

## УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ МЕТОДАМИ

*Одним з негативних наслідків ведення бойових дій є забруднення територій вибухонебезпечними предметами. Через значне забруднення територій десятків країн світу вибухонебезпечними предметами питання гарантованого розмінування стало світовою проблемою. Не є виключенням і Україна, яка в наслідок війни РФ проти України стала самою замінованою країною світу. Найбільш складним завданням розмінування є пошук та виявлення вибухонебезпечних предметів в середовищах, що їх вкривають. В цих умовах ведуться пошуки методів та способів гарантованого виявлення вибухонебезпечних предметів. Одним з таких шляхів визначено розробка та впровадження безпілотних систем розмінування.*

*В роботі наведено результати теоретичних досліджень удосконалення математичної моделі виявлення вибухонебезпечних предметів. Розглянуто основні етапи процесу розмінування. Проведено аналіз досліджень, пов'язаних із процесами розмінування, зокрема пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів. За результатами проведеного аналізу існуючих досліджень в даній предметній галузі встановлено шляхи удосконалення математичних моделей виявлення вибухонебезпечних предметів - врахування показників надійності пошукового обладнання та рухомої платформи. Запропоновано підхід удосконалення математичних моделей визначення імовірності виявлення вибухонебезпечних предметів на прикладі пошукових елементів з радіохвильовим методом виявлення вибухонебезпечних предметів. Запропоновано використання даного підходу для визначення імовірності виявлення вибухонебезпечних предметів дистанційно-керованими (роботизованими) засобами (комплексами) розмінування, пошукові елементи яких працюють із використанням і інших електромагнітних методів пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів.*

*Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, пошуковий елемент, методи виявлення, наземні безпілотні системи розмінування, надійність.*

**Вступ.** Досвід війни РФ проти України та воєнних конфліктів останніх десятиріч свідчить про суттєве зростання ролі мінної зброї, яке є результатом ефективності застосування мінно-вибухових загороджень за критерієм «ефективність-вартість» [1]. Відносна дешевизна мінної зброї призводить до широкомасштабного встановлення мінних полів і як наслідок небезпеки користування забрудненої місцевості протягом десятиліть. Окрім встановлених інженерних боєприпасів (мін) забруднення відбувається і іншими боєприпасами (артилерійськими, авіаційними, стрілецькими), які не вибухнули [2].

Проблемі розмінування забруднених територій вибухонебезпечними предметами (ВНП) як в світі так і в Україні приділяється достатньо велика увага [3-4]. На сьогоднішній день розроблено сотні пристроїв пошуку та виявлення ВНП. Проте, на жаль, в світі не існує жодного, який гарантовано виявляв ВНП з різних матеріалів, особливо з діелектриків або надзвичайно малим вмістом металу. Адже не виявлення хоча б одного ВНП тягне за собою небезпеку підриву людини або техніки. Тому врахування всіх факторів, які впливають на ефективність процесів розмінування є важливим завданням під час проведення досліджень в даній предметній галузі. Одним з таких напрямків є врахування надійності пошукового обладнання ВНП та рухомої платформи, на які вони встановлені.

**Аналіз останніх досліджень та постановка задачі.** Проблемі ефективного забезпечення виконання заходів розмінування як в світі, так і в Україні присвячено достатньо багато праць. Вони мають різну направленість від процесів пошуку та виявлення до ефективних способів подолання мінно-вибухових загороджень та суцільного розмінування місцевості. Проте,

