

УДК 623.454.38

*М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. відділу (ORCID 0000-0002-6960-6399)**О. В. Кулаков, к.т.н., доцент, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)**А. А. Карпов, ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)**О. Є. Басманов, д.т.н., професор, головн.н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)**Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)**Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна*

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ З ПОВЕРХНЕЮ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ

Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону, довільно падаючої на поверхню вибухонебезпечної речовини, як найпростішого безоболонкового вибухонебезпечного предмету. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Модель дозволяє чисельно оцінювати здатність вибухонебезпечних речовин відбивати та локалізувати енергію електромагнітних хвиль. Визначальними параметрами для цього є кут падіння електромагнітної хвилі та параметри вибухонебезпечної речовини. Застосування моделі дозволяє розраховувати коефіцієнти відбиття та переломлення потужності електромагнітного поля. Показано, що для реальних вибухових речовин з малими кутами діелектричних втрат цей параметр суттєво не впливає на взаємодію електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Найбільш придатними до дистанційного виявлення шляхом опромінення електромагнітною хвилею є вибухонебезпечні речовини з високим значенням відносної діелектричної проникності. Для вибухонебезпечних речовин з невеликим значенням відносної діелектричної проникності значна кількість електромагнітної енергії переломлюється через поверхню вибухонебезпечної речовини й ця енергія може бути поглинена вибухонебезпечною речовиною. Ступінь поглинання визначається величиною тангенсу кута діелектричних втрат – чим більше тангенс кута діелектричних втрат, тим більше енергії має бути поглинене. Для таких вибухонебезпечних речовин можливим є їх дистанційний підрив шляхом опромінювання електромагнітною хвилею. Вибухонебезпечні речовини з проміжним значенням відносної діелектричної проникності мають середні можливості щодо їх дистанційного виявлення та дистанційного підриву. Таким чином, побудована модель дає можливість оцінювати можливість дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів за допомогою опромінювання їх електромагнітною хвилею.

Ключові слова: вибухонебезпечна речовина, вибухонебезпечний предмет, діелектрична проникність, електродинамічна модель, електромагнітна хвиля, тангенс кута діелектричних втрат

1. Вступ

Останні науково-технічні розробки в оборонній промисловості призвели до збільшення різноманітності і летальності зброї. Мінна зброя має одну з найдавніших історій. Багато століть тому людство вперше почало використовувати енергію вибуху. Негативний вплив вибухонебезпечних речовин (ВР) та осколків оболонок вибухонебезпечних предметів (ВНП) використовується для знищення особового складу, пошкодження та виведення з ладу техніки. Як показує практика, під час військових конфліктів мінна зброя завдає шкоди не лише військовим підрозділам, але й цивільному населенню.

Внаслідок широкомасштабних військових дій за останні 10 років майже третина території України забруднена ВНП (мінами, боєприпасами, що не вибухнули, тощо). Територія, що потребує очищення від ВНП, охоплює понад 185 тис. км². Дороги та населені пункти розмінюються протягом усього року, але їх повне очищення займає багато часу. Аналіз досвіду використання ВНП у регіональних конфліктах і збройних конфліктах показує, що застосування наземних мін має такі особливості. Замість довгих мінних полів зазвичай встановлюються невеликі групи мін або окре-

мі міни. Групи мін або окремі міни часто встановлюються без документування. У таких випадках очищення від ВНП вимагає знань і проведення аналізу технічних компонентів ВНП та хімічних властивостей ВР.

Загальні правила безпеки необхідно вдосконалити, щоб полегшити роботу експертів з розмінування і підвищити їхню безпеку. Зрозуміло, що основним джерелом небезпеки від вибухової зброї є ВР, що лежать в її основі [1]. Оскільки вибухи відбуваються в умовах швидкої хімічної реакції, правила безпеки при застосуванні ВР визначаються насамперед їхніми фізико-хімічними властивостями.

Більшість країн світу намагаються розробити власну зброю з використанням ВР. Також різні терористичні організації виготовляють ВНП нелегально. Як наслідок, у світі існує широкий спектр ВНП з різними системами ініціювання. Відповідно існуючі методи пошуку ВНП, які орієнтуються на ВНП з металевими конструкційними елементами, показують низьку ефективність.

Таким чином, проблема недостатньої ефективності методів виявлення вибухонебезпечних предметів з малим вмістом металевих елементів є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Забезпечення безпеки різних об'єктів має особливе значення для будь-якої держави в сучасному світі. Це пов'язано з вирішенням загального завдання сталого розвитку держави й світової цивілізації в цілому. На даному етапі всі розвинені країни світу розробляють технології підвищення безпеки рятувальників [2]. Важливим показником безпеки є оцінка ризику людини в складних ситуаціях [3].

Найбільш ефективним підходом до забезпечення безпеки є передбачення наслідків надзвичайної ситуації [4] та характеру небезпек, з якими можуть зіткнутися рятувальники. Ліквідація наслідків вибуху вимагає величезних фінансових ресурсів і великої кількості персоналу [5]. Незважаючи на технологічний прогрес, розмінування залишається однією з найнебезпечніших сфер для рятувальних команд [6]. Протипіхотні міни є однією з основних причин жертв серед цивільного населення на територіях, що постраждали від конфлікту, і головною перешкодою для післявоєнної реконструкції [7].

