

*Володимир Іванович Коцюруба (канд. військ. наук, с.н.с., доцент)*

*Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна*

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШУКУ ТА ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

*На підґрунті аналізу існуючих підходів щодо моделювання процесів розмінування, зокрема, використання електромагнітних методів пошуку і виявлення рукотворних предметів в укриваючих середовищах (грунт, сніг, вода тощо), запропоновано удосконалену математичну модель пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів радіолокаційним методом, яка, на відміну від існуючих, враховує: параметри зони гарантованого виявлення вибухонебезпечних предметів (поняття введене вперше) на заданих глибинах їх залягання в укриваючих середовищах, характеристики діаграми спрямованості електромагнітного поля під час обґрунтування вимог до засобів пошуку на рухомій базі та залежність потрібного кута спрямованості антени від максимальної відстані виявлення вибухонебезпечних предметів радіолокаційним методом. Крім того, встановлена залежність між шириною головного променя діаграми спрямованості антени на рівні 0,5 від її максимальної потужності та обґрунтованими параметрами зони гарантованого виявлення вибухонебезпечних предметів. Запропоновані удосконалення математичної моделі та послідовності проведення розрахунків дозволять підвищити точність результатів моделювання процесу пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів в укриваючих середовищах під час обґрунтування вимог до засобів розмінування даного типу.*

**Ключові слова:** математична модель; вибухонебезпечний предмет; радіолокаційний метод виявлення; діаграма спрямованості; зона гарантованого виявлення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Аналіз результатів збройних протистоянь останніх років показав наявність стійкої тенденції зміщення пріоритетів у бік асиметричних дій. За таких умов, поряд із застосуванням авіаційних, артилерійських боєприпасів досить високу ефективність показали інженерні міни та різноманітні саморобні вибухові пристрої. Загальна риса визначених боєприпасів щодо можливості нанесення ураження ними як особовому складу, озброєнню та військовій техніці ворогуючих сторін, так й мирному населенню, дозволяє їх віднести до вибухонебезпечних предметів (ВНП) [1]. Виявлення ВНП на сьогоднішній день й є найбільш складною проблемою процесу розмінування місцевості й об'єктів, що підтверджується досвідом подій на сході нашої країни.

З усіх відомих методів виявлення відносно невеликих рукотворних об'єктів радіолокаційний метод є одним із найбільш перспективних [2, 3]. Безперечно враховуючі те, що завчасно не можливо точно вказати який предмет буде виявлено, у якому саме місці та який склад прошарку укриваючого середовища буде мати місце, можна стверджувати, що процес виявлення ВНП буде носити стохастичний характер. При цьому, досить важливим під час моделювання визначеного процесу буде врахування найбільш вагомих факторів, які відображають специфіку радіолокаційного методу зондування під час пошуку ВНП.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз публікацій [2-7] показав, що дослідженню

ефективності використання пошукових пристроїв із електромагнітними методами пошуку приділялась достатня увага. Однак, предметна сторона для різних досліджень мала різну спрямованість. Так у [2, 3] увага приділялась різним методам виявлення рукотворних об'єктів в укриваючих середовищах. Радіолокаційний метод розглядався з боку теоретичних залежностей: між величиною сигналів, які приймаються, та глибиною залягання об'єктів пошуку; впливу частоти та поляризації СВЧ поля на ефективну площу розсіювання металевих об'єктів. Результати досліджень, які наведені в [4-6], присвячені висвітленню моделей виявлення ВНП індукційним та радіохвильовим методом. Безперечно останній є різновидом радіолокаційного методу зондування. Але різниця характеристик розповсюдження електромагнітних хвиль та специфіка використання визначених методів вимагає проведення додаткового дослідження. В [7] запропонована авторська математична модель виявлення ВНП пошуковим пристроєм із застосуванням радіолокаційного методу, з можливістю встановлення пристрою на легких броньованих засобах. Поряд із використанням імовірнісного підходу та врахуванням достатньої кількості факторів запропонована модель має низку обмежень. Так запропонована модель [7] не в повному обсязі враховує параметри та характеристики діаграми спрямованості головного пелюстка електромагнітного поля, що утворюється розкритом антени; не дозволяє встановити залежність потрібного кута спрямованості антени

до нормалі від відстані виявлення вибухонебезпечних предметів радіолокаційним методом.

