

ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК: 623.368:623.746-519

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.102-110>І. Мартинюк¹, Є. Шматов¹, Т. Погребняк¹, А. Каршень¹, О. Стаднічук¹, О. Лаврененко²¹ Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ² Науково-дослідний інститут воєнної розвідки²

Article history: Received 06 September 2023; Revised 08 September 2023; Accepted 30 September 2023

ХІМІЧНІ СЕНСОРИ НА БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ: ПЕРСПЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК ПОШУКУ МІННО-ВИБУХОВИХ ПРИСТРОЇВ

Підвищення ефективності протимінного захисту військ, вчасне виявлення та позначення на місцевості мінно-вибухових пристроїв, оперативне інформування особового складу підрозділів, що діють у цьому районі, пошук методів та засобів, що збільшують надійність пошуку та знижують рівень помилкових виявлень, можливої ідентифікації та позначення мін (вибухонебезпечних предметів), є надзвичайно актуальними і, зважаючи на масштаби розмінувань, що необхідно буде здійснити на території України після завершення бойових дій, – перспективними завданнями. Досягнути цього можна за допомогою запровадження сучасних, надійних, ефективних, дистанційних методів і засобів пошуку, виявлення, ідентифікації та позначення мінно-вибухових пристроїв, що працюють в режимі реального часу з доволі високою швидкістю. Мета дослідження – обґрунтування необхідності використання хімічних модулів (обладнаних набором хімічних сенсорів), встановлених на безпілотні літальні апарати для проведення інженерно-розвідувальних дій з пошуку, виявлення та позначення мінно-вибухових пристроїв. Встановлено, що поєднання безпілотних літальних апаратів мультироторного типу з відповідним хімічним модулем переважатиме інші засоби розвідки мінно-вибухових пристроїв (загороджень), що знаходяться на озброєнні, та відповідатиме таким критеріям, як мобільність, швидкість (оперативність), чутливість, достовірність, вибірковість, надійність, стабільність. Необхідно до складу хімічного модуля включати різні відповідні сенсори, що доповнюватимуть один одного і охоплюватимуть весь спектр вибухових речовин, що використовуються для спорядження мін та вибухонебезпечних предметів. Перспективними є хімічні сенсори, що працюють за принципом пригнічення флуоресцентного випромінювання парою вибухової речовини. Ефективність розмінування за допомогою безпілотних літальних апаратів з хімічним модулем буде залежати від ймовірності потрапляння у зону дії хімічного модуля парів вибухових речовин та ймовірності виявлення мінно-вибухових пристроїв. Водночас обладнання безпілотних літальних апаратів, призначених для ведення інженерної розвідки не лише хімічним модулем, але й іншими, додатковими датчиками для виявлення мін (вибухонебезпечних предметів) за вторинними ознаками дозволить збільшити надійність пошуку та виявлення мінно-вибухових пристроїв.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, міни, хімічний модуль, хімічні сенсори, безпілотні літальні апарати, виявлення мінно-вибухових пристроїв.

Постановка проблеми

Вибухонебезпечні предмети (ВНП) є частиною повсякденного життя з часів Першої та Другої світових воєн. По всьому світу майже щодня повідомляють про знешкодження ВНП, яким 50 і більше років [1]. Крім спадку двох світових воєн, існують сучасні збройні конфлікти, що збільшують частку ВНП по всьому світу. Російсько-українська війна не є винятком і поки вона триває важко оцінити масштаби мінувань територій нашої країни [2].

Підходи, що використовуються для ведення інженерної розвідки місцевості з метою виявлення

мін (ВНП), з огляду на отриманий досвід російсько-українського протистояння, свідчать про певні проблеми, що потребують вирішення. Зокрема:

- застарілість електричних та механічних засобів інженерної розвідки мінно-вибухових загороджень, що знаходяться на озброєнні інженерних підрозділів;
- відсутність засобів дистанційного виявлення мінно-вибухових пристроїв;
- недостатня кількість сучасних засобів розвідки мінно-вибухових загороджень та розмінування;
- низька оперативність інформування підрозділів про мінну обстановку у районах бойових дій.

Для протимінного захисту військ виконується комплекс заходів, що направлений на захист особового складу, озброєння, військової техніки та інших об'єктів. Одним із основних напрямів підвищення ефективності захисту військ від мінної зброї є вдоконалення заходів своєчасного виявлення та позначення на місцевості мін (ВНП), а також оперативне інформування особового складу підрозділів, що діють у цьому районі. Досягнути цього можна за допомогою сучасних, надійних, ефективних, мобільних методів і засобів пошуку, виявлення, ідентифікації та позначення мін (ВНП), що працюють в режимі реального часу з доволі високою продуктивністю.

Пошук мін (ВНП) є досить складним процесом, що постійно вдосконалюється. Для виявлення, ідентифікації мін (ВНП) користуються багатьма методами, в основі яких лежать різні фізичні принципи: механічні (контактні, механізовані), електромагнітні (радіохвильові, рентгенівські, оптичні), магнітометричні, акустичні, хімічні (газоаналітичні, біофізичні) тощо [3]. За типом взаємодії з ВНП методи виявлення поділяють на активні (контактні, механічні, радіохвильові, рентгенівські, сейсмоакустичні) та пасивні (оптичні, хімічні, магнітометричні), за типом платформи – на стаціонарні (наприклад, контактний та акустичний) та мобільні (хімічні, електромагнітні, магнітометричні).

Досить поширеними засобами пошуку і виявлення мін (ВНП) є прилади, принцип дії яких базується на вторинних ознаках: геометрії, конфігурації, форми зображення, наявності металу, пошкодження ґрунту, фізичних властивостей матеріалу, наприклад, щільності, теплопровідності, що часто призводить до хибних результатів. Тому пошук методів та засобів, що збільшують надійність та знижують рівень помилкових виявлень, можливої ідентифікації та позначення мін (ВНП) є доволі необхідним та актуальним, зважаючи на величезні масштаби розмінувань, що необхідно буде здійснити на території України, – надзвичайно перспективним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз останніх досліджень дозволяє розділити наукові праці за трьома основними напрямками: способи (методи) виявлення мін (ВНП), засоби, з якими вони поєднуються, та пошук оптимальних варіантів проведення мінної розвідки, зокрема за допомогою БпЛА.