Незважаючи на технологічний прогрес, досягнутий західними військовими у сфері розмінування та знешкодження ВНП у XXI столітті, більшість операцій з гуманітарного розмінування базуються на технологіях середини XX століття [8]. Жодна технологія не може виявити всі типи мін у всіх умовах навколишнього середовища. Розробка мультисенсорних систем виявлення необхідна для подолання обмежень окремих датчиків. Для підвищення безпеки рятувальників, які займаються розмінування, слід розробити нові схеми безпечної роботи рятувальників під час поводження з вибуховими речовинами.

За останні роки було розроблено і використовується багато видів ВР. Тому рятувальники повинні мати всебічні знання про ВР. У таких випадках застосовується принцип подібності і ВР класифікуються та оцінюються за схожими параметрами [9]. Однак незважаючи на широке розмаїття конструктивних особливостей боєприпасів, основну небезпеку становить сама ВР [10]. Втім, саме ініціювання вибухової реакції таких матеріалів намагаються запобігти всі рятувальні команди.

Найбільшого розповсюдження на сьогодні набув метод магнітної ідентифікації ВНП [11]. Цей метод використовують усі без винятку піротехнічні команди. Метод простий в технічній реалізації та має високі показники

ефективності. Однак крім явних переваг, він має два суттєві недоліки: мала дистанція ефективної дії та орієнтація на металеві конструкційні елементи. Дистанція ефективної дії менше 0,5 метрів призводить до низьких темпів обстеження територій великої площі. Поширення використання ВВП безоболонкового типу чи без металевих конструкційних елементів практично зводить нанівець всі можливості метод магнітної ідентифікації. Тому останніми роками поширилися інші методи виявлення неметалевих ВВП.

Перш за все, до неселективних методів розмінування можна віднести роботизовані комплекси механічного впливу на ґрунт [12]. Внаслідок жорсткого механічного впливу при використанні таких роботизованих комплексів відбувається підриг ВВП будь-якої конструкції. Однак такий метод також має ряд недоліків, основними з яких є низький темп розмінування, неможливість роботи по поверхні в обмежених умовах [13], неможливість виявлення та знешкодження ВВП глибокого закладання.

В останні роки із розвитком технологій штучного інтелекту розвитку набули методи візуального виявлення ВВП за допомогою камер високої розподільчої здатності, встановлених на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), та інтелектуальної системи обробки візуальних даних [14]. Основною перевагою цього методу є швидке обстеження територій великої площі. Однак існуючі інтелектуальні системи обробки зображення поки що є недосконалими, що призводить до низької ефективності виявлення ВВП. Крім того, даний метод має обмеження по пошуку прихованих ВВП.

Усунути ряд перелічених вище недоліків дозволяє метод радіоелектромагнітного сканування [15]. Такий метод має велику дистанцію ідентифікації, що дає змогу використовувати БПЛА, дозволяє виявлення прихованих ВВП без металевих конструкційних елементів. Але взаємодія електромагнітних хвиль з речовиною є складним фізичним процесом, на який впливає велика кількість факторів. Ці фактори можна розбити на два блоки: параметри електромагнітного поля та параметри ВР. Параметрами електромагнітного поля є потужність, поляризація та частота. Попередні дослідження виявили, що найбільш доцільно для вирішення зазначених питань використовувати електромагнітне випромінювання діапазону 1÷10 ГГц (НВЧ-діапазон) [16]. Основним параметром ВР, що визначає її взаємодію з електромагнітним полем, є її відносна діелектрична проникність. Однак, крім цього параметру, на ефективність використання цього методу впливає кут опромінення електромагнітними хвилями поверхні ВР. Моделі даного класу базуються на розв'язанні рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Однак реальних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнею ВР, як і б враховували всі зазначені вище параметри, не існує.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність моделі взаємодії електромагнітних хвиль з поверхнею вибухонебезпечних речовин при довільному куті їх падіння.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є побудова електродинамічної моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини, як найпростішого варіанту безоболонкового вибухонебезпечного предмету.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Математично описати взаємодію електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону з поверхнею вибухонебезпечної речовини при довільному куті падіння електромагнітної хвилі на цю поверхню.

2. Визначити коефіцієнти відбиття та переломлення електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону при взаємодії з поверхнею вибухонебезпечної речовини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є безоболонкові ВВП із ініціюючими бризантними вибуховими речовинами: як показано в роботі [17], всі ВР можна віднести до діелектриків двох різних класів. Зокрема, ВР гексоген ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$) та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) мають нульовий дипольний момент та нечутливі до електромагнітного випромінювання. Їх можна віднести до ідеальних діелектриків. ВР тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцинату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) мають суттєвий дипольний момент. Відповідно їх слід розглядати як діелектрики з малими втратами (дійсна частина відносної діелектричної проникності $\epsilon > 1$, тангенс кута діелектричних втрат $0 < \text{tg} \delta_\epsilon \ll 1$, дійсна частина відносної магнітної проникності $\mu = 1$, тангенс кута магнітних втрат $\text{tg} \delta_\mu = 0$).

Предметом дослідження є процес взаємодії (падіння, переломлення та відбиття) електромагнітної хвилі з поверхнею ВР для визначення частки енергії електромагнітного поля, що може бути локалізована всередині ВР.

Гіпотезою дослідження є припущення про наявність математичної залежності коефіцієнтів відбиття та поглинання електромагнітних хвиль від поверхні вибухової речовини в залежності від її фізико-хімічних властивостей та кута падіння хвиль. Така залежність дозволить оцінювати ефективність дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів при опромінюванні електромагнітною хвилею.