враховуючи те, що одним з основних та складних етапів розмінування є пошук та виявлення ВВП, більшість праць направлено саме в цьому векторі. Аналіз праць щодо пошуку та виявлення показує, що вони сконцентровані на застосуванні існуючих методів виявлення ВВП як окремо так і у поєднанні, а також пошуку нових. Найбільш широко отримали розповсюдження електромагнітні методи виявлення ВВП. Так, роботи [5] присвячена аналізу методів виявлення ВВП, в середовищах, що їх вкривають. Роботи [6,7] присвячені обґрунтуванню застосування електромагнітних методів виявлення ВВП в середовищах, що їх вкривають. В роботах [8-11] розглядаються питання удосконалення математичних моделей пошуку та виявлення ВВП індукційним, радіохвильовим та радіолокаційним методами, на принципі яких працюють пошукові пристрої, які встановлені на екіпажні або безпілотні платформи. Для підвищення ефективності пошуку та виявлення ВВП в роботі [12] запропонований підхід до раціональної комбінації трьох методів виявлення ВВП. Проте, аналіз наведених праць показує, що запропоновані моделі має низку обмежень та не враховують окремі фактори, що впливають на ефективність процесів розмінування, зокрема не враховано показники надійності складових засобів (комплексів) розмінування.

Отже, **метою статті** є удосконалення математичних моделей пошуку та виявлення ВВП за рахунок врахування показників надійності пошукового обладнання та платформ, на яке воно встановлено.

**Виклад основного матеріалу.** Досвід ведення війни рф проти України показує, що не зважаючи на наявність різноманітних механізованих засобів розмінування ручний спосіб залишається основним, що знижує ефективність виконання бойових завдань з розмінування та становить велику небезпеку саперам. Такий стан перш за все пов'язаний із застарілістю існуючих засобів розмінування та їх недостатньою кількістю. Так, на озброєння Сил оборони України надходять різноманітні безпілотні засоби розмінування, але їх кількість обмежена і в основному їх можна використовувати під час гуманітарного розмінування. В цих умовах ведеться пошук ефективних рішень щодо розробки та застосування перспективних безпілотних систем розмінування з метою підвищити ефективність виконання завдань та усунути перебування людини на небезпечній місцевості. Враховуючи сучасний стан науково-технічного прогресу на сучасному етапі ці засоби можна віднести до наземних дистанційно-керованих (роботизованих) засобів (комплексів) розмінування (ДКРЗКР).

В загальному розумінні процес розмінування можна розділити на наступні етапи:  
розвідка місцевості, об'єктів на наявність ВВП (пошук, виявлення, та ідентифікація ВВП, встановлення розмірів та характеристик МВЗ, пошук шляхів обходу МВЗ);  
пророблення проходів в МВЗ (знищення або видалення за межі проходу ВВП);  
суцільне розмінування місцевості (знищення або знешкодження та видалення ВВП);  
перевірка якості розмінованої місцевості.

Необхідно зауважити, що від якості виконання першого етапу залежить виконання наступних. Пошук та виявлення ВВП є найбільш складним та відповідальним етапом розмінування і вимагає від засобів пошуку високої ефективності та гарантійної надійності.

Враховуючи велику кількість методів виявлення ВВП [5] можна зазначити, що підхід до визначення імовірності виявлення ВВП для багатьох з них залишається однаковим, зокрема, для групи електромагнітних методів. Тому в подальшому на прикладі одного з них розглянемо процес удосконалення математичної моделі виявлення ВВП.

Отже, серед різноманіття електромагнітних методів виявлення ВВП особливе місце займає радіохвильовий, який дозволяє виявляти предмети в корпусах з різних матеріалів, у тому числі і неметалевих, в середовищах, що їх вкривають [7, 13]. Тому на прикладі цього методу розглянемо удосконалення математичної моделі виявлення ВВП.

Аналіз досліджень застосування радіохвильового методу для пошуку ВВП [7,9,11,13] показує, що вони достатньо повно описують процес застосування цього методу. Проте, вони мають ряд обмежень та не враховують імовірнісні показники надійності як пошукового обладнання, так і рухомої платформи, на якому воно встановлено, що не дозволяє більш повно оцінити ефективність застосування даного методу в ДКРЗКР, призначення яких є пошук та виявлення ВВП.



