

УДК 623.454.38

*А. А. Карпов, ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)**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)**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. Черкаси, Україна*

ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ З ПОВЕРХНЕЮ РЕАЛЬНОЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ

Розвинуті теоретичні основи ефективного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних речовин за допомогою електромагнітного випромінювання. Проблема виявлення вибухонебезпечних речовин є надзвичайно актуальною. Розвиток нових методів, заснованих на фізичних принципах взаємодії електромагнітного випромінювання з вибухонебезпечною речовиною, є перспективним напрямком досліджень. Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини, яка враховує кут падіння хвилі та її поляризацію. При побудові моделі були розв'язані рівняння Максвелла з граничними умовами на межі розділу повітря – вибухонебезпечна речовина. В якості об'єктів дослідження розглядалися вибухонебезпечні речовини з різними електромагнітними властивостями. Для розв'язання задачі було використано чисельне моделювання. Розраховано енергетичні коефіцієнти відбиття, переломлення та поглинання електромагнітного випромінювання вибухонебезпечною речовиною. Встановлено, що наслідки взаємодії електромагнітної хвилі з вибухонебезпечною речовиною залежать від кута її падіння. Оптимальний кут падіння для більшості досліджених вибухонебезпечних речовин знаходиться в діапазоні від 60 до 75 градусів. Для вибухонебезпечної речовини з малими діелектричними втратами вплив тангенса кута діелектричних втрат на уявну частину кута переломлення є незначним. Це свідчить про те, що для таких матеріалів основним результатом взаємодії є відбиття електромагнітної хвилі. Було показано, що енергетичний коефіцієнт переломлення має локальний екстремум (максимум) в діапазоні кутів падіння від 65 до 85 градусів. Енергетичний коефіцієнт відбиття для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією збільшується зі збільшенням дійсної частини відносної діелектричної проникності за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння менших за 60 градусів.

Ключові слова: вибухонебезпечна речовина, гуманітарне розмінування, діелектричні властивості, електромагнітне випромінювання, коефіцієнт відбиття, поляризація електромагнітної хвилі

1. Вступ

Гуманітарне розмінування в Україні є однією з найбільш нагальних проблем, що виникли внаслідок вторгнення Російської Федерації в Україну. Розмінування являє собою комплексне завдання, що зачіпає не тільки гуманітарні, а й економічні та соціальні аспекти життя країни. Існує декілька аспектів актуальності ефективного розмінування. Безпека громадян – міни і боєприпаси, що не розірвалися, становлять безпосередню загрозу життю і здоров'ю людей. Випадкові вибухи призводять до загибелі і травм мирних жителів, зокрема дітей. Відновлення економіки – розмінування є одним із перших кроків на шляху до відновлення сільськогосподарських угідь, інфраструктури та промисловості. Міни роблять величезні території непридатними для використання, що завдає значної шкоди економіці країни. Повернення людей – розмінування дає змогу людям повернутися до своїх домівок і відновити нормальне життя. Безпека є однією з основних умов для цього. Гуманітарна допомога – знешкодження мін необхідне для безпечної доставки гуманітарної допомоги в постраждалі райони. Екологічна безпека – міни та вибухонебезпечні речовини (ВР) забруднюють навколишнє середовище, що може призвести до довгострокових негативних екологічних наслідків.

Масштаби розмінування в Україні величезні. Міни розкидані по великих територіях, включаючи сільськогосподарські угіддя, ліси, населені пункти. Процес розмінування є тривалим і трудомістким, що вимагає значних ресурсів і висококваліфікованих фахівців.

Гуманітарне розмінування пов'язане з низкою складнощів, а саме:

- різноманітність мін і боєприпасів – в Україні використовується велика кількість різних типів мін і боєприпасів, що ускладнює процес їх виявлення та знешкодження;

- нестабільна обстановка – бойові дії, що тривають, створюють додаткові ризики для саперів;

- нестача ресурсів – для ефективного розмінування потрібні значні фінансові ресурси, обладнання та фахівці;

- мінімізація шкоди навколишньому середовищу – під час розмінування необхідно вживати заходів для мінімізації шкоди навколишньому середовищу.