Отже існуючі науково-методичні підходи та математичні моделі [2-7] не дають повної відповіді на низку суттєвих проблемних питань, які характеризують специфіку здійснення пошуку та виявлення ВВП радіолокаційним методом. В свою чергу такий стан питання природно призводить до зниження точності результатів моделювання процесу пошуку та виявлення ВВП в укриваючих середовищах під час обґрунтування вимог до засобів розмінування даного типу.

Ці обмеження викликали потребу удосконалення існуючих підходів щодо моделювання процесу пошуку та виявлення вибухонебезпечних і інших рукотворних предметів радіолокаційним методом.

**Мета статті.** Враховуючи це **метою статті** є висвітлення удосконаленої математичної моделі пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів радіолокаційним методом.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Розрахунок імовірності виявлення ВВП радіолокаційним методом здійснюється за формулою [6]

$$P_v = P_{\pi} \cdot P_{v/\pi}, \quad (1)$$

де  $P_{\pi}$ ,  $P_{v/\pi}$  – ймовірності попадання та виявлення при умові попадання ВВП в зону дії пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення відповідно.

Імовірність попадання  $P_{\pi}$  ВВП в зону дії пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення за даними [6] визначається за експоненційним законом розподілу. Для зменшення обсягу інформації, що розглядається у статті, умовно приймемо  $P_{\pi} = 1$ . Тобто ВВП з максимальною ймовірністю попаде в зону дії пошукового пристрою. Більше уваги привернемо другому показнику  $P_{v/\pi}$  ймовірності виявлення при умові попадання ВВП в зону дії пошукового пристрою та параметрам процесу виявлення ВВП радіолокаційним методом.

Вихідними умовами для моделювання є

$$d_{\min} \geq s_{\Gamma} \text{ або } d_{\min} \geq l_{\text{б}}; \quad t_{\text{мрл}} \geq t_{\text{рл}}, \quad (2)$$

де  $d_{\min}$  – мінімальна дальність виявлення ВВП пошуковим пристроєм радіолокаційним методом, м;  $s_{\Gamma}$  – гальмівний шлях, який пройде транспортний засіб після одержання сигналу про наявність ВВП, м;  $l_{\text{б}}$  – безпечна відстань, на якій випадкове спрацювання ВВП не призведе до виходу з ладу транспортного засобу та елементів пошукового обладнання, м;  $t_{\text{мрл}}$  – час знаходження ВВП у зоні дії пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення, с;  $t_{\text{рл}}$  – час спрацювання пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення, с.

Для визначення мінімально допустимого наближення до транспортного засобу межі виявлення ВВП, на відміну від [6], із використанням перших двох умов виразу (2) введемо правило

$$d_{\min} = \max\{s_{\Gamma}; l_{\text{б}}\}, \quad (3)$$

згідно з яким межа мінімального наближення ВВП, який має бути виявленим, не повинне бути менш ніж найбільше з двох параметрів.

Виходячи із останньої умови виразу (2) визначення відстані, яку пройде транспортний засіб за час впливу на ділянку місцевості електромагнітних полем, за протяжністю повинна бути

$$l_{\text{рл}} \geq t_{\text{рл}} \cdot V, \text{ м}, \quad (4)$$

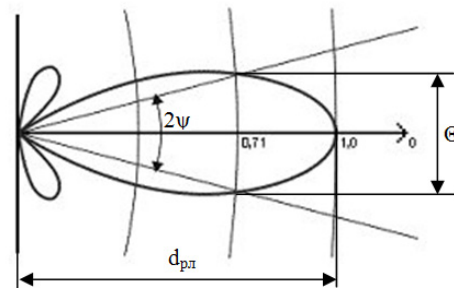
де  $V$  – швидкість руху транспортного засобу з пошуковим пристроєм, м/с.

Потрібна ширина пошуку згідно [6] повинна бути

$$b_{\text{рл}} = 1,3b_{\text{м}}, \text{ м}, \quad (5)$$

де  $b_{\text{м}}$  – ширина базового шасі транспортного засобу, на який встановлений пошуковий пристрій, м.

