процес розмінування та очищення місцевості від ВВП досить складний та довгий. Найнадійніший та безпечніший спосіб – це розмінування за допомогою механічного тралення, але, на жаль, в Україні відсутня необхідна кількість тралів, та специфіка місцевості не завжди дозволяє їх використовувати. Тому, доводиться застосовувати ручне розмінування, а це важка, виснажлива, довготривала та небезпечна праця саперів.

Застосування безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) в сучасних війнах дозволяє вести розвідку вздовж всієї лінії фронту, виявляти сили та ворожу техніку, дистанційно коригувати артилерійський вогонь, здійснювати пошуково-рятувальні роботи та скидати вибухівку на ворожі об'єкти. Новою та важливою сферою застосування БпЛА є виявлення та знешкодження ВВП. На сьогодні зарубіжні країни розробили та використовують сучасні мобільні робототехнічні комплекси (далі – РТК) для розмінування, найбільш перспективні з них – це комплекси на базі БпЛА зі встановленими на них датчиками різного типу. Різні типи РТК використовуються для виявлення пластикових або металевих ВВП, але наразі не існує універсальної системи для виявлення ВВП різних типів одночасно. Тому, доцільним буде створення універсальної системи виявлення як пластикових, так і металевих ВВП.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Вирішенням проблеми розмінування займаються вітчизняні фахівці, вчені, та залучаються закордонні неурядові організації в межах гуманітарного розмінування. Саме закордонні фахівці значно просунулися у сфері застосування різних типів датчиків на базі БпЛА [1]. Датчики активно застосовуються цивільними у гірничовидобувній сфері в пошуках корисних копалин [2–4] та військовими у сфері виявлення ВВП. Нині країни-члени НАТО активно використовують БпЛА для виявлення металевих [5] та пластикових [6] мін. Також існують певні комбіновані зразки для виявлення ВВП різних типів [7]. Але наразі не існує єдиної універсальної системи для виявлення та знешкодження ВВП одночасно. Тому виникає задача синтезу системи на базі БпЛА для виявлення різних типів ВВП та подальшого їх знешкодження. Такий підхід дає змогу швидко впроваджувати БпЛА з різними типами датчиків у спеціалізовані підрозділи, що значно підвищить ефективність розмінування.

**Мета статті** – визначення основних етапів синтезу системи виявлення ВВП на базі БпЛА.

**Виклад основного матеріалу.**

У зв'язку з повномасштабним російським вторгненням Україна стала найбільш замінованою країною у світі. Прийнято вважати, що рік війни – це 10 років на розмінування. Враховуючи, що військові дії почалися ще у 2014 році, завдання розмінування постраждалих територій стоїть давно та погіршується з кожним днем. Аналіз ВВП [8] показав, що найбільш розповсюдженими є протипіхотні фугасні міни, міни пастки, протитанкові міни фугасної дії, протипіхотні міни осколкової дії, протитанкові міни дистанційного мінування, їхні характеристики представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики ВВП

Класифікація ВВП	Назва ВВП	Матеріал корпусу	Вибухова речовина	Принцип дії
Протипіхотні фугасні міни	ПМН-4	Пластмаса	(ТГ-40 – тротил 40 %, гексоген 60 %) – 0,05 кг	Натискна
	ПМН	Пластмаса	(тротил) – 0,2 кг	Натискна
	ПФМ-1	Поліетилен	(ВС-6Д) – 0,04 кг	Натискна
	ПМН-2	Пластмаса	(ТГ-40 – тротил 40 %, гексоген 60 %) – 0,1 кг	Натискна
Міни-пастки	Міна-пастка МЛ-7	Пластмаса	(30гр – ВР-5, 10гр – тетрил) – 0,04 кг	Розвантажувальна
	Міна-сюрприз МС-3	Пластмаса	(тротил) – 0,2 кг	
Протитанкові міни фугасної дії	ТМ-62М	Сталь	(ВВО-32) – 8,2 кг	Натискна
	ТМ-62ПЗ	Поліетилен	(ВВО-32) – 8,2 кг	Натискна
Протипіхотні міни осколкової дії	ПОМ-2	Сталь	(ПВВ-4) – 0,14 кг	Натяжної, дистанційного мінування
	МОН-50	Пластмаса	(ПВВ-4) – 0,7 кг	Керована спрямованої дії
	ПОМЗ-2М	Чавун	(тротил) – 0,075 кг	Натяжної дії
	МОН-90	Пластмаса	(ПВВ-4) – 6,2 кг	Керована спрямованої дії
	МОН-100	Сталь	(тротил) – 2 кг	Керована спрямованої дії
	МОН-200	Сталь	(тротил) – 12 кг	Керована спрямованої дії
Протитанкові міни дистанційного мінування	ОЗМ-72	Чавун	(МС) – 0,66 кг	Кругове ураження, що вистрибує
	ПТМ-1	Поліетилен	(ПВВ-12С-1) – 1,1 кг	Натискна
	ПТМ-3	Сталь	(тротил, ТГА, МС) – 1,8 кг	Натискна