Міжнародне співтовариство надає значну допомогу Україні у вирішенні проблеми розмінування. Багато країн і міжнародних організацій надають фінансову підтримку, обладнання та фахівців.

Таким чином, відсутність можливості швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасні методи розмінування можна розділити на механічні, фізичні, хімічні та біологічні. До механічних методів відноситься використання спеціальної техніки для виявлення та знешкодження мін. До них належать мінні трали, роботи-сапери, металодетектори та інші механічні пристрої [1]. Фізичні методи засновані на фізичному впливі на міни для їхньої детонації або знешкодження. Наприклад, використання інших вибухових речовин, електромагнітних імпульсів або термічного впливу [2]. Достатньо рідко використовуються хімічні речовини для виявлення або знешкодження мін. Наприклад, як індикатори вибухових речовин [3]. Використання тварин (зазвичай собак або щурів) для виявлення мін за запахом відноситься до біологічних методів [4]. Кожен з перелічених методів має свої переваги й недоліки. Звичайно для поєднання переваг декількох методів існують комбіновані методи.

Тенденціями розвитку усіх методів розмінування є автоматизація та роботизація, тобто прагнення до створення повністю автономних систем розмінування, здатних працювати в небезпечних умовах без участі людини. Це дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки процесу розмінування [5]. На теперішній час активного розвитку набули методи з використанням штучного інтелекту [6]. Розроблення алгоритмів машинного навчання для аналізу даних, отриманих із різних датчиків, та ухвалення рішень щодо класифікації об'єктів і вибору оптимальних дій дозволяють швидко обробляти великі масиви інформації. З метою зручного використання засобів виявлення та знешкодження ВР в польових умовах створюються компактні і легкі пристрої для розмінування [7]. Однак це призводить до суттєвого звуження їх функціоналу. Як видно з аналізу всі ці напрямки мають свої переваги та недоліки, тому актуальним залишається пошук нових матеріалів для створення мінних детекторів і знешкоджувальних пристроїв, а також розробка нових технологій для підвищення ефективності розмінування.

Основними проблемними питаннями на які слід спрямовувати увагу при розробці нових методів розмінування є розмаїття мін, які забруднюють територію України. Існує величезна кількість типів мін, що відрізняються за конструкцією, матеріалами та способами спрацьовування [8]. Це значно ускладнює процес їхнього виявлення та знешкодження. Звичайно вимоги військового використання вибухонебезпечних предметів обумовлюють максимальну скритність мін. Міни можуть бути ретельно замасковані, що ускладнює їх виявлення навіть за допомогою сучасних технологій.

Розмінування є складною і багатогранною проблемою, що вимагає комплексного підходу. Сучасні наукові дослідження дають змогу створювати дедалі ефективніші методи та технології для вирішення цього завдання [9]. Однак, незважаючи на досягнуті результати, проблема розмінування залишається актуальною і потребує подальших зусиль з боку науковців, інженерів та міжнародної спільноти.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначених вище проблем є електромагнітні методи розмінування, які дають змогу виявляти неметалеві компоненти мін і боєприпасів, що не розірвалися [10]. Наукові дослідження в цій сфері активно розвиваються, пропонуючи нові рішення і поліпшення.

Принцип роботи електромагнітних методів виявлення та знешкодження ВР заснований на тому, що електромагнітні датчики дають змогу виявити аномалії відбитого електромагнітного випромінювання й таким чином локалізувати місце їх знаходження. Однак, ґрунтові умови, наявність металевих предметів у ґрунті, а також інші фактори можуть спотворювати результати вимірювань [11]. Аналіз сигналів, отриманих з електромагнітних датчиків, вимагає високої кваліфікації фахівців. Електромагнітні методи в основному ефективні для виявлення мін, розташованих близько до поверхні.

Електромагнітні методи розмінування відіграють важливу роль у гарантуванні безпеки персоналу та є перспективним напрямом досліджень [12]. Незважаючи на наявні обмеження, вони продовжують удосконалюватися, і в найближчому майбутньому можна очікувати на появу нових, ще більш ефективних рішень.