Для побудови електродинамічної моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею ВР застосовуємо метод аналітичного розв'язання рівнянь Максвелла з граничними умовами безперервності тангенційних електричної та магнітної компонент електромагнітного поля.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

5. Математичний опис взаємодії довільно падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини

Вектор густини потоку енергії електромагнітної хвилі (вектор Пойнтинга) $\dot{\Pi}$ (тут та далі крапка позначає комплексне число) розраховується через напруженості електричного \dot{E} та магнітного \dot{H} полів за формулою [18]:

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E} \times \dot{H}^*], \quad (1)$$

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{E}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{H}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \quad (2)$$

\dot{E}^+ та \dot{H}^+ – амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що проникає крізь речовину та поверхню поділу фаз; \dot{E}^- та \dot{H}^- – амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що відбивається від поверхні поділу фаз; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця; z – координата вздовж осі розповсюдження; $\dot{\gamma}$ – постійна розповсюдження, що визначається як:

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\mu}} = k - i \cdot \alpha, \quad (3)$$

де ω – кутова частота електромагнітної хвилі; $\dot{\epsilon} = \epsilon \cdot [1 - i \cdot \text{tg} \delta_\epsilon]$ – відносна діелектрична проникність ВР; $\dot{\mu} = \mu \cdot [1 - i \cdot \text{tg} \delta_\mu]$ – відносна магнітна проникність ВР; k – хвильове число (фазова постійна розповсюдження, що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані); α – коефіцієнт затухання хвилі.

k та α при $\text{tg} \delta_\mu = 0$ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_\epsilon} + 1)}, \\ \alpha &= \frac{\omega}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_\epsilon} - 1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

де c – швидкість світла.

Розглянемо падіння з повітря електромагнітної хвилі з хвильовим числом k_0 під кутом θ_0 до нормалі z до поверхні ВР з довільними електромагнітними властивостями. Після контакту хвилі з поверхнею частина енергії відбивається у вигляді хвилі з хвильовим числом k_1 під кутом θ_1 до нормалі z . Відповідно до закону Френеля $\theta_0 = \theta_1$. Так як всі ВР відносяться до діелектриків з різними діелектричними проникностями ϵ , то частина енергії електромагнітного випромінювання з хвильовим числом k_0 буде проходити всередину ВР у вигляді електромагнітної хвилі з хвильовим числом k_2 під кутом θ_2 до нормалі z (рис. 1).

Напрямок розповсюдження всіх хвиль знаходиться у площині xz , що відповідає рівності хвильового вектора \vec{k}_x для трьох хвиль:

$$k_0 = k_{1x} = k_{2x}, \quad (5)$$

де $k_0 = \frac{\omega}{c}$.

Проекція хвильових векторів на вісь z при $\mu_1 = \mu_2 = 1$ та куті падіння θ_0 виражається згідно (5) у вигляді:

$$\begin{cases} k_{1z} = -k_{0z} = \frac{\omega}{c} \cdot \cos \theta_0 \\ k_{2z} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot \dot{\epsilon} - k_{0x}^2} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2 \theta_0}. \end{cases} \quad (6)$$

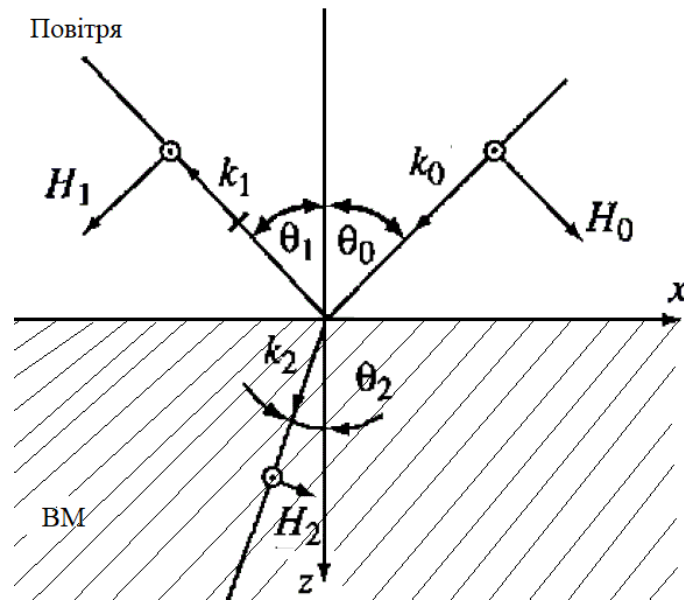


Рис. 1. Падіння електромагнітної хвилі на поверхню ВР

Причому хвильовий вектор k_0 для повітря є дійсною величиною, а хвильовий вектор \dot{k}_{2z} для переломленої ВР є комплексною величиною.

Так як повітря та ВР є діелектриками ($\mu_1 = \mu_2 = 1$), то отримуємо:

$$\theta_1 = \theta_0, \quad (7)$$

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}}}. \quad (8)$$

При цьому $\sin\theta_2$ є комплексною величиною (ВР є діелектриком з втратами), а $\sin\theta_0$ є дійсною величиною (електромагнітна хвиля падає з повітря). Співвідношення (7) та (8) для кутів падіння θ_0 , відбиття θ_1 та переломлення θ_2 відомі з геометричної оптики як закон Снелліуса [18].

Розглянемо два важливі випадки, коли електричне \vec{E}_0 поле перпендикулярне площині падіння xz або лежить у цій площині.