Основним припущенням в роботі [6], яке приводить до збільшення похибки під час проведення розрахунків, це представлення радіолокаційного поля у вигляді рівнобічного трикутника з кутом  $2\psi$  та основою, на віддаленні якої дальня межа виявлення  $d_{\max} = d_{\text{рл}}$  (рис. 1). Згідно [6] вважається, що саме там буде найширше місце зони пошуку.



**Рис. 1. Діаграма спрямованості радіолокаційного електромагнітного поля, яке формує розкрив антени, та її основні характеристики**

Але якщо звернути увагу (рис. 1) на форму та основні параметри дійсної діаграми спрямованості радіолокаційного електромагнітного поля, яка наведена за відомостями [7], то віддалення найширшого місця співпадає з розміщення ширини  $\Theta$  головного променя діаграми спрямованості на рівні 0,5 від її максимального значення за потужністю.

При цьому, припущення щодо розташування  $d_{\max}$  на відстані  $d_{\text{рл}}$  веде до того, що  $t_{\text{мрл}} \neq \text{const}$  по всій ширині зони пошуку. Отже, якщо задати умови, при яких на віддаленні по осі прямолинійного руху транспортного засобу з

пошуковим пристроєм  $d_{рл} : t_{мрл} = t_{рл}$ , що відповідає умові (2), то на інших (зміщених від центру в будь-який бік) паралелях на ширину  $b_{рл}$  значення  $t_{мрл} < t_{рл}$ . Це говорить про те, що міні з великою ймовірністю можуть бути пропущеними навіть й справно працюючим пошуковим пристроєм. Тому для виправлення встановленої

невідповідності із використанням розрахункової схеми, яка наведена на рис. 2, уточнімо основні формульні залежності.

У війсьній справі для пошуку та виявлення ВНП радіолокаційним методом, як правило, використовуються вузькоспрямовані рупорні антени, для яких  $\Theta_y = \Theta_x$ .