Для швидкого виявлення мін (ВНП) часто користуються методами масового аналізу, наприклад, електромагнітної індукції, ядерного квадрупольного резонансу, акустичної сейсморозвідки [4] тощо. Вони є активними за типом взаємодії з мінами (ВНП), де сигнал від приладу спрямовується до захованого об'єкта, а відбитий сигнал – оцінюється сенсорами приладу. Для надійної роботи система виявлення

захованих мін (ВНП) повинна мати можливість інтерпретувати якомога більше даних та допомагати оператору в процесі прийняття рішень [5]. Тому важливим є усунення або мінімізація цього недоліку, щоб забезпечити оператору безпеку детектування. У роботі [5] пропонують виявляти та створювати зображення підземних об'єктів для розпізнавання вибухових речовин (ВР) за допомогою матриці феррозондових датчиків.

Іншим способом виявлення мін (ВНП) є техніка (спосіб) аналізу слідів (залишки), де аналізуються залишки молекул вибухових речовин у повітрі чи ґрунті [4], тобто виявляти міни (ВНП) можна за допомогою пасивних методів без випромінювання сигналу від приладу сканування простору. Так, у дослідженні [6] для ідентифікації мін (ВНП), встановлених на мінних полях, використовують оптичні прилади, що фіксують та аналізують температурне випромінювання нагрітих предметів. Оскільки значна кількість протитанкових та протипіхотних мін, що використовують, мають металеві корпуси то, зазначений спосіб значно полегшує завдання інженерної розвідки місцевості із встановлення наявності мін (ВНП).

Крім способу виявлення, важливими є також засоби для виявлення, позначення і знешкодження мін (ВНП). Перспективними є безпілотні літальні апарати (БпЛА), на яких встановлюють різні датчики [7-9], що збільшує швидкість виявлення мін (ВНП), покращує доступ до складної за рельєфом місцевості та дає змогу забезпечити безпеку оператору (особовому складу). Для дистанційного обстеження мінних полів з БпЛА використовують різні технології зондування, кожна з яких має певні переваги та недоліки. Так, БпЛА, обладнаний металодетектором [10], за умов низького польоту та малої швидкості досить ефективно виявляє міни (ВНП). Проте така система потребує певної кількості вмісту металу, щоб створити сигнатуру наземної міни. Відповідно, виявлення мін з низьким вмістом металу буде ускладненим.

Автори [11, 12] інтегрували радіосистему на основі різних типів георадара для БпЛА, що виявляють наземні міни. Однак на межі "поверхня ↔ повітря" виникають сильні перешкоди, що впливають на ефективність виявлення наземних мін.

Основою нового, легкого, з низьким енергоспоживанням георадара є радар безперервної хвилі зі ступінчастою частотою [13]. Зазначена система ефективно виявляє міни у металевому та пластиковому корпусах під час польоту на малих висотах, проте має обмежену швидкість сканування та залежить від вмісту вологи в ґрунті.

Використання різних хімічних сенсорів [14-16] дозволяють виявляти ВР в режимі реального часу у концентраціях (кількостях), що переважають можливості виявлення ВР спеціально підготовленими тваринами, зокрема собаками, на кілька порядків [16]. Крім того, хімічний метод виявлення ВНП є пасивним,

що виключає підриєв мін (ВНП) ініційованих фізичними полями при активному зондуванні.

Важливим елементом дослідження є організація ведення розвідки ВНП за допомогою БПЛА. Так, у роботі [17] обґрунтовано спосіб проведення оцінки дій БПЛА при проведенні повітряної розвідки за значенням вартості отримання інформації з одиниці площі поверхні. У статті [7] зазначається, що імовірність виявлення хімічних речовин вибухової дії залежить від рівня навченості, фізичної витривалості, психологічної стійкості та втомленості особового складу розвідувального дозору, технічних характеристик приладів, встановлених на засобах розвідки та швидкості руху. У роботі [18] пропонується методика виконання основних інженерно-штурманських розрахунків польотів БПЛА з обов'язковими поправками до курсу на знесення вітром, швидкість руху та тривалість польоту на прямолінійних ділянках маршруту та ділянках розворотів за наявності вітру.

Визначення маршруту розвідки, сканування зони визначення ВНП можливе також за допомогою моделі сегментації U-Net, що для ідентифікації наземних мін аналізує супутникові зображення та обирає шаблони траєкторії руху БПЛА [19].

Незалежно від того, якими методами та засобами користуються для пошуку, виявлення, ідентифікації, позначення ВНП, необхідно шукати шляхи підвищення їхньої ефективності. Фактично для підвищення ефективності пошуку, виявлення, ідентифікації, позначення та знешкодження ВНП потрібно мати такі засоби, що за своїми технічними характеристиками будуть перевищувати "золотий стандарт" пошуку мін (ВНП).

Формулювання мети статті

Мета дослідження – обґрунтування необхідності використання хімічних модулів (обладнаних набором хімічних сенсорів), встановлених на БПЛА для проведення інженерно-розвідувальних дій з пошуку, виявлення та позначення мінно-вибухових пристроїв.

Виклад основного матеріалу

Точність і ефективність виявлення мін та ВНП за допомогою різних датчиків (сенсорів) встановлених на БПЛА залежить від:

- вибору сенсорної технології, що визначатиметься чутливістю до різних типів наземних мін (ВНП), що залежить від багатьох чинників, наприклад місця розташування (глибини встановлення) міни (ВНП) [3, 6, 8];

- типу протипіхотних та протитанкових мін, від чого буде залежати розмір та склад матеріалу. Здатність датчика/сенсора ідентифікувати міни різного складу залежить від його чутливості до різних матеріалів;

- типу ґрунту: структури, пористості, вологості, електропровідності, магнітної сприйнятливості тощо.