У таблиці описано принцип дії ВНП та матеріали, з якого виготовлена їх основна частина (корпус). Звідси бачимо, що для фугасних мін характерне використання пластмас, для мін осколкової дії – метал. Відповідно, матеріал виготовлення корпусу виступатиме демаскуючою ознакою ВНП. Згідно з таблицею бачимо, що в основному для корпусу характерний матеріал виготовлення пластмаса, яку виготовляють за технологією лиття під тиском, завдяки цьому ВНП має високу ступінь удароміцності, стійкість до вологи та переносимість впливу високих температур. Таким чином, ВНП з пластиковим корпусом мають дуже малий вміст металу, що ускладнює їх виявлення металодетекторами.

Аналіз найбільш поширених ВНП на території України дає підґрунтя для синтезу системи виявлення ВНП (далі – СВВ) (рис 1).

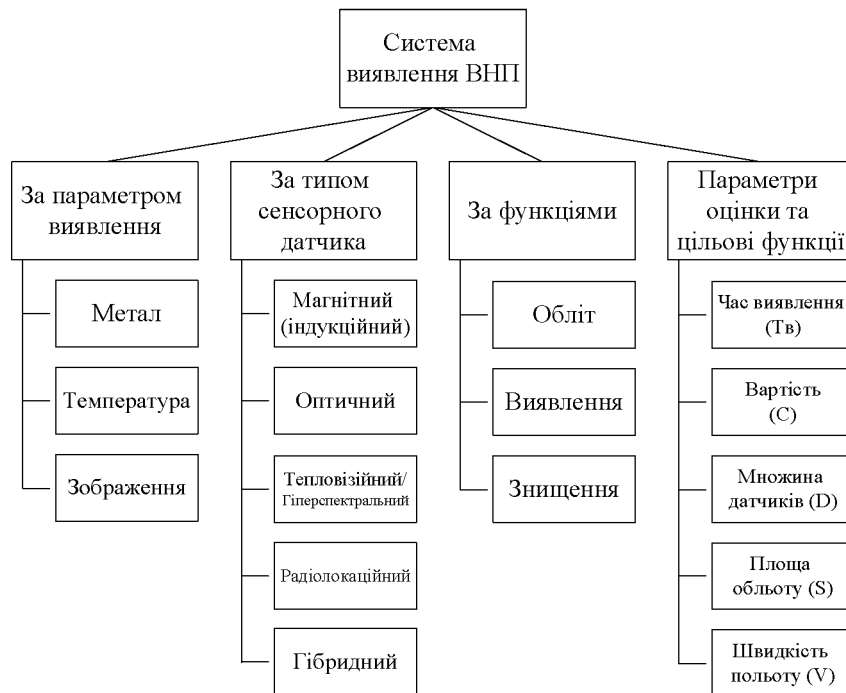


Рис. 1. Складові етапів синтезу СВВ

Розглянемо складові етапів синтезу СВВ.

**За параметром виявлення.** Виявлення ВНП здійснюється двома основними способами: пошук металевих (металовмісних) ВНП за допомогою металодетектора (під землею або на поверхні землі); пошук пластикових ВНП за допомогою візуального або програмного аналізу зображення з тепловізійної та оптичної камери (ВНП, що знаходяться на поверхні землі). Зазначені способи є базовими при виявленні ВНП і являтимуть основу в запропонованому синтезі СВВ.