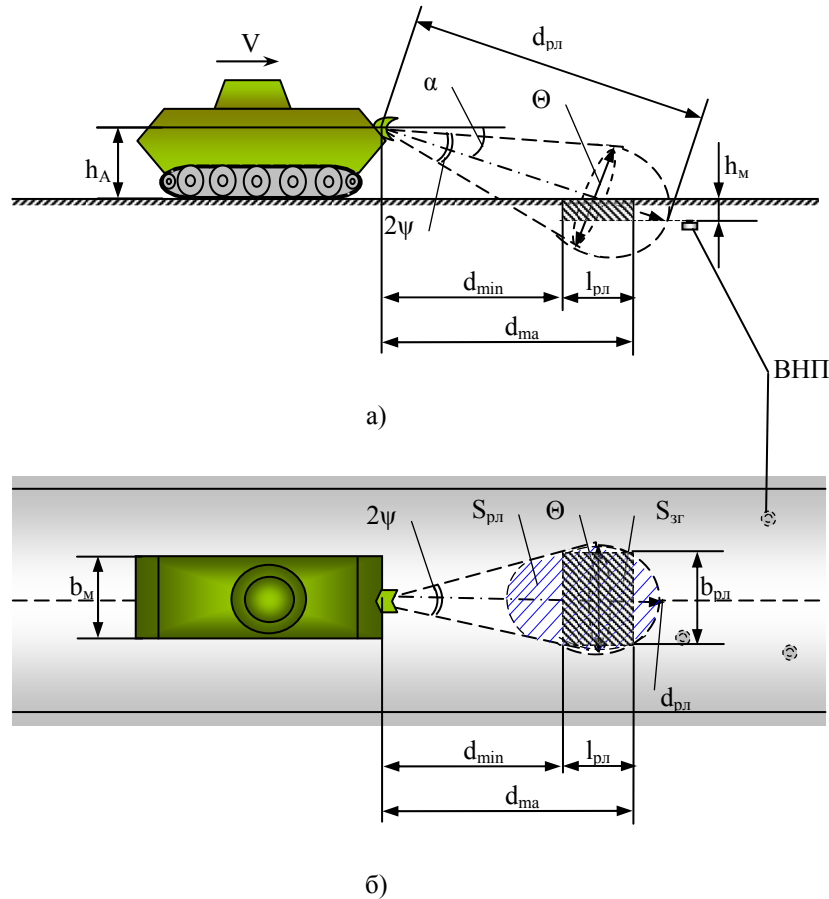


Рис. 2. Розрахункова схема пошуку та виявлення ВНП радіолокаційним методом

Антену розміщують (див. рис. 2а) на висоті  $h_A$  та нахилиють її в бік поверхні укриваючого середовища на величину кута  $\alpha$ , який має назву кут спрямованості антени від нормалі. Проведені дослідження показали, що найбільша ширина сліду електромагнітного поля на поверхні укриваючого середовища буде при такому спрямуванні пошукового пристрою, коли умовна лінія розташування характеристики  $\Theta$  діаграми спрямованості буде співпадати з поверхнею ґрунту.

Під час зондування підповерхневого прошарку радіолокаційним методом частка електромагнітних хвиль уходить у середину укриваючого середовища де, якщо не зустріне об'єкт, затухає. При зустрічі з об'єктом хвилі відбиваються та реєструються приймальною антеною.

Площа  $S_{рл}$  сліду електромагнітного поля на поверхні укриваючого середовища під час її зондування радіолокаційним методом (див. рис. 2б) може бути визначена приблизно, як площа основи

еліпсоїдного сегменту. Але й для уточнених параметрів ширини та довжини еліпсу зони зондування радіолокаційним методом добитися виконання умови (2) не можливо, тому що  $t_{мрл} \neq \text{const}$ .

Тому потрібно величину  $l_{рл}$  за умов  $t_{іде} = \text{const}$  по всій ширині смуги пошуку  $b_{рл}$  прийняти як мінімально потрібну протяжність зони виявлення ВНП на задану глибину  $h_m$  їх встановлення за один цикл дій пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення. Тоді площа місцевості, яка міститься в межах параметрів  $l_{рл}$  та  $b_{рл}$ , буде мати форму прямокутника з гарантовано однаковими просторово-часовими значеннями показників дії пошукового пристрою з радіолокаційним методом.

За таких умов введемо нове поняття “зона гарантованого виявлення ВНП радіолокаційним методом” (рис. 2б), під якою будемо розуміти прямокутну ділянку місцевості з площею

$$S_{згв} = I_{рл} \cdot b_{рл}, \text{ при } S_{згв} \subset S_{рл}, \quad (6)$$

яка повністю входить до площі  $S_{рл}$  сліду електромагнітного поля на поверхні укриваючого середовища під час її зондування радіолокаційним методом.

Тоді максимальне гарантоване віддалення (тильна межа зони гарантованого виявлення ВВП) згідно вимог будемо визначати як

$$d_{\max} = d_{\min} + I_{рл}. \quad (7)$$

Для визначених параметрів зони гарантованого виявлення  $I_{рл}$ ,  $b_{рл}$  та мінімально допустимого її наближення  $d_{\min}$  введемо формульні залежності для характеристик діаграми спрямованості електромагнітного поля, що формується розкритом антени.

Ширина  $\Theta$  головного променя діаграми спрямованості на рівні 0,5 від її максимальної потужності обґрунтовується за формулою

$$\Theta = b_{рл} \left[ 1 + \frac{I_{рл}}{2d_{\min}} \right], \quad (8)$$

а максимальне віддалення діаграми спрямованості

$$d_{рл} = \frac{d_{\min} + 0,5I_{рл}}{0,707}. \quad (9)$$

Кут розкриття діаграми спрямованості приймаємо рівним

$$2\psi = 2\arctg \frac{b_{рл}}{2d_{\min}}. \quad (10)$$

Із врахуванням віддалення точки прицілювання кут спрямованості антени пропонується визначати за формулою

$$\alpha = \arccos \frac{d_{\min} + 0,5I_{рл}}{h_A}. \quad (11)$$

Враховуючі наведені залежності формулу визначення імовірності виявлення ВВП, який попав в зону дії пошукового пристрою з радіолокаційним методом виявлення, залишаємо таку, як наведено в [6]. А саме