Якщо \vec{E}_0 перпендикулярно площині падіння (рис. 1), то граничні умови безперервності E_y та H_x приводять до формул Френеля:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \frac{k_{0z} - \dot{k}_{2z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0 \\ \dot{E}_2 &= \frac{2 \cdot k_{0z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{2 \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0. \end{aligned} \quad (9)$$

Якщо ВР є ідеальним діелектриком, то формули Френеля набувають наступного вигляду:

$$E_1 = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_0)}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot \cos \theta_0 \cdot \sin \theta_2}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0. \quad (10)$$

При розташуванні вектора \vec{E}_0 , падаючої хвилі в площині падіння формули Френеля видозмінюються [19]:

$$\dot{H}_1 = \frac{\dot{\epsilon} \cdot \cos \theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2 \theta_0}}{\dot{\epsilon} \cdot \cos \theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2 \theta_0}} \cdot H_0$$

$$\dot{H}_2 = \frac{2 \cdot \dot{\epsilon} \cdot \cos \theta_0}{\dot{\epsilon} \cdot \cos \theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2 \theta_0}} \cdot H_0, \quad (11)$$

та для умов прозорості ВР записуються як:

$$H_1 = \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_2)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_2)} \cdot H_0$$

$$H_2 = \frac{\sin(2 \cdot \theta_0)}{\sin(\theta_0 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_0 - \theta_2)} \cdot H_0. \quad (12)$$

Отримані вирази (7–12) дозволяють визначати співвідношення відбитої та пройшедшої всередину ВР енергії електромагнітних хвиль.

6. Визначення коефіцієнтів відбиття та переломлення електромагнітної хвилі

Для розв'язання поставленої в роботі мети необхідно отримати моделі для розрахунку коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T електромагнітної хвилі. Ці коефіцієнти є основними при розв'язанні задач пошуку та знешкодження ВВП, тому що здатність ВР до відбиття електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону впливає на ефективність його пошуку електронними методами. Здатність ВР до переломлення й поглинання електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону впливає на ефективність його дистанційного підриву шляхом його нагріву під впливом НВЧ-хвиль.

Коефіцієнт відбиття R визначається, як відношення середнього за часом потоку відбитої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі:

$$R = \frac{|\vec{E}_1|^2}{|\vec{E}_0|^2}. \quad (13)$$

При нормальному падінні плоскої хвилі на границю поділу середовищ ($\theta_0 = 0$) обидва випадки поляризації еквівалентні й тому:

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\dot{\epsilon}}}{1 + \sqrt{\dot{\epsilon}}} \right|^2. \quad (14)$$

Формула (14) справедлива для повітря й для поглинаючого середовища (ВР).

При похилому падінні плоскої хвилі на ідеальний діелектрик ($\text{tg}\delta_\epsilon = \text{tg}\delta_\mu = 0$) коефіцієнти відбиття можна визначити на основі (8–13) як:

$$R_\perp = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_0)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_0)}, \quad (15)$$

$$R_{||} = \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - \theta_0)}{\text{tg}^2(\theta_2 + \theta_0)}, \quad (16)$$

де індекс \perp відповідає поляризації хвилі перпендикулярно площині падіння, а індекс $||$ відзначає випадок, коли вектор \vec{E}_0 паралельний площині падіння.

Для перевірки працездатності розробленої моделі взаємодії падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею ВР проведено розрахунок залежності коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення:

$$T = 1 - R \quad (17)$$

від відносної діелектричної проникності ϵ та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ ВР при нормальному падінні електромагнітної хвилі на поверхню ВР ($\theta_0 = 0$).

На рис. 2 приведено залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ (в діапазоні $0 \div 0,1$) ВР, розраховану за формулою (14).

На рис. 3 приведено залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ (в діапазоні $0 \div 0,1$) ВР, розраховану за формулою (14) та (17).

На рис. 2 та рис. 3 додатково нанесено точки – коефіцієнти відбиття R та коефіцієнти переломлення T для найбільш розповсюджених ВР, параметри яких приведено в табл. 1.

Як видно з рис. 2 та рис. 3 величини коефіцієнтів відбиття та переломлення практично не залежать від зміни тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ в обраному діапазоні його зміни. Тому на рис. 4 представлена залежність коефіцієнту відбиття R від десяткового логарифму тангенса кута діелектричних втрат $\lg(\text{tg}\delta_\epsilon)$ ВР, а на рис. 5 – залежність коефіцієнту переломлення T від $\lg(\text{tg}\delta_\epsilon)$ відповідно в більш широкому діапазоні зміни $\text{tg}\delta_\epsilon$.