При пошуку та виявленні металовмісних ВНП важлива не стільки маса конкретного ВНП, скільки площа поверхні, пов'язана з його діаметром  $d$ . Для оцінки максимальної глибини  $h_{max}$  виявлення ВНП за допомогою звичайного металодетектора в умовах сухого ґрунту (провідністю  $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м} - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) допустима інженерна формула (1) [9]:

$$h^2_{max} = 11d, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр (мінімальний габарит) ВНП.

Слід пам'ятати, що основною функцією металодетектора є виявлення металу у міні, а оскільки багато років використовуються міни в неметалевих корпусах, то це значно ускладнює роботу з їх виявлення. Також уповільнює процес виявлення ВНП за допомогою металодетектора наявність хибних сигналів від осколків снарядів та інших металів, якими перенасичений ґрунт внаслідок ведення бойових дій. За даними [10], отриманими під час перевірки ґрунтової дороги в Донецькій області, на кілометр дороги шириною до 9 м було зафіксовано близько 4700 хибних сигналів або 80900 хибних сигналів на одну виявлену міну. Це призводить до зниження темпів розмінування, швидкої стомлюваності саперів і зростання

небезпеки пропуску ВВП. Тому, використання одного способу буде недостатнім та малоефективним [9; 10].

Використання тепловізійної камери [6] дозволяє знайти пластикові міни на поверхні, а при певних умовах і на невеликій глибині. Використання тепловізора доцільніше при зростанні або зменшенні температури, оскільки всі матеріали відбивають, поглинають, передають і випромінюють теплове випромінювання з різною швидкістю. Через свій фізичний і хімічний склад пластиковому корпусу міни властиво швидко нагріватися та охолоджуватися, і цим він кардинально відрізняється від навколишнього середовища. Ці контрасти в швидкості нагрівання та охолодження потенційно найбільш виражені в ранкові та вечірні години після сходу і заходу сонця, коли відбувається висока зміна температури, тому оператору доцільно дотримуватися цих вимог при виявленні ВВП, що не містять метал. Наприклад, неглибоко закопані у пісок міни мають деякі затримки теплообміну, через що ділянки, де вони закопані, будуть повільніше нагріватися зранку та охолоджуватися ввечері. Для прикладу, результати сканування території за допомогою БПЛА з тепловізором представлені на рисунку 2.

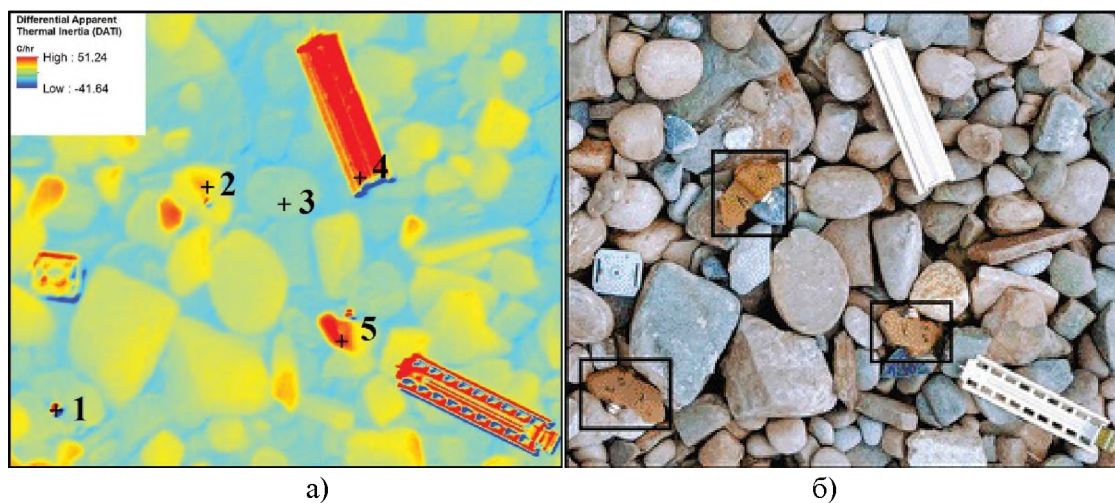


Рис. 2. Приклад відображення температури різних предметів в період з 06:50 до 07:10 ранку:  
**а:** 1 – алюмінієвий детонатор протипіхотної фугасної міни ПФМ-1 (далі – ПФМ-1); 2 – корпус міни ПФМ-1; 3 – загальний фон; 4 – частина касети КСФ-1; 5 – крило ПФМ-1;  
**б:** загальний фон, в чорних квадратах відображені міни ПФМ-1

Встановлення поряд з тепловізійною камерою оптичної камери з високою роздільною здатністю та встановлення на ній того ж ракурсу надає змогу оператору порівняти дані з датчиків (сенсорів) із зовнішнім виглядом місцевості і зробити висновки щодо вірного чи хибного їх спрацювання у випадках, коли ВВП знаходяться на поверхні землі.