Основні напрямки досліджень електромагнітних методів виявлення ВР мають бути направлені на створення більш чутливих і вибіркових датчиків, здатних розрізняти об'єкти різної форми і розміру [13]. Розробка алгоритмів для ефективного опрацювання сигналів, отриманих з датчиків, і виділення корисної інформації на тлі перешкод є особливо складним питанням.

Таким чином невирішеною частиною проблеми є відсутність математичної моделі процесу взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної ВР.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Математично описати процес взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини.

2. Перевірити працездатність розробленої моделі для довільних кутів падіння електромагнітної хвилі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є діелектричні властивості вибухових речовин та їх взаємодія з електромагнітними хвилями. На відміну від попередніх досліджень [10, 14] в якості поверхні взаємодії з електромагнітними хвилями розглядається поверхня реальної ВР (ВР, у якої тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\varepsilon \neq 0$). До таких небезпечних предметів відносяться безоболонкові міни та вибухонебезпечні предмети із малим вмістом металевих частин. Розглядається електромагнітна хвиля надвисокочастотного діапазону (0,1–10 ГГц) із ТЕ та ТМ-поляризацією. Предметом дослідження є процес взаємодії (проходження, поглинання, відбиття електромагнітної хвилі зі визначеними параметрами з поверхнею ВР. В якості показників взаємодії обрано коефіцієнти відбиття (R) та переломлення (T).

Висувається гіпотеза про існування кореляції між коефіцієнтами відбиття та переломлення електромагнітної хвилі на поверхні ВР та її параметрами. Це дозволить оцінити ефективність використання електромагнітного випромінювання для дистанційного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів.

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

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми MatLab.

5. Математичний опис процесу взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини

В роботі [14] для плоскої електромагнітної хвилі, що падає з повітря під довільним кутом на ВР (рис. 1), було отримано співвідношення (8):

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}},$$

де θ_0 – кут між напрямом падіння електромагнітної хвилі на ВР (хвильовим числом k_0 електромагнітної хвилі, що падає з повітря) та нормаллю до поверхні ВР (віссю z); θ_2 – кут між напрямом електромагнітної хвилі, що пройшла всередину ВР (хвильовим числом k_2 електромагнітної хвилі, що пройшла всередину ВР) та нормаллю до поверхні ВР (віссю z); $\varepsilon = \varepsilon \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon]$ – відносна діелектрична проникність ВР, що характеризує реальну ВР; ε – дійсна частина відносної діелектричної проникності реальної ВР; $\text{tg}\delta_\varepsilon$ – тангенс кута діелектричних втрат реальної ВР.

Звичайно розглядаються дві поляризації електромагнітної хвилі: горизонтальна (ТЕ-поляризація, електричне поле \vec{E}_0 перпендикулярне площині падіння xz (рис. 1) та вертикальна (ТМ-поляризація, електричне поле \vec{E}_0 лежить у площині падіння xz) [15].

В роботі [14] побудовано залежність коефіцієнту відбиття R_{TE} електромагнітної хвилі з ТЕ-поляризацією та залежність коефіцієнту відбиття R_{TM} електромагніт-

ної хвилі з ТМ-поляризацією від довільного кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі та відносної діелектричної проникності ε ідеальної ВР (при $\text{tg}\delta_\varepsilon=0$).