Наявність різного складу ґрунту потенційно може призвести до помилкових сповіщень або випадків невиявлених подій, тобто не спрацювання сенсора;

- метеоумов та наявності сторонніх споруд, електромагнітних пристроїв, що будуть знаходитись поблизу місця обстеження та можуть спотворювати сигнали, що надходять. Відповідно, надійність та точність у цих умовах не відповідатиме заявленим характеристикам;

- хороша просторова роздільна здатність, що визначається характеристиками сенсора та параметрами польоту, впливає на його здатність виявляти невеликі або близько розташовані міни;

- висота та швидкість польоту БПЛА;

- рельєф ділянки обстеження, що впливає на стійкість польоту БПЛА та близькість сенсору до землі та може викликати відхилення в отриманих показниках.

Поєднання БПЛА та різних сенсорів виявлення мін (ВНП) дозволяє проводити обстеження території на низькій висоті з прийнятною швидкістю, що забезпечує повний збір даних, та покращує ідентифікацію об'єкта (рис. 1). Вихідними даними для обстеження території на наявність мін (ВНП) є топографічна карта мінного поля за цільовим призначенням (протитанкові, протипіхотні, протидесантні, змішані тощо). Далі на визначеній/виділеній області планується маршрут або план шляху БПЛА, створюється курс для дослідження всіх топографічних місць і збору інформації на основі датчиків. Отримані результати під час обльоту заданої території фіксуються, надсилаються і обробляються, після чого їх наносять на карту. Група розмінування може використати результати розвідки для перевірки вказаних місць і видалення або знищення мін (ВНП).

Відомо, що міни та ВНП при зберіганні виділяють певну кількість парів вибухових речовин. Більше 70% усіх відомих мін споряджаються тротилом та гексогеном. Склад та кількість парів ВР залежать від багатьох факторів: стійкості самої ВР, упакування (корпусу міни), умов зберігання, встановлення (у ґрунті, воді) тощо. Пари ВР з часом просочуються через корпус міни (ВНП), дифундують у навколишнє середовище, розчиняються у наявній там кількості вологи та мігрують на поверхню (наприклад, корпусу чи ґрунту). На поверхні корпусу/ґрунту вони під впливом конвекції та адвекції переміщуються у повітрі, створюючи найбільшу концентрацію пари безпосередньо над місцем знаходження міни (ВНП) (рис. 2), що дозволяє хімічному сенсору ідентифікувати ці пари як ВР. Хімічні сенсори можуть виявляти пари ВР у концентраціях (кількостях) на рівні молекул [14-16]. Крім того, їх легко поєднувати у спеціальні хімічні модулі, що зможуть не лише швидко та надійно виявляти ВР, але й ідентифікувати їх.

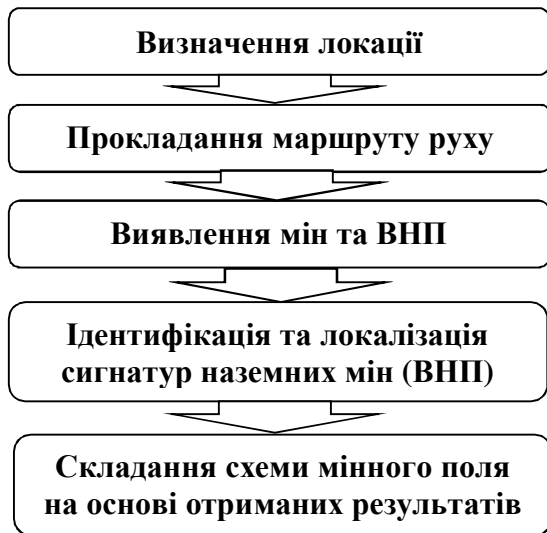


Рис. 1. Послідовність виявлення наземних мін за допомогою БпЛА

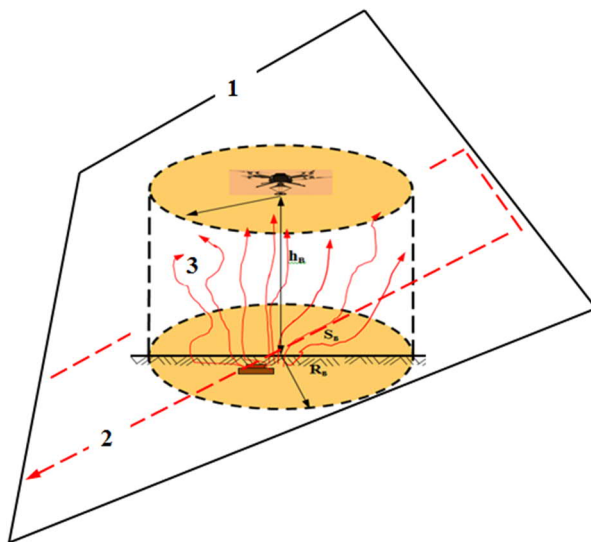


Рис. 2. Пошук мін (ВВП) за допомогою БпЛА обладнаного хімічним модулем:

1 – район пошуку мін (ВВП); 2 – напрямок руху БпЛА з хімічним модулем; 3 – максимальна концентрація парів вибухових речовин у місці розміщення міни (ВВП)

Для переміщення хімічного модуля над ділянкою місцевості, що обстежується на наявність ВР, найкраще використовувати спеціальні мультироторні БпЛА, оскільки максимальне скупчення повітряних мас із вмістом парів ВР буде між його лопатями [15]. Загалом, БпЛА можуть виконувати польоти автономно або за допомогою дистанційного керування з землі, мати різні розміри і вагу і, відповідно до набору технічних вимог, відповідати певному класу. Залежно від технічних і бойових особливостей БпЛА поділяються за рівнем застосування на тактичні, оперативно-тактичні, оперативні, стратегічні (табл. 1) [18, 20].