### Література

1. **Денисенко А. М.** Математическая модель поражения легких бронированных машин взрывоопасными предметами фугасного типа / А. М. Денисенко, В. Н. Зиркевич, А. М. Андриенко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К., 2007. – № 4. – С. 34–37.
2. **Щербаков Г. Н.** Обнаружение скрытых объектов. – М.: Арбат-Информ, 2004. – 144 с.
3. **Щербаков Г. Н.** Новые методы обнаружения скрытых объектов. – М.: ООО Эльф ИПР, 2011. – 503 с.
4. **Денисенко А. М.** Математическая модель обнаружения взрывоопасных предметов индукционным методом / А. М. Денисенко, В. И. Коцюруба // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – К., 2007. – № 4. – С. 19–23.
5. **Денисенко О. М.** Математична модель виявлення вибухонебезпечних предметів пошуковим пристроєм з радіохвильовим методом, встановленим на легких броньованих машинах / О. М. Денисенко, С. В. Мацюк //

$$P_{в/п} = \frac{1}{2} \left( \Phi \left( \frac{d_{\max} - \mu_{врл}}{\sigma_{врл} \cdot \sqrt{2}} \right) - \Phi \left( \frac{d_{\min} - \mu_{врл}}{\sigma_{врл} \cdot \sqrt{2}} \right) \right), \quad (12)$$

де  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  – максимальна та мінімальна дальності виявлення ВВП пошуковим пристроєм з радіолокаційним методом виявлення, м;  $\mu_{врл}$  – математичне очікування дальності виявлення ВВП пошуковим пристроєм з радіолокаційним методом виявлення, м;  $\sigma_{врл}$  – середньоквадратичне відхилення дальності виявлення ВВП, м.

Отже, розглянута в статті удосконалена математична модель пошуку та виявлення ВВП радіолокаційним методом, на відміну від існуючих, враховує: параметри зони гарантованого виявлення ВВП (поняття введене вперше) на заданих глибинах їх залягання в укриваючих середовищах, характеристики діаграми спрямованості антени по головному пелюстку під час обґрунтування вимог до засобів пошуку на рухомій базі та залежність потрібного кута спрямованості антени від максимальної відстані виявлення ВВП радіолокаційним методом. Крім того, встановлена залежність між шириною головного променя діаграми спрямованості на рівні 0,5 від її максимальної потужності та обґрунтованими параметрами зони гарантованого виявлення ВВП.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, запропоновані в статті удосконалення математичної моделі та послідовності здійснення моделювання дозволять підвищити точність результатів моделювання процесу пошуку та виявлення вибухонебезпечних предметів в укриваючих середовищах під час обґрунтування вимог до засобів розмінування даного типу. Напрямами подальших досліджень є удосконалення методичних підходів для дослідження процесів виявлення ВВП магнітометричним методом.

- Збірник наукових праць НАДПСУ ім. Б.Хмельницького. Серія: військові та технічні науки. – Хмельницький: Вид-во НАДПСУ, 2010. – № 52. – С. 54–57.
6. **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.
  7. **Денисенко О. М.** Математична модель виявлення вибухонебезпечних предметів пошуковим пристроєм з радіолокаційним методом виявлення, встановленим на легких броньованих машинах / О. М. Денисенко // Збірник наукових праць НУОУ: Труді університету. – К.: НУОУ, 2009. – № 3 (93). – С. 152–157.
  8. **Блюх П. В.** Радиоволны на земле и в космосе. – М.: Бюро Квантум, 2007. – 207 с.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

*Владимир Иванович Коцюруба (канд. воен. наук, с.н.с., доцент)*

*Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина*

На основании анализа существующих подходов до моделирования процессов разминирования, а именно, использования электромагнитных методов поиска и обнаружения рукотворных предметов в укрывающих средах (грунт, снег, вода и т. д.), предложена усовершенствованная математическая модель поиска и обнаружения взрывоопасных предметов радиолокационным методом, которая, в отличие от существующих, учитывает: параметры зоны гарантированного обнаружения взрывоопасных предметов (понятие введено впервые) на заданных глубинах их установки в укрывающих средах, характеристики диаграммы направленности антенны при обосновании требований к средствам поиска на подвижной базе и зависимость необходимого угла направленности антенны от максимального расстояния обнаружения взрывоопасных предметов радиолокационным методом. Кроме этого, установлена зависимость между шириной главного луча диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 от ее максимальной мощности и параметрами зоны гарантированного обнаружения взрывоопасных предметов. Предложенные усовершенствования математической модели и последовательность проведения расчетов позволят повысить точность результатов моделирования процесса поиска и обнаружения взрывоопасных предметов в укрывающих средах при обосновании требований к средствам разминирования данного типа.