Табл. 1. Діелектричні властивості деяких ВР

№ з/п	ВР	ϵ	$\text{tg}\delta_\epsilon$
1	Пентаеритриттетранітрат	3,0	$2 \cdot 10^{-2}$
2	Тринітротолуол	2,9	$3 \cdot 10^{-2}$
3	Нітроглицерін	19,0	$3 \cdot 10^{-3}$
4	Нітрат аммонію	7,1	$7 \cdot 10^{-2}$

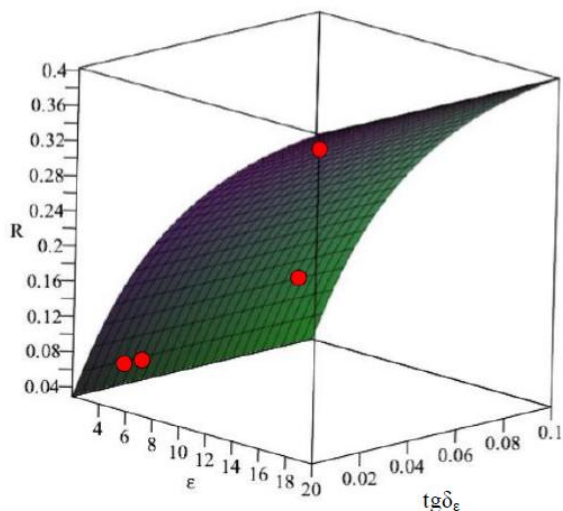


Рис. 2. Залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ (в діапазоні $0 \div 0,1$) ВР

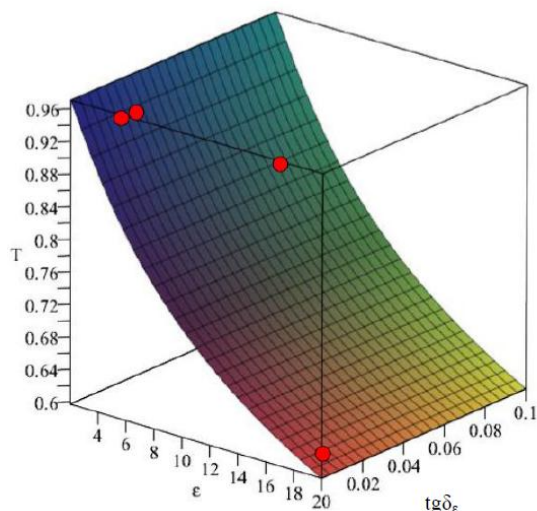


Рис. 3. Залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ (в діапазоні $0 \div 0,1$) ВР

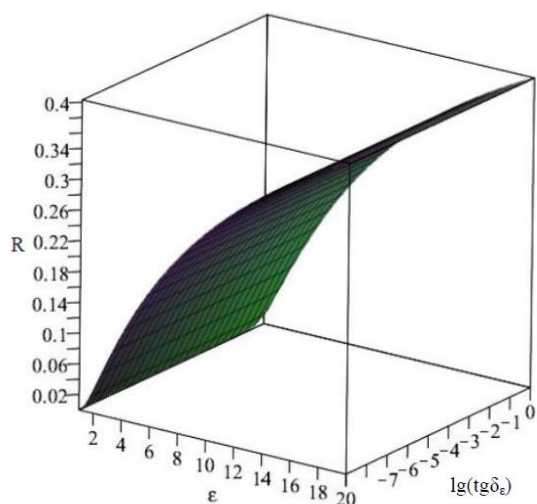


Рис. 4. Залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат $\lg(\text{tg}\delta_\epsilon)$ ВР

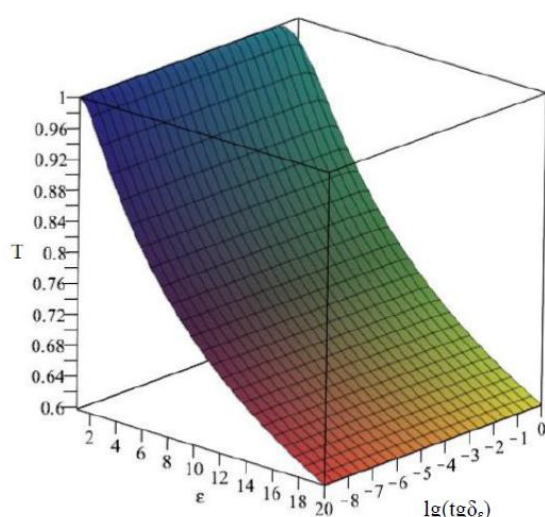


Рис. 5. Залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат $\lg(\text{tg}\delta_\epsilon)$ ВР

На рис. 6 приведено залежність коефіцієнту відбиття R_\perp електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) ВР, розраховану за формулою (15).

На рис. 7 приведено залежність коефіцієнту відбиття R_\parallel електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ϵ (в діапазоні $1 \div 20$) ВР, розраховану за формулою (16).

7. Обговорення результатів моделювання взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечного предмету

Найбільше значення коефіцієнту відбиття R має для ВР «нітроглицерин»,
Civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-6

найменшим – для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол». Це можна пояснити тим, що нітроглицерин маю найбільшу величину відносної діелектричної проникності ε у порівнянні з іншими ВР, що досліджувалися.

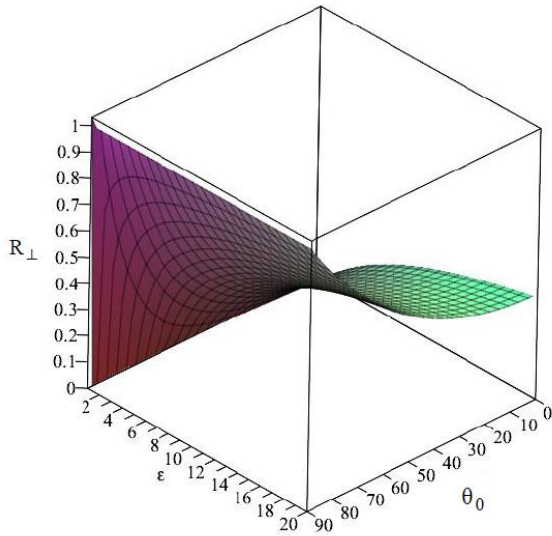


Рис. 6. Залежність коефіцієнту відбиття R_{\perp} електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε ВР