Серед наведених категорій для ведення мінної розвідки актуальними будуть БпЛА I класу, мультироторного типу. Такий тип БпЛА може переміщуватись

над поверхнею, що обстежується, із заданими швидкістю та висотою польоту, зависати над визначеною ділянкою місцевості. Крім того, БпЛА цього класу є стійкими до раптових поривів вітру, мають задовільну вантажопідйомність, легке маневрування, характеризуються низьким енергоспоживанням, незначними масо-габаритними розмірами, простотою в експлуатації та виробництві.

Обладнання БпЛА хімічним модулем, до складу якого входять високопродуктивні хімічні сенсори, дозволить суттєво підвищити можливості інженерних підрозділів щодо виявлення мінно-вибухових загорождень та покращити ситуацію з розв'язання проблеми гуманітарного розмінування територій від різних мін і ВВП завдяки мобільності та швидкості ведення пошуку (розвідки).

Таблиця 1

Класифікація БпЛА малої дальності

| Клас | Рівень застосування | Злітна маса, кг | Бойовий радіус | Категорія БпЛА |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------|----------------|
| I клас <150 кг | мікро (тактичний) | <2 | до 5 км ¹ | micro |
| | міні (тактичні поля бою) | 2 ÷ 15 | > 5 км ¹ | mini |
| | малі (тактичні) | > 15 | >25 км ¹ | small |
| II клас 150 ÷ 600 кг | тактичні (оперативно-тактичні) | | >50 км ¹ | tactical |
| III клас >600кг | оперативні | | >200км ² | MALE |
| | стратегічні | | >200км ² | HALE |

Примітки: ¹ – зона прямої видимості; ² – поза зоною прямої видимості

Використання БпЛА, обладнаного хімічним модулем для пошуку, виявлення та ідентифікації мін (ВВП), у складі безпілотного авіаційного комплексу (БпАК) є доволі оптимальним варіантом. Ймовірний склад БпАК інженерної розвідки: 2-3 БпЛА обладнаних хімічними модулями, транспортний засіб підвищеної прохідності, пункт дистанційного пілотування, електрогенератор, запасні акумуляторні батареї тощо. Це дозволить оперативно перенаправляти БпЛА з хімічним модулем з одного напрямку на інший у потрібний район для вчасного виявлення мінної обстановки.

Ефективність дій БпЛА, обладнаного модулем хімічного пошуку та виявлення мін (ВВП), буде визначатися технічними характеристиками самого БпЛА, можливістю хімічного сенсора аналізувати потоки повітря на вміст ВР в режимі реального часу та відновлюватись у випадку спрацювання (виявлення пари ВР), а також технічними характеристиками транспортного засобу.

Встановлення на БпЛА інженерної розвідки спеціального пристрою для позначення місць знаходження

мін (ВНП) та синхронізація його зі спрацюванням хімічного модуля дозволить не тільки визначити наявність мін (ВНП), але й одночасно позначати їх на місцевості.

Можливість впродовж тривалого часу виявляти ВР визначається надійністю хімічних сенсорів. Наприклад, сенсори на основі масиву польових транзисторів з кремнієвих нанопровідників, модифікованих шаром аміносилану здатні на 50 циклів виявлення-відновлення зі збереженням початкової чутливості виявлення ВР [16].

Основою багатьох мін (ВНП) є нітрогенвмісні сполуки, зокрема з NO_2 -групою, які добре ідентифікуються, що дозволяє гарантувати високу селективність (вибірковість). Тобто у сучасних хімічних сенсорах підібрані такі хімічні композити (полімерні матеріали), що зв'язують нітрогрупу у певні комплексні сполуки, які безпосередньо дозволяють виявити міни (ВНП). Так, ланцюгові флуоресцентні полімерні системи характеризуються жорстким сполученням ланок тривимірними пентиптиценовими групами. Жорстка та трьохмірна структура полімеру утворює порожнини в плівках, що сприяють розміщенню малих молекул і посилюють дифузію малих молекул у плівки. Наявність певних ВР виявляють за допомогою трьох механізмів. Перший – стеричні обмеження: малі молекули ВР “вписуються” у порожнини плівок, а більші молекули виключаються. Другий механізм забезпечує вибірковість через електростатичну компліментарність між полімером та ВР. Третій механізм – це узгодження потенціалу відновлення ВР та ефективної енергії іонізації полімеру. Ці фактори відіграють важливу роль, оскільки визначають міцність зв'язку комплексу, що утворюється між полімером і ВР.

Висока чутливість хімічних сенсорів, що складають основу хімічного модуля, визначатиме швидкість виявлення мін (ВНП). Нижня межа виявлення парів ВР багатьох хімічних сенсорів з наступною готовністю до детектування нового об'єму повітря через $3\div 5$ с – 1×10^{-6} мг/л. Основний напрям сучасних досліджень щодо хімічних сенсорів полягає у збільшенні циклів роботи (виявлення – відновлення) та зменшенні часу відновлення у $1,5\div 2$ рази. Наприклад, хімічні сенсори ВР на основі металоорганічних каркасів та оксидів металів на основі оксиду титану (TiO_2 , NH_2 -MIL-125) дозволяють ідентифікувати гексоген та тротил серед 25 структурно подібних нітросполук у режимі реального часу на відстані до 8 м. Експериментально досягнута межа виявлення гексогену – 10^{-12} мг/л без попереднього концентрування, а ймовірність виявлення насиченої пари гексогеном та тротилом в межах 10^{-11} – 10^{-10} мг/л становить 82%. Крім того, датчик демонструє чудову селективність та короткий час відгуку 0,14 хв [14].

Для виявлення тротилу перспективними є хімічні сенсори на основі флуоресцентних матеріалів, що в

режимі реального часу виявляють сліди парів тротилу у повітрі до 1×10^{-10} мг/л [15].