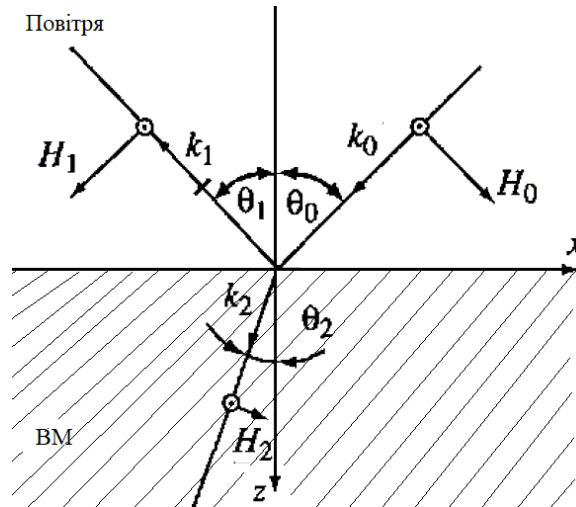


Рис. 1. Падіння електромагнітної хвилі на поверхню ВР

Не дослідженим залишився випадок падіння плоскої електромагнітної хвилі під довільним кутом на поверхню реальної ВР (ВР, у якій $\text{tg}\delta_\varepsilon \neq 0$). У цьому випадку $\sin\theta_0$ є дійсною величиною (плоска електромагнітна хвиля падає з повітря), а $\sin\theta_2$ буде комплексною величиною:

$$(\sin\theta_2) = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon]}}, \quad (1)$$

Виконуємо математичні перетворення:

$$(\sin\theta_2) = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{1 - i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon}} = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta_\varepsilon}} \cdot \sqrt{1 + i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon}$$

Перейдемо від алгебраїчної форми комплексного числа до тригонометричної:

$$1 + i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon = \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta_\varepsilon} \cdot [\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon)) + i \cdot \sin(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))].$$

Застосовуємо формулу Муавра:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + i \cdot \text{tg}\delta_\varepsilon} &= \sqrt{\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta_\varepsilon} \cdot [\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon)) + i \cdot \sin(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))]} = \\ &= \sqrt[4]{1 + \text{tg}^2\delta_\varepsilon} \cdot [\cos(\cos(\frac{\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))}{2})) + i \cdot \sin(\frac{\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))}{2})]. \end{aligned}$$

Отримуємо:

$$(\sin\theta_2) = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \sqrt[4]{1 + \text{tg}^2\delta_\varepsilon}} \cdot [\cos(\cos(\frac{\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))}{2})) + i \cdot \sin(\frac{\cos(\arctg(\text{tg}\delta_\varepsilon))}{2})],$$

$$\dot{\theta}_2 = \text{Re}[\arcsin(\theta_2)] + i \cdot \text{Im}[\arcsin(\theta_2)], \quad (2)$$

Для горизонтальної поляризації (ТЕ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття $\dot{\rho}_{\text{TE}}$ та переломлення $\dot{\tau}_{\text{TE}}$ [14]):

$$\dot{\rho}_{\text{TE}} = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}, \quad (3)$$

$$\dot{\tau}_{\text{TE}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}, \quad (4)$$

Для вертикальної поляризації (ТМ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття $\dot{\rho}_{\text{TM}}$ та переломлення $\dot{\tau}_{\text{TM}}$ [14]):

$$\dot{\rho}_{\text{TM}} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 - \cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}, \quad (5)$$

$$\dot{\tau}_{\text{TM}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}. \quad (6)$$

Енергетичний коефіцієнт відбиття R визначається, як відношення середнього за часом потоку відбитої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі та може бути розрахований за формулою:

$$R = |\dot{\rho}|^2. \quad (7)$$

Енергетичний коефіцієнт переломлення T визначається, як відношення середнього за часом потоку переломленої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі та може бути розрахований за формулою:

$$\dot{T} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{\tau}|^2. \quad (8)$$

Відповідно для горизонтальної поляризації (ТЕ-поляризації) електромагнітної хвилі:

$$R_{\text{TE}} = |\dot{\rho}_{\text{TE}}|^2, \quad (9)$$

$$\dot{T}_{\text{TE}} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{\tau}_{\text{TE}}|^2. \quad (10)$$

а для вертикальної поляризації (ТМ-поляризації) електромагнітної хвилі:

$$R_{\text{TM}} = |\dot{\rho}_{\text{TM}}|^2, \quad (11)$$

$$\dot{T}_{TM} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{t}_{TM}|^2. \quad (12)$$

Енергетичні коефіцієнти відбиття R_{TE} та R_{TM} є дійсними величинами.

Енергетичний коефіцієнт переломлення \dot{T}_{TE} та \dot{T}_{TM} для реальних ВР є комплексними величинами.