Використання зазначеного обладнання у поєднанні із геоінформаційною системою дає змогу виявляти ВВП із дуже високою точністю, визначати їхні координати, тип, глибину залягання, створювати карту розташування ВВП у автоматичному режимі та в масштабі реального часу.

**За типом сенсорного датчика.** Для вирішення своїх функцій обладнання БПЛА може містити не тільки штатні оптичні відеокамери, а і додаткові датчики, перспективними з яких є: гіперспектральна камера дистанційного зондування земної поверхні; інфрачервона (тепловізійна) камера; радіолокаційний підповерхневий локатор для пошуку ВВП (георадар); мобільний металошукач; магнітометр.

На основі аналізу параметрів виявлення ВВП пропонується використовувати систему для виявлення ВВП із декількома датчиками виявлення (гібридного типу), котрі інтегровані у систему БПЛА. Зазвичай існуючі системи виявлення ВВП використовують лише один із типів датчиків (виявлення ВВП за одним із параметрів), що значно зменшує кількість об'єктів, які

можуть бути виявлені. Тому, доцільним є створення універсальної системи, яка може бути використана будь-яким БпЛА, котрий відповідає певним тактико-технічним характеристикам, та використовує декілька способів (датчиків) виявлення одночасно.

За допомогою СВВ на БпЛА вирішується основна задача – обліт БпЛА території розмінування, пошук, виявлення ВВП (з визначенням їхніх координат), які відкрито розміщені на земній поверхні або на глибині, та передача цієї інформації оператору.

Запропонована узагальнена структура СВВ на БпЛА представлена на рисунку 3, до її складу входять різні датчики виявлення та система управління, яка містить наступні підсистеми: виявлення (розпізнавання) ВВП, управління польотом БпЛА, радіозв'язку та знищення ВВП.

Підсистема виявлення (розпізнавання) ВВП забезпечує збір даних з датчиків БпЛА при досягненні певних цільових функцій управління.

Підсистема управління польотом забезпечує політ БпЛА за розрахованою траєкторією, з певною швидкістю і висотою.

Підсистема радіозв'язку забезпечує обмін даними між СВВ на БпЛА і оператором.

Підсистема знищення ВВП забезпечує дистанційне знищення ВВП за допомогою вибухівки.

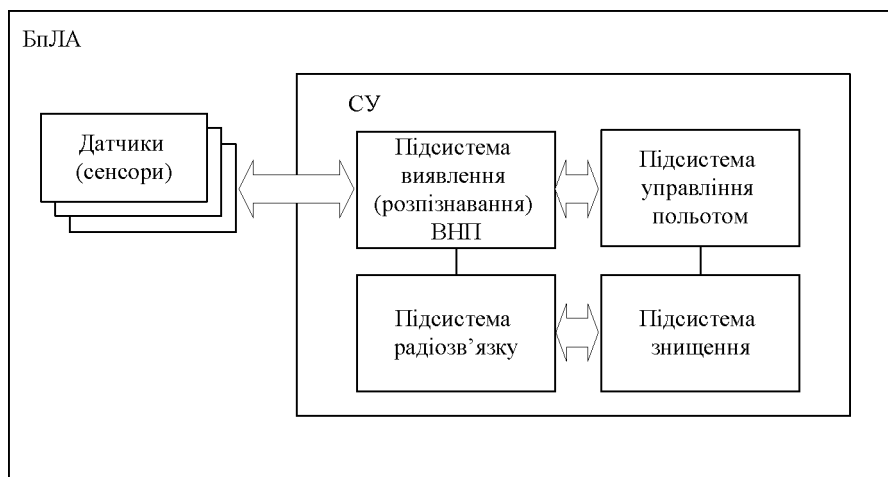


Рис. 3. Узагальнена структура СВВ на БпЛА

Варіант компоновки елементів СВВ на базі БпЛА представлений на рисунку 4. У системі пропонується використовувати наступні датчики: тепловізійна та оптична камери, металошукач [5; 9] та маніпулятор з вибухівкою для дистанційного розмінування.