Хімічні сенсори, розроблені на основі транзисторів з кремнієвих нанопровідників, модифікованих шаром аміносилану (*3-амінопропілтриетоксисилану* NH_2SiO_3), дозволяють виявляти пари ВР у межах 1×10^{-12} мг/л, а в перспективі – 1×10^{-18} мг/л, що перевищує чутливість тварин, наприклад собак, на кілька порядків [16].

Хімічні сенсори, що працюють за принципом хіморезисторів, використовують флуоресцентні полімери або металоорганічні каркаси з титан (VI) оксидом часто називають кишеньковими через малі масогабаритні розміри. Вага приладів, до складу яких входять такі сенсори, коливається у межах одного кілограму. Споживання енергії такими приладами знаходиться в межах 6 Вт [20]. Зазначені властивості таких хімічних модулів для виявлення ВР дають вагомі підстави для розміщення їх на малих повітряних платформах типу БпЛА мультироторного типу (табл. 1).

Серед когорти сенсорів до перспективних можна віднести хімічні сенсори, що працюють за принципом пригнічення флуоресцентного випромінювання парою вибухової речовини через хорошу селективність та високу чутливість (10^{-12} мг).

Наступні критерії, яким повинні відповідати хімічні сенсори, що можуть бути використані для хімічного модуля БпЛА, – простота експлуатації, можливість заміни одного модуля/сенсора на інший в польових умовах, доступна відносно дешева сировина та спрощена технологія виготовлення, що суттєво знижує його вартість.

Для забезпечення ефективного виявлення мін (ВНП) хімічний модуль, встановлений на БпЛА, з набором різних хімічних сенсорів повинен відповідати ключовим параметрам:

- високій продуктивності (можливості хімічних сенсорів виявляти у визначених умовах різні типи ВР та їхні похідні за одиницю часу);
- транспортальності (стійкості до перевезення хімічних сенсорів різними видами транспорту);
- живучості (збереження продуктивності не залежно від зовнішніх умов: температури, вологості тощо);
- надійності (збереження встановлених характеристик впродовж визначеного часу, що забезпечують виявлення ВР у заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, ремонту/заміни одного сенсора на інший, зберігання та транспортування);
- безвідмовності (здатності зберігати працездатність хімічного сенсора впродовж визначеного (заданого) терміну чи напрацювання/тривалості роботи);
- довговічності (збереження працездатності хімічного сенсора до настання граничного стану/терміну);

– ремонтпридатності (можливості виявлення причин виникнення відмов/хибних спрацювань, повної або часткової втрати працездатності, пошкоджень, заміни окремих хімічних сенсорів);

– економічності (величини затрат на закупівлю, використання та зберігання. Загальним параметром економічності хімічних сенсорів пошуку та виявлення ВМП є питома собівартість одиниці роботи, що виконується БПАК із застосуванням певних хімічних сенсорів/датчиків, за основним призначенням залежно від обстановки: у ході бойових дій чи під час гуманітарного розмінування.

Ймовірність виявлення мін (ВМП) за допомогою БПЛА з хімічним модулем ($P_{ВМП}$) буде визначати ефективність розмінування та залежатиме щонайменше від двох чинників: ймовірності потрапляння у зону дії хімічного модуля парів ВР та ймовірності виявлення мін (ВМП) за умови достатньої концентрації парів ВР для спрацювання хімічного модуля

$$P_{ВМП} = P_{ПП} \times P_{ПК},$$

де $P_{ПП}$ – ймовірність потрапляння парів ВР міни (ВМП) у зону виявлення (дії) хімічного модуля; $P_{ПК}$ – ймовірність виявлення міни (ВМП) за умови достатньої концентрації парів ВР для спрацювання хімічного модуля.

Ймовірність виявлення міни (ВМП) за умов достатньої концентрації парів ВР для спрацювання хімічного сенсору буде залежати від часу, необхідного для спрацювання хімічного модуля та часу перебування БПЛА у точці максимальної концентрації пари ВР [21]

$$P_{ПК} = 1 - e^{-\frac{t_c}{t_p}},$$

де t_c – час спрацювання хімічного модуля при появі у повітрі парів ВР, с; t_p – достатній час перебування хімічного модуля у зоні випаровування (максимального скупчення) парів ВР від міни (ВМП) для його спрацювання, с

$$t_p = \frac{S_B \times h_B}{v_a},$$

де S_B – площа ділянки мінімального накопичення парів ВР навколо міни (ВМП), де спрацює хімічний модуль (тобто концентрація пари ВР буде в межах чутливості хімічного сенсора), м²; h_B – робоча висота БПЛА, з якої ведеться обстеження мінного поля, м; v_a – швидкість аналізу повітря (спрацювання) хімічного сенсора, м³/с.

Ймовірність потрапляння парів ВР міни (ВМП) у зону виявлення (дії) хімічного модуля буде залежати від набору різних типів хімічних сенсорів. Очевидно, що підбирати сенсори потрібно таким чином, щоб ймовірність виявлення кожного з них була достатньо високою. Використання сенсорів, що працюватимуть за різними принципами, гарантує, що система в

будь-яких умовах виконає своє завдання, тобто виявить різні типи мін чи ВМП. Хімічні сенсори необхідно підбирати для модуля після оцінювання їхньої ефективності, тобто ймовірності виявлення парів ВР мін (ВМП) в заданих умовах і у визначений час. Відповідно для розрахунку ймовірності виявлення парів ВР мін (ВМП) на визначеній ділянці за допомогою БПЛА, обладнаного хімічним модулем, під час інженерної розвідки необхідно враховувати:

- погодні умови (WC) (вертикальна стійкість повітря, вологість повітря, наявність туману, дощу, снігу, пилових частинок у повітрі, відсутність опадів, температура, сила вітру тощо);

- умови розташування мін (ВМП) на місцевості (L) (рельєф, висота рослинності, наявність забудов);

- структуру ґрунтів (T) (тип, вологість, пористість, щільність, склад тощо);

- технічні характеристики БПЛА (U) (умови, висота, швидкість, траєкторія польоту БПЛА, наявність додаткового обладнання тощо);

- індивідуальні характеристики хімічного сенсору (C) (чутливість, точність, селективність, швидкодія, швидкість його відновлення після спрацювання тощо).