Математичне очікування коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ буде визначатись як:

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^n k_i}{n}, i = \overline{1..n}. \quad (6)$$

де  $k_i$  - значення коефіцієнту відбиття радіохвиль для вибірки очікуваних ґрунтових умов та типів ВВП;

$n$  - кількість значень коефіцієнту відбиття радіохвиль для вибірки очікуваних ґрунтових умов та типу ВВП.

Дисперсія коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ визначається за виразом:

$$D^* = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - m^*)^2}{n-1}, i = \overline{1..n}. \quad (7)$$

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнту відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ:

$$\sigma^* = \sqrt{D^*}, \quad (8)$$

Згідно [9] коефіцієнт відбиття для поверхні розділу двох діелектричних середовищ здійснювати із врахуванням їх відносного діелектричного проникнення за виразом:

$$k_i = \frac{\sqrt{\varepsilon_{\text{ґр}i}} - \sqrt{\varepsilon_{\text{ВВП}}}}{\sqrt{\varepsilon_{\text{ґр}i}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{ВВП}}}}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_{\text{ґр(ВВП)}}$  - відносне діелектричне проникнення ґрунту та ВВП [6].

В роботі [11] удосконалення моделі при визначенні умовної імовірності виявлення ВВП радіохвильовим способом пов'язане із врахуванням затухання радіохвиль (рис. 2) та глибини їх проникнення.

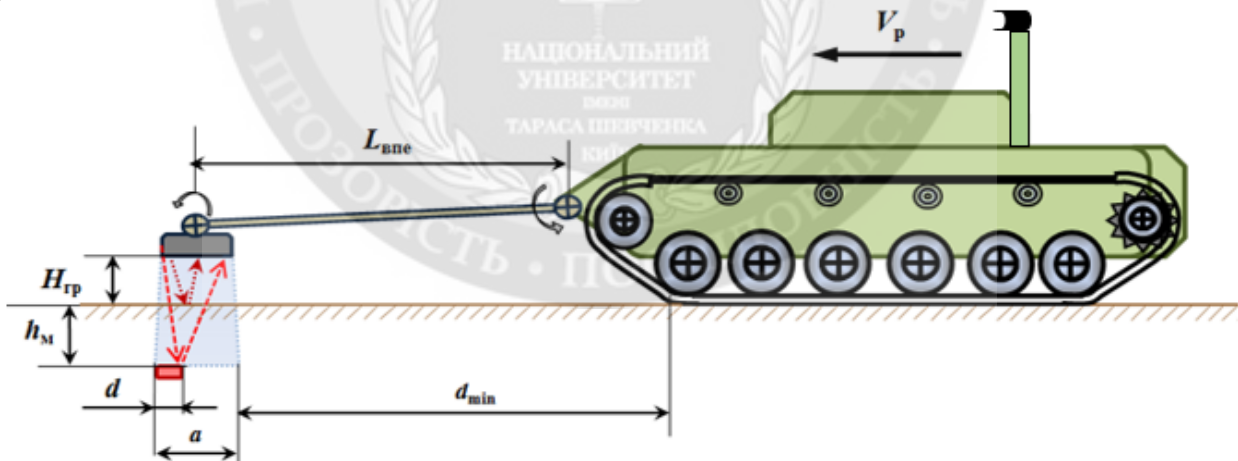


Рисунок 2 - Схема виявлення ДКРЗКР ВВП з обладнанням на основі радіохвильовими методу

Це в свою чергу впливає на технічні характеристики пошукового обладнання щодо глибини проникнення радіохвиль та глибини виявлення ВВП, для яких повинні виконуватись додаткові умови

$$h_m \leq l_{\text{рх}} - H_{\text{ґр}}, \quad (10)$$

де  $l_{\text{рх}}$  - максимальна відстань дії пошукового обладнання, м;

$H_{\text{ґр}}$  - висота встановлення пошукового обладнання над ґрунтом, м.

Максимальна відстань дії електромагнітної хвилі [14]:

$$l_{px} = \frac{V_{px}}{f_{вип}}, \quad (11)$$

де  $V_{px}$  - швидкість розповсюдження радіохвиль, м/с;

$f_{вип}$  - частота випромінювання радіохвиль, МГц.