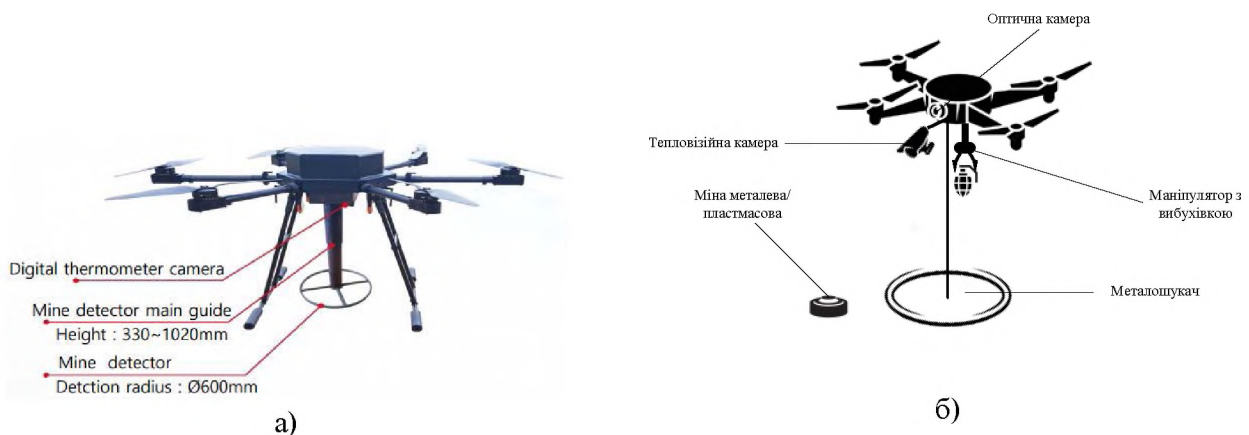


Рис. 4. Варіант компоновки СВВ:

*a* – існуюча комбінована система; *b* – перспективна система з маніпулятором для вибухівки



### За функціями СВВ.

1. Робота оператора в СВВ починається з побудови маршруту розмінування та введення координат в налаштуваннях БпЛА. Типовий маршрут обльоту БпЛА замінованої місцевості представлений на рисунку 5.