Оцінку ймовірності впливу кожного фактора на виявлення парів ВР мін (ВМП) хімічним сенсором можна провести шляхом підрахунку кількості ефективних спрацювань. За таких умов ймовірність потрапляння парів ВР міни (ВМП) у зону дії хімічного сенсора ($P_{ПК}$)

$$P_{ПК} = 1 - (1 - P_{WC}) \times (1 - P_L) \times (1 - P_T) \times (1 - P_U) \times (1 - P_C),$$

де P_{WC} – ймовірність виявлення парів ВР міни (ВМП) хімічним сенсором залежно від погодних умов;

P_L – ймовірність виявлення парів ВР міни (ВМП) хімічним сенсором залежно від умов розташування міни (ВМП);

P_T – ймовірність виявлення парів ВР міни (ВМП) хімічним сенсором залежно від структури ґрунту;

P_U – ймовірність виявлення парів ВР міни (ВМП) хімічним сенсором залежно від технічних характеристик БПЛА, на якому встановлений хімічний модуль;

P_C – ймовірність виявлення парів ВР міни (ВМП) хімічним сенсором залежно від його індивідуальних характеристик.

Ефективність описаного підходу буде залежати від використання правильних значень ймовірностей для виявлення, а також для ідентифікації та позначення мін (ВМП), що можуть бути визначені експериментально.

Врахування вищевказаних критеріїв хімічних сенсорів, що будуть входити в склад хімічного модуля, дозволить підвищити ефективність пошуку, виявлення мін (ВМП) та можливої ідентифікації наявних ВР. Обладнання хімічних модулів БПЛА високочутливими, швидкодіючими, з високою селективністю та

вибірковістю хімічних сенсорів дозволить оперативно виявляти міни (ВНП) у режимі реального часу, на великій площі, у стислі терміни та збереже життя саперів.

Висновки

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- обґрунтовано необхідність використання хімічних модулів, встановлених на БПЛА для проведення інженерно-розвідувальних дій з пошуку, виявлення та позначення мінно-вибухових пристроїв;

- для ефективного пошуку, виявлення, позначення мін (ВНП) та можливої ідентифікації наявних ВР та суттєвого покращення рівня протимінного захисту військ доцільним є використання БпАК;

- поєднання БПЛА з хімічним модулем переважатиме інші засоби мінної розвідки, що знаходяться на озброєнні, та відповідатиме таким критеріям, як мобільність, швидкість (оперативність), достовірність, вибірковість, надійність, стабільність;

- до хімічного модуля мають входити сенсори, що спроможні доповнювати один одного і охоплювати весь спектр ВР, що використовуються для спорадження мін та ВНП.

Водночас БПЛА інженерної розвідки, обладнано не лише хімічним модулем, але й іншими датчиками (сенсорами) для виявлення мін (ВНП) за вторинними ознаками, збільшить надійність та якість пошуку та виявлення мінно-вибухових пристроїв.

Подальші наукові дослідження можуть бути спрямовані на розвиток хімічних модулів на БПЛА для покращення ефективності та точності виявлення ВНП, зниження кількості помилкових спрацювань, збільшення шансів вчасного виявлення загроз. Загалом використання хімічних модулів на БПЛА для виявлення ВМ має великий потенціал для підвищення безпеки і захисту людства, щоб мінімізувати можливі ризики та максимізувати користь для суспільства.

Список літератури

1. Cluster Munition Monitor 2023. URL: <https://reliefweb.int/report/world/cluster-munition-monitor-2023>.
2. Горбулін В. П. Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник НАН України*. 2022. № 2. С. 3-13. DOI: doi.org/10.15407/vsn2022.02.003.
3. Gürkan S., Karapınar M., Doğan S. Detection and Imaging of Underground Objects for Distinguishing Explosives by Using a Fluxgate Sensor Array. *Applied sciences*. 2019. Is. 9. pp. 5415; doi:10.3390/app9245415
4. Федоренко Г., Фесенко Г., Харченко В. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22) С. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.020>
5. Hussein E., Waller E. Landmine detection: The problem and the challenge. *Applied Radiation and Isotopes*. 2000. Is. 53, pp. 557–563. doi:10.1016/S0969-8043(00)00218-9.

6. Bajić, M. Jr.; Potočnik B. UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. *Remote Sensing*. 2023. Is. 15, pp. 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967>

7. Шматов С., Мартинюк І, Стаднічук О., Ларіонов В., Ніконець І. Застосування безпілотних літальних апаратів для виявлення хімічної обстановки. *Військово-технічний збірник*. 2021. Вип. № 24. С. 21–30. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.21-30>

8. 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. № 2(8). С.80-90. DOI: 10.37701/dndivsovt.8.2021.09.

9. Коцюруба В.І., Цибуля С.А., Рибалко В.В. Обґрунтування доцільності використання способу повітряної розвідки районів інтенсивного застосування мінної зброї. *Social development & Security*. 2019. №. 9 (1). С. 60–68. DOI: <http://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.5>

URL:<https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/88/85>

10. Fattah, S.A.; Haider, M.Z.; Chowdhury, D.; Sarkar, M.; Chowdhury, R.I.; Islam, M.S.; Karim, R.; Rahi, A.; Shahnaz, C. An aerial landmine detection system with dynamic path and explosion mode identification features. In Proceedings of the IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), Seattle, WA, USA, 13–16 October 2016. pp. 745–752.

11. Colorado, J.; Perez, M.; Mondragon, I.; Mendez, D.; Parra, C.; Devia, C.; Martinez-Moritz, J.; Neira, L. An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an autonomous drone. *Advanced Robotics*. 2017. Is. 31. pp. 791–808.

12. Fernández, M.G. López, Y.Á.; Arboleya, A.A.; Valdés, B.G.; Vaqueiro, Y.R.; Andrés, F.L.H.; García, A.P. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*. 2018. Is. 6. pp. 45100–45112.