Зазначені параметри використовуються для обґрунтування висоти розміщення пошукового обладнання над ґрунтом та для розрахунку ймовірності виявлення ВВП за умов попадання його зони дії пошукового обладнання, при цьому, якщо умова (10) виконується, то  $P_{в/н}$  визначається за виразом (5), а якщо не виконується -  $P_{в/н} = 0$ .

Імовірність безвідмовної роботи ДКРЗКР відповідно до [15] запропоновано визначати за формулою:

$$P_n = \exp(-\lambda_e t), \quad (12)$$

де  $\lambda_e$  - інтенсивність виходу з ладу ДКРЗКР, год<sup>-1</sup>;

$t$  - час напрацювання ДКРЗКР, год.

Інтенсивність виходу з ладу визначають [15] статистично за формулою:

$$\lambda_e = \frac{1}{t_e}, \quad (13)$$

де  $t_e$  - час напрацювання до відмови ДКРЗКР, год.

Таким чином, удосконалена математична модель, на відміну від існуючих, додатково враховує показники надійності пошукового обладнання та базової машини ДКРЗКР, що дозволяє підвищити достовірність результатів розрахунку ймовірності виявлення ВВП радіохвильовим методом. Зазначений підхід можливо використати і для обрахунку ймовірності виявлення ВВП пошуковим обладнанням, які працюють на інших методах виявлення ВВП.

**Висновки.** В умовах глобального забруднення території України ВВП на сьогоднішній день пріоритетним шляхом забезпечення надійності і безпеки розмінування є пошук нових методів виявлення ВВП та удосконалення існуючих. Технології пошуку та виявлення ВВП з метою підвищення безпеки особового складу повинні поєднуватися з безпілотними системами.

В роботі на основі проведеного аналізу запропоновано підхід щодо удосконалення математичних моделей ймовірності виявлення ВВП, який, на відміну від існуючих, враховує показники надійності пошукового обладнання та рухомої платформи, що дозволить в подальшому уточнити вимоги до ДКРЗКР.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. General Valery Zaluzhny admits the war is at a stalemate. Ukraine's commander-in-chief on the breakthrough he needs to beat Russia URL: Ukraine's commander-in-chief on the breakthrough he needs to beat Russia (economist.com) (дата звернення: 10.05.2024).
2. Горбулін В.П. Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник НАН України*. 2022. №2. С. 3-13. <https://doi.org/10.15407/vism2022.02.003>. (дата звернення: 10.05.2024).
3. Landminen faktenblatt. *Faktenblatt\_2023\_Final.pdf* (handicap-international.de) (дата звернення: 10.05.2024).
4. Landmine Monitor 2023 [EN/AR] – World. *Landmine Monitor 2023 [EN/AR] - World | ReliefWeb*. (дата звернення: 10.05.2024).
5. Кривцун В.І, Ляшенко В.А. Теоретичні підходи щодо вибору методів виявлення вибухонебезпечних предметів в середовищах, що їх приховують, переваги та недоліки. / Збірник наукових праць ДНДІ ВС ОВТ. - Черкаси: ДНДІ ВС ОВТ, 2024. - №1(19). С. 81-91
6. Щербаков Г.Н. Новые методы обнаружения скрытых объектов: монография / Г.Н. Щербаков. - М.: ООО Эльф ИПР, 2011. - 503 с.
7. Щербаков Г.Н. Обнаружение скрытых объектов для гуманитарного разминирования, криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-информ, 2004. 438 с.
8. Денисенко А.М. Математическая модель обнаружения взрывоопасных предметов индукционным методом // Артиллерийское и стрелковое вооружение. - К., 2007. № 4. С. 19 - 23.

9. Денисенко О.М., Мацюк С.В. Математична модель виявлення вибухонебезпечних предметів пошуковим пристроєм з радіохвильовим способом, встановленим на легких броньованих машинах // Збірник наукових праць / Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького. - Хмельницький: НАДПСУ, № 52. 2010. С. 54-53.