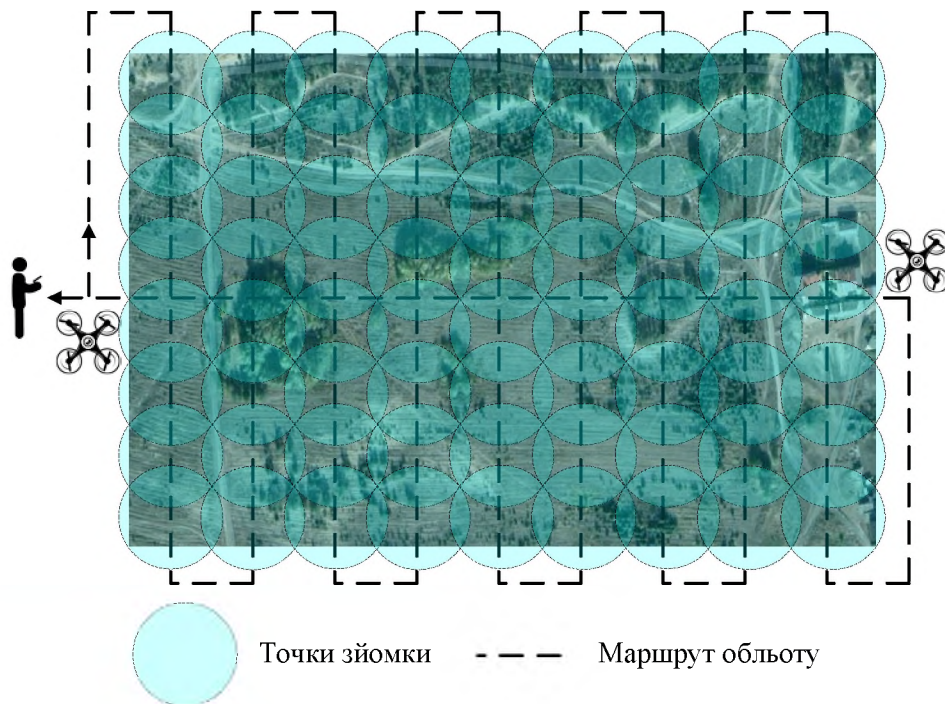


Рис. 5. Типовий маршрут обльоту БпЛА замінованої місцевості

2. Під час обльоту території оператором аналізується зображення з оптичної та тепловізійної камери [6] для пошуку ВВП, що знаходяться на поверхні. Зображення території на знімках оптичної камери з гарною розподільчою здатністю дозволяє провести поверхневий аналіз ґрунту за допомогою нейронних мереж або власноруч спеціалістом.

3. Одночасно за допомогою металошукача здійснюється пошук металовмісних предметів на поверхні землі та під землею. Особливістю використання металошукача (який є звичайною котушкою) на базі БпЛА є необхідність розміщення її на відстані не менш ніж 30 см від БпЛА, для уникнення перешкод при передачі даних із системи БпЛА до оператора. Також при пошуку критичною є відстань між поверхнею землі та металошукачем [5; 7; 9], яка не повинна бути більш ніж 20 см, інакше металошукач ігнорує об'єкти, котрі знаходяться під землею (оператор повинен постійно контролювати цю відстань).

4. На завершальному етапі, якщо оператор підтверджує виявлення ВВП, за допомогою маніпулятора буде здійснюватися закладення вибухівки на місця виявлення ВВП і проводиться дистанційний підрив, завчасно відвівши БпЛА на безпечну відстань. Для наглядності приведемо алгоритм дій оператора з виявлення ВВП (рис. 6).

Завдяки отриманню даних в режимі онлайн оператор може приймати рішення щодо виявлення ВВП в режимі реального часу або вести запис цих даних у зручній для нього формі та повертатися до відмічених ділянок пізніше. Наприклад, якщо оператор має сумніви щодо виявлення ВВП, він може поставити маркер на карті і повернутися до нього повторно, або власноруч зробити перевірку підозрілого предмету на місцевості. Доцільним рішенням можна вважати створення карти із відображенням отриманих та оброблених даних у певних ділянках пройденого шляху, це дозволить зберігати усі отримані дані та відобразити їх, наприклад, у вигляді зображень. Для створення таких карт система має отримувати не тільки дані про наявність або відсутність ВВП, а й про переміщення БпЛА у просторі. Запропонований варіант СВВ ВВП буде достатнім для виявлення більшості ВВП, що знаходяться на поверхні.