13. Šipoš, D.; Gleich, D. A. lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*. 2020. Is. 20. P. 2234.

14. Wei-Hua Deng, Ming-Shui Yao Min-Yi Zhang, Masahiko Tsujimoto, Kenichi Otake, Bo Wang, Chun-Sen Li, Gang Xu, Susumu Kitagaw Non-contact real-time detection of trace nitro-explosives by MOF composites visible-light chemiresistor. *National Science Review*. 2022. Is. 9(10), DOI:10.1093/nsr/nwac143

15. Cumming C.J., Aker C., Fisher M., Fox M., la Grone M.J., Reust D., Rockley M.G., Swager T.M., Towers E., Williams V. Using Novel Fluorescent Polymers as Sensory Materials for Above-Ground Sensing of Chemical Signature Compounds Emanating from Buried Landmines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001. Is. 39 (6). DOI:10.1109/36.927423

16. Engel, Y., Elnathan, R., Pevzner, A., Davidi, G., Flaxer, E., & Patolsky, F. Supersensitive detection of explosives by silicon nanowire arrays. *Angewandte Chemie - International Edition*, 2010. Is. 49(38), pp. 6830-6835. <https://doi.org/10.1002/anie.201000847>

17. Звиглянич С.М. Ізюмський М.П., Орлов С.В. Вибір раціонального варіанту проведення повітряної розвідки безпілотними літальними апаратами. *Наука і техніка*

Повітряних Сил Збройних Сил України: електрон. наук. фахове вид. Харків. ХНУПС. 2018. № 4(33). С. 21–27. DOI:10.30748/nitps.2018.33.03

18. Мирончук Ю., Оверчук С., Ткач А. Інженерно-штурманський розрахунок польотів безпілотних літальних апаратів тактичних класів. *Військово-технічний збірник*. 2023. № 28. С. 42–53. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.42-53>

19. Barnawi, A.; Kumar, K.; Kumar, N.; Thakur, N.; Alzahrani, B.; Almansour, A. Unmanned Ariel Vehicle (UAV) Path Planning for Area Segmentation in Intelligent Landmine Detection Systems. *Sensors*. 2023, Is. 23, P. 7264. <https://doi.org/10.3390/s23167264>

20. Liu J. Nitro-explosives detection realized by core-sheath pillar architecture. URL: <https://phys.org/news/2022-10-nitro-explosives-core-sheath-pillar-architecture.html>

21. Смольков О.Ю., Коцюруба В.І. Гунбін К. Ю. Математична модель пошуку та виявлення вибухових пристроїв з неконтактними датчиками цілі методом нелінійної радіолокації. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2020. № 2 (38). DOI:10.33099/2311-7249/2020-38-2-113-118

Reference

1. Cluster Munition Monitor (2023). <https://reliefweb.int/report/world/cluster-munition-monitor-2023>. [in English].

2. Horbulin V. (2022), Svitova hlobalna problema rozminuvannia: ukraïnskyi vector [World global demining problem: Ukrainian vector]. *Visnyk NAN Ukrainy–Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Issue 2. pp. 3–13. <https://doi.org/10.15407/vsn2022.02.003> [in Ukrainian].

3. Gürkan S., Karapınar M. and Doğan S. Detection and Imaging of Underground Objects for Distinguishing Explosives by Using a Fluxgate Sensor Array. *Applied sciences*. 2019. Issue № 9, pp. 5415; doi:10.3390/app9245415 [in English].

4. Fedorenko H., Fesenko H. and Kharchenko V. (2022), “Analiz metodiv i rozpoznavannia kontseptsii harantovanoho vyjavlennia ta rozpoznavannia vybukhonebezpechnykh predmetiv”. [Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects]. *The current state of scientific research and technology in industry*. Issue № 4 (22) pp. 20-31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.020>. [in English].

5. Hussein E. and Waller E. (2000), Landmine detection: The problem and the challenge. *Applied Radiation and Isotopes*. Issue № 53, pp. 557–563. doi:10.1016/S0969-8043(00)00218-9. [in English].

6. Bajić M. Jr. and Potočnik B. (2023), UAV Thermal Imaging for Unexploded Ordnance Detection by Using Deep Learning. *Remote Sensing*. Issue № 15, pp. 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967> [in English].

7. Shmatov E., Martynyuk I, Stadnichuk O., Larionov V. and Nikonets I. (2021), “Zastosuvannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia vyjavlennia khimichnoi obstanovky” . [Use of unmanned aerial vehicles for detection of chemical conditions]. *Military and technical collection*. Issue № 24. pp. 21–30. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.24.2021.21-30> [in Ukrainian].

8. Molochko S.M., Bashynskyi V.G. Kalamurza O.G. and Zhurakhov V.A. (2021), “Analiz suchasnoho stanu, kharakterystyk ta perspektyv rozvytku datchykyv vyjavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv, vstanovlenykh na BpAK”. [Analysis of the current state, characteristics and prospects for

the development of sensors for detecting explosive objects installed on UAC]. *Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*. Issue № 2(8) pp. 80-90. DOI: 10.37701/dndivsovt.8.2021.09. [in Ukrainian].

9. Kotsyruba V.I., Tsybulya S.A. and Rybalko V.V. (2019), “Obgruntuvannia dotsilnosti vykorystannia sposobu povitrianoi rozvidky raioniv intensyvnoho zastosuvannia minnoi zbroi” [Justification of the feasibility of using the method of aerial reconnaissance of areas of intensive use of mine weapons]. *Social development & Security*. Issue № 9(1). pp. 60–68. DOI: <http://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.5> URL:<https://paperssds.eu/index.php/JSPSDS/article/view/88/85>

10. Fattah S.A., Haider M.Z., Chowdhury D., Sarkar M., Chowdhury R.I., Islam M.S., Karim R., Rahi A. and Shahnaz C. (2016), An aerial landmine detection system with dynamic path and explosion mode identification features. In Proceedings of the 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), Seattle, WA, USA, 13–16 October 2016. pp. 745–752. [in English].