10. Коцюруба В.І. Моделювання процесу пошуку і виявлення ВВП радіолокаційним методом / В.І. Коцюруба // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки і оборони. – К.: НУОУ, 2015. - № 2(23). - С. 65-69.

11. Коцюруба В. І. Удосконалена математична модель виявлення вибухонебезпечних предметів радіохвильовим методом / В. І. Коцюруба, О. М. Гусяков // Наука і техніка Повітряних Сил. - Харків: ХУПС, 2013. - № 1 (10). С. 163 - 166.

12. Коцюруба В.І. Обґрунтування раціональної комбінації методів виявлення ВВП для пошукових пристроїв РТК розмінування / В.І. Коцюруба, М.О. Шишанов, І.П. Даценко, О.М. Гусяков, С.М. Гімбер // Збірник наукових праць Центрального науково-дослідного інституту озброєння і військової техніки Збройних Сил України. - К.: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2015. - № 4(59). С. 179-186.

13. Марков В.А. Поиск, обнаружение и обезвреживание взрывоопасных предметов / В.А. Марков, И.В. Марков, Б.В. Прибылов // Оборонная техника. М.: № 3-4, 2007 С. 97–103.

14. Гусяков О.М. Вихрострумний пристрій з базою даних образів для ідентифікації типів металів прихованих об'єктів / А.О. Абрамович, В.О. Піддубний, О.М. Гусяков // Озброєння та військова техніка. К: ЦНДІ ОВТ ЗСУ, 2017. № 3 (15). С. 51-56

15. Бирков П.В. Обеспечение надёжности машин инженерного вооружения при эксплуатации. - М.: Воениздат, 1985. - 280 с.

#### REFERENCES:

1. General Valery Zaluzhny admits the war is at a stalemate. Ukraine's commander-in-chief on the breakthrough he needs to beat Russia URL: Ukraine's commander-in-chief on the breakthrough he needs to beat Russia (economist.com) (data zvernennya: 10.05.2024).

2. Horbulin V.P. Svitova hlobal'na problema rozminuvannya: ukrayins'kyy vektor. Visnyk NAN Ukrainy. 2022. №2. S. 3-13. <https://doi.org/10.15407/vsn2022.02.003>. (data zvernennya: 10.05.2024).

3. Landminen faktenblatt. Faktenblatt\_2023\_Final.pdf (handicap-international.de) (data zvernennya: 10.05.2024).

4. Landmine Monitor 2023 [EN/AR] – World. Landmine Monitor 2023 [EN/AR] - World | ReliefWeb. (data zvernennya: 10.05.2024).

5. Kryvtsun V.I, Lyashenko V.A. Teoretychni pidkhody shchodo vyboru metodiv vvyavleniya vybukhonebezpechnykh predmetiv v seredovyshchakh, shcho yikh prykhovuyut', perevahy ta nedoliky. / Zbirnyk naukovykh prats' DNDI VS OVT. - Cherkasy: DNDI VS OVT, 2024. - №1(19). S. 81-91

6. Shcherbakov G.N. Novyye metody obnaruzheniya skrytykh ob'yektov: monografiya / G.N. Shcherbakov. - M.: OOO El'f IPR, 2011. - 503 s.

7. Shcherbakov G.N. Obnaruzheniye skrytykh ob'yektov - dlya gumanitarnogo razminirovaniya, kriminalistiki, arkhologii, stroitel'stva i bor'by s terrorizmom. - M.: Arbat-inform, 2004. - 438 s.

8. Denisenko A.M. Matematicheskaya model' obnaruzheniya vzryvoopasnykh predmetov induktsionnym metodom // Artilleriyskoye i strelkovoye vooruzheniye. - K., 2007. № 4. S. 19 - 23.