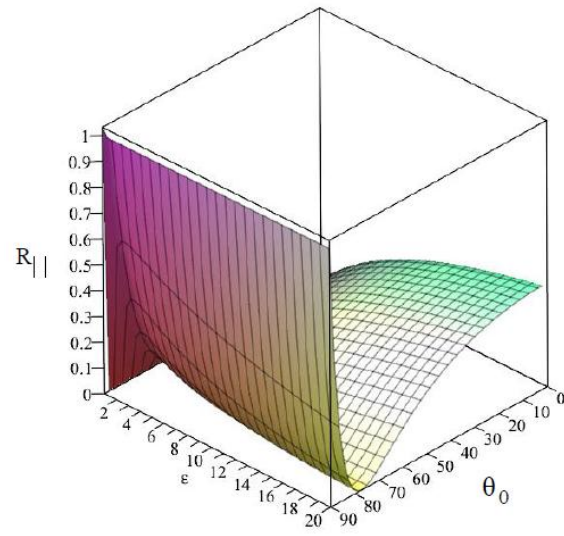


Рис. 7. Залежність коефіцієнту відбиття R_{\parallel} електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε ВР

З рис. 2 видно, що при збільшенні величини відносної діелектричної проникності в діапазоні $\varepsilon = 1 \div 20$ при фіксованій величині тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_{\varepsilon}$ ВМ спостерігається збільшення величини коефіцієнта відбиття R від значення $R=0,02$ до значення $R=0,4$ за законом, що є близьким до функції квадратного кореня.

Величина коефіцієнта відбиття R не залежить від кута діелектричних втрат в досліджуємому діапазоні його зміни ($\text{tg}\delta_{\varepsilon} = 0 \div 0,1$) при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності ε . Відповідно з рис. 3 видно, що при збільшенні величини відносної діелектричної проникності в діапазоні $\varepsilon = 1 \div 20$ при фіксованій величині тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_{\varepsilon}$ ВМ спостерігається зменшення величини коефіцієнта переломлення T від значення $R=0,6$ до значення $R=0,98$ за законом, що є близьким до гіперболічного. Величина коефіцієнта переломлення T не залежить від кута діелектричних втрат в досліджуємому діапазоні його зміни $\text{tg}\delta_{\varepsilon} = 0 \div 0,1$ при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності ε . Найбільше значення коефіцієнт переломлення T має для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол», найменше – для ВР «нітроглицерін», що також можна пояснити величиною відносної діелектричної проникності ε ВР.

З аналізу рис. 2 та рис. 3 випливає, що чим більше величина відносної діелектричної проникності ε ВР, тим більше коефіцієнт відбиття R та менше коефіцієнт переломлення T . Тобто чим більше величина відносної діелектричної проникності ε ВР, тим більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається й тим легше визначення місця знаходження ВР.

Рис. 4 та рис. 5 було навмисно побудовано для з'ясування впливу зміни в широкому діапазоні величини тангенсу кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$ в ВМ на величини коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T . Видно, що в діапазоні $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon = 10^{-9} \div 1$ зміна тангенса кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$ суттєво не впливає на величини коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T . З цього можна зробити припущення, що на локалізацію енергії електромагнітних хвиль всередині ВМ суттєвий вплив може оказати відбиття електромагнітної хвилі від поверхні, на якій знаходиться ВМП.

З рис. 6 та рис. 7 видно, що залежності коефіцієнту відбиття R_\perp електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння та коефіцієнту відбиття R_{\parallel} електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння θ_0 суттєво відрізняються при всіх кутах падіння θ_0 . В усьому діапазоні зміни кута падіння θ_0 крім $\theta_0 = 0$ та $\theta_0 = \pi/2$, $R_\perp > R_{\parallel}$. Коефіцієнт відбиття R_\perp монотонно зростає при збільшенні кута падіння θ_0 в усьому діапазоні змін ε . Коефіцієнт відбиття R_{\parallel} при збільшенні θ_0 , спочатку зменшується від 1 до 0 (при $\theta_0 = \operatorname{arctg}\sqrt{\varepsilon}$), а потім починає монотонно зростати.

Слід відмітити, що залежності, приведені на рис. 6 та рис. 7, побудовано у припущенні дійсності величини відносної діелектричної проникності $\dot{\varepsilon}$ ВР (тобто $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon = 0$ й ВР є середовищем без поглинання). Якщо ВР є середовищем з поглинанням, то $\dot{\varepsilon}$ є комплексною величиною й з формули (8) випливає, що синус кута переломлення $\sin\theta_2$ також має бути комплексною величиною. У цьому випадку коефіцієнт відбиття \dot{R}_\perp електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння та коефіцієнт відбиття \dot{R}_{\parallel} електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння (формули (15) та (16)) також стають комплексними величинами. З фізичної точки зору це означає, що амплітуда електромагнітної хвилі має зменшуватися за відповідним законом по мірі проникнення всередину ВР. Електромагнітна хвиля буде не тільки переломлюватися, а й поглинатися ВР, що не враховується в даній роботі однак є суттєво важливим для процесу деактивації вибухонебезпечних предметів. Подальші дослідження слід спрямувати для усунення цього недоліку.