11. Colorado J., Perez M., Mondragon I., Mendez D., Parra C., Devia C., Martinez-Moritz J. and Neira L. (2017), An integrated aerial system for landmine detection: SDR-based Ground Penetrating Radar onboard an autonomous drone. *Advanced Robotics*. Issue 31. pp. 791–808. [in English].

12. Fernández M.G., López Y.Á., Arbolea A.A., Valdés B.G., Vaqueiro Y.R., Andrés F.L.H. and García A.P. (2018), Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*. Issue № 6. pp. 45100–45112. [in English].

13. Šipoš, D. and Gleich, D. (2020), A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*. Issue № 20. pp. 2234.

14. Wei-Hua Deng, Ming-Shui Yao Min-Yi Zhang, Masahiko Tsujimoto, Kenichi Otake, Bo Wang, Chun-Sen Li, Gang Xu and Susumu Kitagaw (2022), Non-contact real-time detection of trace nitro-explosives by MOF composites visible-light chemiresistor. *National Science Review*. Issue № 9(10). DOI:10.1093/nsr/nwac143 [in English].

15. Cumming C., Aker C., Fisher M., Fox M., la Grone M., Reust D., Rockley M., Swager T., Towers E. and Williams V. (2001), Using Novel Fluorescent Polymers as Sensory Materials for Above-Ground Sensing of Chemical Signature Compounds Emanating from Buried Landmines. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. Issue № 39(6) DOI:10.1109/36.927423. DOI:10.1109/36.927423[in English].

16. Engel Y., Elnathan R., Pevzner A., Davidi G., Flaxer E. and Patolsky F. (2010), Supersensitive detection of explosives by silicon nanowire arrays. *Angewandte Chemie - International Edition*. Issue № 49(38). pp. 6830-6835. <https://doi.org/10.1002/anie.201000847> [in English].

17. Zvyglyanych S.M. Izyumskyi M.P. and Orlov S.V. (2018), “Vybir ratsionalnoho variantu provedennia povitrianoi rozvidky bezpilotnykh litalnykh aparatamy” [The choice of a rational option for aerial reconnaissance by unmanned aerial vehicles]. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine: electronic. of science professional type* Kharkiv. KhNUPS. Issue № 4 (33). pp. 21–27. DOI:10.30748/nitps.2018.33.03 [in Ukrainian].

18. Myronchuk Yu, Overchuk S. and Tkach A. (2023), “Inzhenerno-shturmanskyi rozrakhunok polotiv bezpilotnykh litalnykh aparativ taktychnykh klasiv”. [Engineering and navigation calculation of flights of unmanned aerial vehicles of tactical classes]. *Military and technical collection*. Issue № 28. pp. 42–53. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.42-53>[in Ukrainian].

19. Barnawi A., Kumar K., Kumar N., Thakur N., Alzahran B. and Almansour A. (2023), Unmanned Ariel Vehicle (UAV) Path Planning for Area Segmentation in Intelligent Landmine Detection Systems. *Sensors*. Issue № 23, pp. 7264. <https://doi.org/10.3390/s23167264> [in English].

20. Liu J. (2022), Nitro-explosives detection realized by core-sheath pillar architecture. <https://phys.org/news/2022-10-nitro-explosives-core-sheath-pillar-architecture.html> [in English].

21. Smolkov O., Kotsiuruba V. and Hunbin K. (2020) “Matematychna model’ poshuku ta vyyavlennya vybukhovyykh prystroyiv z nekontaktnymy datchykamy tsili metodom nelineynoyi radiolokatsiyi” [Mathematical model for searching and detecting explosive devices with non-contact target sensors by the method of non-linear radar] *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2020. № 2 (38). DOI:10.33099/2311-7249/2020-38-2-113-118 [in Ukrainian].

CHEMICAL SENSORS ON UNMANNED AERIAL VEHICLES: NEW POSSIBILITIES FOR SEARCHING FOR MINES AND EXPLOSIVE DEVICES

I. Martyniuk, Y. Shmatov, T. Pogrebnyak, A. Karshen, O. Stadnichuk, O. Lavrinenko

Increasing the effectiveness of anti-mine protection of troops, timely detection and marking of mine-explosive devices in the area, prompt informing of personnel of units operating in the area, search for methods and means that increase the reliability of the search and reduce the level of false detections, possible identification and marking of mines (explosive objects) are extremely relevant and, given the scale of demining that will need to be carried out on the territory of Ukraine after the end of hostilities, promising tasks. This can be achieved through the introduction of modern, reliable, effective, remote methods and means of searching, detecting, identifying and marking mine-explosive devices that work in real time with a fairly high speed. The purpose of the research is to justify the need to use chemical modules (equipped with a set of chemical sensors) installed on unmanned aerial vehicles for conducting engineering and reconnaissance actions for the search, detection and marking of mine-explosive devices. It has been established that the combination of unmanned aerial vehicles of the multi-rotor type with the appropriate chemical module will prevail over other means of reconnaissance of mine-explosive devices (barrages) in service and will meet such criteria as mobility, speed (operational), sensitivity, reliability, selectivity, reliability, stability. It is recommended that the chemical module include various appropriate sensors that will complement each other and cover the entire range of explosives used to equip mines and explosive objects. Chemical sensors that work on the principle of suppression of fluorescent radiation by the vapor of an explosive substance are promising. The effectiveness of demining with the help of unmanned aerial vehicles with a chemical module will depend on the probability of explosive vapors entering the chemical module's area of operation and the probability of detecting mine-explosive devices. At the same time, the equipment of unmanned aerial vehicles intended for conducting engineering reconnaissance not only with a chemical module, but also with other, additional sensors for detecting mines (explosive objects) by secondary signs will allow to increase the reliability of the search and detection of mine-explosive devices.

Keywords: *explosive objects, mines, chemical module, chemical sensors, unmanned aerial vehicles, detection of mine-explosive devices.*