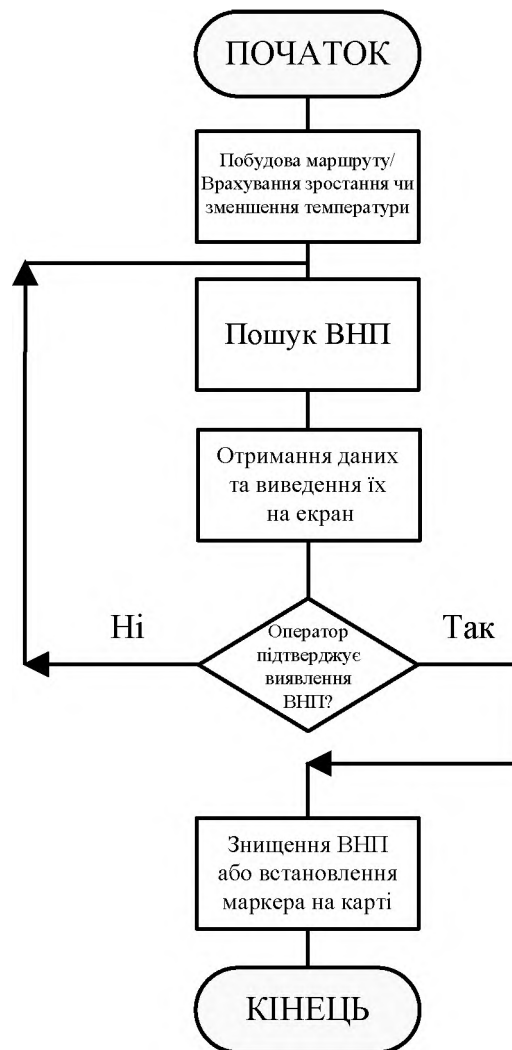


Рис. 6. Алгоритм дій оператора з виявлення ВВП

**Параметри оцінки та цільові функції.** Ефективність використання СВВ на базі БпЛА залежить від комплексу засобів пошуку, що використовуються для вирішення поставлених завдань, лише комплексне поєднання та використання сучасних засобів і способів розвідки й розмінування дозволить ефективно вирішувати завдання з виявлення ВВП [11].

Параметри оцінки ефективності функціонування СВВ залежать від наступних вихідних даних:

**множина датчиків**  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}, i = 1 \dots n$ ;

**площа обльоту** замінованої території  $S = [S_{\min}, S_{\max}]$ ;

**швидкість польоту** з врахуванням заданої ймовірності виявлення ВВП на одиницю площі  $V = [V_{\min}, V_{\max}]$ .

Оцінка ефективності пошуку ВВП здійснюється за критерієм:

мінімум **часу виявлення**  $T_v$  ВВП – за мінімальний (обмежений) час польоту (один раунд обльоту) з забезпеченням заданої ймовірності виявлення з отриманими даними від всіх датчиків становить:

$$T_v \rightarrow \min \text{ або } T_v \leq T_{\text{взад}},$$

де  $T_{\text{взад}}$  – заданий час виявлення ВВП.

Час виявлення ВВП залежить від характеристик БпЛА (тривалість, швидкість і висота польоту, радіообладнання й ін.), характеристик датчиків, вимог щодо ймовірності виявлення ВВП, параметрів довжини маршруту тощо. Довжина маршруту залежить від кількості точок збору інформації, їх розміщення. Зі збільшенням висоти польоту БпЛА збільшується зона покриття, однак гранична висота обмежена відстанню котушки металошукача до землі, тому будемо вважати, що  $h \leq 20$  см.

Зменшення *вартості* СВВ  $C$  становить:

$$C \rightarrow \min, C = C_E + C_P + C_O,$$

де  $C_E$  – вартість експлуатації;  $C_P$  – вартість розробки;  $C_O$  – вартість обладнання.

**Висновки.** У статті проаналізовано вихідні дані найбільш розповсюджених ВНП на території України. На основі аналізу ВНП сформовані вимоги до створення СВВ. Визначені складові етапів синтезу СВВ: параметри виявлення, типи датчиків, функції, параметри оцінки та цільові функції.

**Подальшим напрямком наукових досліджень** може бути інтегрування бази сигнатур ВНП за допомогою нейронних мереж в процес функціонування СВВ із врахуванням міжнародних стандартів з питань протимінної діяльності.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Picariello F., Tudosa I. Sensors and Measurements for UAV Safety: An Overview. *Sensors* 2021, 21, 8253.
2. Shahmoradi J., Talebi E., Roghanchi P., Hassanalian M. A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. *Drones* 2020, 4, 34.
3. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Z. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *Int J Coal Sci Technol* (2019), 6(3): 320–333.
4. He X., Yang X., Luo Z., Guan T. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared remote sensing to identify coal fires in the Huojitu coal mine in Shenmu city, China.
5. Ackerman E. Metal-Detecting Drone Could Autonomously Find Land Mines.
6. Drones with cameras learned to find dangerous mines-buttefly.
7. Kovács Z., Ember I. Landmine detection with drones. *Land Forces Academy Review* Vol. XXVII, No. 1 (105), 2022.
8. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених / Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів). Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2022. 305 с.
9. Молочко С. М., Башинський В. Г., Каламурза О. Г., Журахов В. А. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БпАК, збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 8 (2). С. 80–90.
10. Колос Р. Л., Фтемов Ю. О. Організація виконання робіт з розмінування місцевості від вибухонебезпечних предметів, військово-технічний збірник. 2017. № 17. С. 53–60.
11. Романюк В. А., Лисенко О. І., Романюк А. В., Новіков В. І., Гуйда О. Г. Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-телекомунікаційних роботів, вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71). № 2. С. 25–35.