8. Висновки

1. Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі, довільно падаючої на поверхню вибухонебезпечної речовини, як найпростішого безоболонкового вибухонебезпечного предмету. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Модель дозволяє чисельно оцінювати здатність вибухонебезпечних речовин відбивати та локалізувати всередині енергію електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону, що падають під довільним кутом на поверхню вибухонебезпечної речовини. В розробленій моделі визначальними параметрами є кут падіння електромагнітної хвилі, відносна діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат вибухонебезпечної речовини. Застосування створеної моделі дозволяє здійснювати розрахунок коефіцієнтів відбиття та переломлення по потужності електромагнітно-

го поля, що дає можливість використовувати отримані чисельні результати безпосередньо для оцінки ефективності дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів. Перевагою розробленої моделі є можливість визначення критичних кутів опромінення поверхні вибухової речовини, при яких відбувається повне відбиття електромагнітної хвилі.

2. Отримано формули для розрахунку коефіцієнтів переломлення та відбиття електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону при падінні на поверхню вибухонебезпечної речовини, що має властивості діелектрику. Розрахунки показали, що для реальних вибухових речовин з малими кутами діелектричних втрат ($\text{tg}\sigma_e < 0,1$) цей параметр суттєво не впливає на взаємодію електромагнітної хвилі частотою $1 \div 10$ ГГц з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Найбільш придатними до дистанційного виявлення шляхом опромінення електромагнітною хвилею є вибухонебезпечні речовини з високим значенням відносної діелектричної проникності. Наприклад, нітрогліцерин (відносна діелектрична проникність 19) відбиває 42 % енергії електромагнітних хвиль та переломлює 58 % енергії відповідно. Для вибухонебезпечних речовин з невеликим значенням відносної діелектричної проникності значна кількість електромагнітної енергії переломлюється через поверхню вибухонебезпечної речовини. Зокрема для пентаеритриттетранітрату (відносна діелектрична проникність 3,0) та тринітротолуолу (відносна діелектрична проникність 2,9) більше 96 % енергії електромагнітної хвилі переломлюється через поверхню й ця енергія може бути поглинена вибухонебезпечною речовиною. Ступінь поглинання визначається величиною тангенсу кута діелектричних втрат – чим більше тангенс кута діелектричних втрат, тим більше енергії має бути поглинене. Для таких вибухонебезпечних речовин можливим є їх дистанційний підрив шляхом опромінювання електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону. Вибухонебезпечні речовини з проміжним значенням відносної діелектричної проникності мають середні можливості щодо дистанційного виявлення та дистанційного підриву опроміненням електромагнітною хвилею. Наприклад нітрат амонію (відносна діелектрична проникність 7,1) відбиває 17 % енергії електромагнітної хвилі й переломлює крізь поверхню 83 % енергії відповідно.

Література

1. Kustov M., Karpov A., Harbuz S., Savchenko A. Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 143–154. doi:10.4028/p-0H8UnG
2. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., Meleshchenko R., Danchenko Yu. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. № 10(100). P. 22–29. doi:10.15587/1729-4061.2019.176579
3. Strategic toolkit for assessing risks: a comprehensive toolkit for all-hazards health emergency risk assessment. World Health Organization, 2021. 71 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036086>
4. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A. Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1. № 10(91). P. 50–55. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419

5. Smoliło J., Chmiela A. The mine liquidation processes in SRK S.A. in a cost approach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie*. 2021. Issue 153. P. 429. doi: 10.29119/1641-3466.2021.153.30
6. Tiutiunyk V., Ivanets H., Tolkunov I., Stetsyuk E. System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. № 1. P. 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7)
7. Ahmed I. Anti-personnel landmines (APLs): A socio-economic and humanitarian perspective. *International Journal of Physical and Social Sciences*. 2014. Vol. 4. Issue 4. P. 99–112. URL: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijpss&volume=4&issue=4&article=010>
8. Prem M., Purroy M. E., Vargas J. F. Landmines: the Local Effects of Demining. *TSE Working Paper*. 2022. № 1305. P. 108. URL: https://publications.ut-capitole.fr/id/eprint/44388/1/wp_tse_1305.pdf
9. Behera R., Biswal T., Panda R. B. Recent Progress in Explosives: A Brief Review. *Current Advances in Mechanical Engineering*. 2021. P. 305–315. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-4795-3_29
10. Zapata F., García-Ruiz C. Chemical classification of explosives. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 51. Issue 7. P. 656–673. doi: 10.1080/10408347.2020.1760783
11. Williams D. P., Myers V., Silvious M. S. Mine Classification With Imbalanced Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2009. Vol. 6. Issue 3. P. 528–532. doi: 10.1109/LGRS.2009.2021964
12. Shimoi N., Takita Y. Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot RAT-1. *ICCAS 2010*. P. 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836
13. Yoo L. S., Lee J. H., Lee Y. K., Jung S. K., Choi Y. Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*. 2021. Vol. 21(9). 3175. doi: 10.3390/s21093175
14. Ramezani M., Tafazoli S. Using artificial intelligence in mining excavators: automating routine operational decisions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021. Vol. 15. Issue 1. P. 6–11. doi: 10.1109/MIE.2020.2964053
15. Daniels D. A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging*. 2006. Vol. 7(3). P. 90–123. doi: 10.1007/s11220-006-0024-5
16. Wilson J., Gader P., Lee W., Frigui H., Ho K. A Large-Scale Systematic Evaluation Of Algorithms Using Ground Penetrating Radar For Landmine Detection And Discrimination. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*. 2007. Vol. 45. Issue 8. P. 2560–2572. doi: 10.1109/TGRS.2007.900993
17. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2023. № 1(37). С. 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1
18. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of continuous media*: translated by Sykes J. B., Bell J. S and Kearsley M. J. Pergamon press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 2013. 475 p.
19. Greiner W. *Classical Electrodynamics (Classical Theoretical Physics)*. Springer, Dordrecht (Holland), 1998. 566 p.