**Ключевые слова:** математическая модель; взрывоопасный предмет; радиолокационный метод обнаружения; диаграмма направленности; зона гарантированного обнаружения.

**MODELING EXPLOSIVE ORDNANCE SEARCH AND DETECTION PROCEDURES BY RADAR TECHNIQUES**

*Volodymyr I. Kotsiuruba (Candidate of Military Sciences, Senior Research Fellow, Associate Professor)*

*National Defense University Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine*

Based on the analysis of existing approaches to the modeling of demining, namely, use of electromagnetic methods of prospecting and detecting man-made objects in harboring environments (soil, snow, water, etc.), was proposed an improved mathematical model of search and detection of explosives by a radar method, which, unlike existing ones, takes into account: the parameters of the zone of the guaranteed exposure to explosive hazards (the concept was introduced for the first time) at specified depths of their installation in covering environments, the characteristics of the directivity of the electromagnetic field in the justification of requirements to the means of searching on the movable base, and the dependence of the necessary angle of the antenna from the maximum distance of detection of explosive objects by the radar method. Besides, it was found the dependence between the width of the main beam of the directivity diagram at the level of 0.5 from its maximum power settings and the parameters of the zone of guaranteed detection of the explosive devices. The suggested improvements of the mathematical model and the sequence of calculations will increase the accuracy of simulation results of the process of search and detection of explosive devices in environments harboring in the justification of requirements for clearance of this type.

**Keywords:** mathematical model; explosive devices; radar detection method; radiation pattern; a detection zone of guaranteed.

**References**

1. Denisenko A. M., Zirkevich V. N., Andrienko A. M. (2007), Mathematical model of destruction of light armored vehicles explosive ordnance explosive type. [Matematicheskaya model porazheniya legkih bronirovannykh mashin vzryivoopasnyimi predmetami fugasnogo tipa], Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie, Kyiv, No.4, pp. 34-37.
2. Scherbakov G. N. (2004), Finding hidden objects. [Obnaruzhenie skryityih ob'ektov], Moscow Arbat-Inform, 144 p.
3. Scherbakov G. N. (2011), New methods of detecting hidden objects. [Novyye metody obnaruzheniya skryityih ob'ektov], Moscow, OOO Elf IPR, 503 p.
4. Denisenko A. M., Kotsiuruba V. I., (2007), A mathematical model of detection of explosive subjects induction method. [Matematicheskaya model obnaruzheniya vzryivoopasnykh predmetov induktsionnyim metodom], Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie, Kyiv, No. 4, pp. 19-23.
5. Denisenko O. M., Matsyuk S. V. (2010) Mathematical model of identifying explosive objects Appliance with radio wave method established in light armored vehicles. [Matematichna model viyavleniya vibuhonebehpechnih predmetiv poshukovim pristroem z radiohvilovim metodom, vstanovlenim na legkih bronovanih mashinah], Zbirnik naukovih prats NADPSU Im. B.Hmel'nitskogo. Seriya: viyskovi ta tehnicni nauki, Hmel'nitskiy: Vid-vo NADPSU, No. 52, pp. 54-57.
6. Kotsiuruba V. I., Guslyakov O. M. (2013), Advanced mathematical model Munitions radio wave detection method. [Udoskonalena matematichna model viyavleniya vibuhonebezpechnih predmetiv radiohvilovim metodom], Nauka i tehnika Povitryanih Sil, Harkiv: HUPS, No. 1 (10), pp. 163 - 166.
7. Denisenko O.M. (2011), Mathematical model of identifying explosive objects Appliance of detection by radar, mounted on light armored vehicles. [Matematichna model viyavleniya vibuhonebehpechnih predmetiv poshukovim pristroem z radiolokatsiyim metodom viyavleniya, vstanovlenim na legkih bronovanih mashinah], Zbirnik naukovih prats NUOU: Trudi universitetu, Kyiv, NUOU, No.52, pp. 54-57.
8. Blioh P. V. (2007), Radio waves on the ground and in space. [Radiovolnyi na zemle i v kosmose], Moscow: Byuro Kvantum, 207 p.

Отримано: 12.06.2015 р.