9. Denysenko O.M., Matsyuk S.V. Matematychna model' vvyavleniya vybukhonebezpechnykh predmetiv poshukovym prystroyem z radiokhvylovym sposobom, vstanovlenym na lehkykh bron'ovanykh mashynakh // Zbirnyk naukovykh prats' / Natsional'na akademiya Derzhavnoyi prykordonnoyi sluzhby Ukrainy imeni Bohdana Khmel'nyts'koho. - Khmel'nyts'kyu: NADPSU, № 52. 2010. S. 54-53.

10. Kotsyuruba V.I. Modelyuvannya protsesu poshuku i vvyavleniya VNP radiolokatsiynym metodom / V.I. Kotsyuruba // Sychasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky i oborony. – К.: NUOU, 2015. - № 2(23). - С. 65-69.

11. Kotsyuruba V. I. Udoskonalena matematychna model' vvyavleniya vybukhonebezpechnykh predmetiv radiokhvylovym metodom / V. I. Kotsyuruba, O. M. Huslyakov // Nauka i tekhnika Povitryanykh Syl. - Khar'kiv: KHUPS, 2013. - № 1 (10). S. 163 - 166.

12. Kotsyuruba V.I. Obgruntuvannya ratsional'noyi kombinatsiyi metodiv vvyavleniya VNP dlya poshukovykh prystroyiv RTK rozminuvannya / V.I. Kotsyuruba, M.O. Shyshanov, I.P. Datsenko, O.M. Huslyakov, S.M. Himber // Zbirnyk naukovykh prats' Tsentral'noho nauково-doslidnoho instytutu ozbroynennya i viys'kovoyi tekhniky Zbroynykh Syl Ukrainy. - K.: TSNDI OVT ZSU, 2015. - № 4(59). S. 179-186.

13. Markov V.A. Poysk, obnaruzheniye y obezvrezhyvanye vzryvoopasnykh predmetov / V.A. Markov, Y.V. Markov, B.V. Prybylov // Oboronnaya tekhnika. M.: № 3-4, 2007 S. 97–103.

14. Huslyakov O.M. Vykhostrumovyy prystriy z bazoyu danykh obraziv dlya identyfikatsiyi typiv metaliv prykhovanykh ob"yektiv / A.O. Abramovych, V.O. Piddubnyy, O.M. Huslyakov // Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika. K: TSNDI OVT ZSU, 2017. № 3 (15). S. 51-56

15. Byrkov P.V. Obespechenye nadëzhnosti mashyn ynzhenernoho vooruzhenyya pry éksploatatsyy. - M.: Voennydat, 1985. - 280 s.

**Ph.D. Kryvtun V., Doc. Sci.Tech. Kotsiuruba V., Stanislavov V.**

### **IMPROVEMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF DETECTION OF EXPLOSIVE OBJECTS BY ELECTROMAGNETIC METHODS**

*One of the negative consequences of warfare is the contamination of territories with explosive ordnance. Due to the significant contamination of the territories of dozens of countries with explosive objects, the issue of guaranteed demining has become a global problem. Ukraine is no exception, as it has become the most mined country in the world as a result of Russia's war against Ukraine. The most difficult task of demining is to find and detect explosive objects in the environments that cover them. In these conditions, methods and ways to guarantee the detection of explosive objects are being searched for. One of these ways is the development and implementation of unmanned demining systems.*

*The paper presents the results of theoretical research on improving the mathematical model of detecting explosive objects. The main stages of the demining process are considered. An analysis of research related to demining processes, in particular the search and detection of explosive objects, is carried out. Based on the results of the analysis of existing research in this subject area, ways to improve mathematical models of detection of explosive objects are identified - taking into account the reliability of search elements and a mobile platform. An approach to improving the mathematical models for determining the probability of detecting explosive objects is proposed on the example of search elements with a radio wave method of detecting explosive objects. It is proposed to use this approach to determine the probability of detecting explosive objects of remotely controlled (robotic) demining means (complexes), the search elements of which work with the use of other electromagnetic methods of search and detection of explosive objects.*

*Keywords: explosive objects, search element, detection methods, ground unmanned demining systems, reliability.*