M. Kustov, DSc, Professor, Head of the Department
O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Department
A. Karpov, Adjunct
O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Department
Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE INTERACTION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE WITH THE SURFACE OF EXPLOSIVE MATERIAL

An electrodynamic model of the interaction of a microwave electromagnetic wave randomly falling on the surface of an explosive substance as a simple unencased explosive object is constructed. The model was created by solving Maxwell's equations with appropriate boundary conditions. The model allows for a numerical assessment of the ability of explosives to reflect and localise the energy of electromagnetic waves. The determining parameters for this are the angle of falling of the electromagnetic wave and the parameters of the explosive substance. The application of the model makes it possible to calculate the reflection and refraction coefficients of the electromagnetic field power. It has been shown that for real explosives with small dielectric loss angles, this parameter does not significantly affect the interaction of an electromagnetic wave with the surface of an explosive. The most suitable for remote detection by irradiation with an electromagnetic wave are explosives with a high value of relative permittivity. For explosive substances with a low value of the relative permittivity, a significant amount of electromagnetic energy is refracted through the surface of the explosive substance and this energy can be absorbed by the explosive substance. The degree of absorption is determined by the value of the dielectric loss tangent – the greater the dielectric loss tangent, the more energy must be absorbed. For such explosives, it is possible to detonate them remotely by irradiating them with an electromagnetic wave. Explosive substances with intermediate values of relative permittivity have medium possibilities for remote detection and remote detonation by electromagnetic wave irradiation. Thus, the developed model makes it possible to evaluate the possibility of remote detection and deactivation of explosive objects by irradiating them with an electromagnetic wave.

Keywords: dielectric constant, dielectric loss tangent, electrodynamic model, electromagnetic wave, explosive object, explosive material

References

1. Kustov, M., Karpov, A., Harbuz, S., Savchenko, A. (2023). Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. *Key Engineering Materials*, 952, 143–154. doi:10.4028/p-0H8UnG
2. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Yu. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 10(100), 22–29. doi:10.15587/1729-4061.2019.176579
3. Strategic toolkit for assessing risks: a comprehensive toolkit for all-hazards health emergency risk assessment. World Health Organization. 2021, 71. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036086>
4. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, 10(91), 50–55. doi:10.15587/1729-4061.2018.122419
5. Smoliło, J., Chmiela, A. (2021). The mine liquidation processes in SRK S.A. in a cost approach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie*, 153, 429. doi: 10.29119/1641-3466.2021.153.30
6. Tiutiunyk, V., Ivanets, H., Tolkunov, I., Stetsyuk, E. (2018). System approach

for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7)

7. Ahmed, I. (2014). Anti-personnel landmines (APLs): A socio-economic and humanitarian perspective. *International Journal of Physical and Social Sciences*, 4, 4, 99–112. Available at: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijpss&volume=4&issue=4&article=010>

8. Prem, M., Purroy, M. E., Vargas, J. F. (2022). Landmines: the Local Effects of Demining. TSE Working Paper, 1305, 108 Available at: https://publications.ut-capitole.fr/id/eprint/44388/1/wp_tse_1305.pdf

9. Behera, R., Biswal, T., Panda, R. (2021). Recent Progress in Explosives: A Brief Review. *Current Advances in Mechanical Engineering*, 305–315. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-4795-3_29

10. Zapata, F., García-Ruiz, C. (2021). Chemical classification of explosives. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 51, 7, 656–673. doi: 10.1080/10408347.2020.1760783

11. Williams, D. P., Myers, V., Silvious, M. S. Mine Classification With Imbalanced Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 6, 3, 528–532. doi: 10.1109/LGRS.2009.2021964

12. Shimoi, N., Takita, Y. (2010). Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot RAT-1. *ICCAS 2010*, 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836

13. Yoo, L. S., Lee, J. H., Lee, Y. K., Jung, S. K., Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*, 21(9), 3175. doi: 10.3390/s21093175

14. Ramezani, M., Tafazoli, S. (2021). Using artificial intelligence in mining excavators: automating routine operational decisions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 15, 1, 6–11. doi: 10.1109/MIE.2020.2964053

15. Daniels, D. (2006). A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging*, 7(3), 90–123. doi: 10.1007/s11220-006-0024-5

16. Wilson, J., Gader, P., Lee, W., Frigui, H., Ho, K. (2007). A Large-Scale Systematic Evaluation Of Algorithms Using Ground Penetrating Radar For Landmine Detection And Discrimination. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 45, 8, 2560–2572. doi: 10.1109/TGRS.2007.900993

17. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

18. Landau, L. D., Lifshitz, E. M. (2013). *Electrodynamics of continuous media*: translated by Sykes J. B., Bell J. S and Kearsley M. J. Pergamon press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 475.

19. Greiner, W. (1998). *Classical Electrodynamics (Classical Theoretical Physics)*. Springer, Dordrecht (Holland), 566.

Надійшла до редколегії: 04.03.2024

Прийнята до друку: 12.04.2024