Видно, що при куті падіння $\theta_0 = 90^\circ$ амплітудні коефіцієнти переломлення $\dot{t}_{TE} = 0$ та $\dot{t}_{TM} = 0$. У цьому випадку енергетичні коефіцієнти переломлення відповідно також $\dot{T}_{TE} = 0$ та $\dot{T}_{TM} = 0$.

6. Перевірка працездатності розробленої моделі для довільних кутів падіння хвилі

На рис. 2 побудовано залежність дійсної частини кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($Re\dot{\theta}_2$) від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4). Діелектричні властивості ВР приведені в таблиці 1. На рис. 3 побудовано аналогічну залежність уявної частини кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($Im\dot{\theta}_2$) від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі на ВР. Для розрахунків використовувалися формули (1), (2).

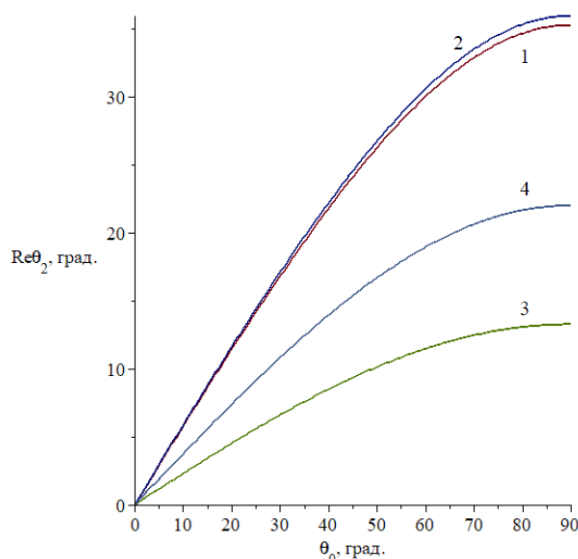


Рис. 2. Залежність $Re\dot{\theta}_2$ від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

Табл. 1. Діелектричні властивості деяких ВР

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

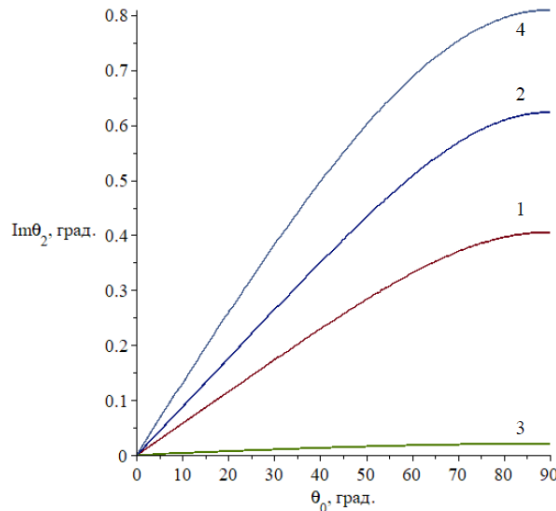


Рис. 3. Залежність $\text{Im}\theta_2$ від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

На рис. 4 по формулам (1), (3), (9) побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4). На рис. 5 по формулам (1), (5), (11) побудовано аналогічну залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією на ВР.

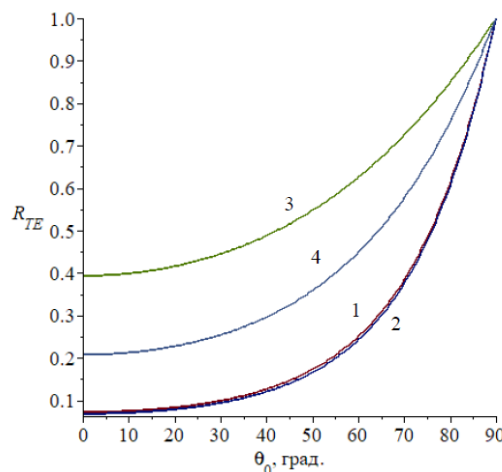


Рис. 4. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

На рис. 6 побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією від дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ та тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ ВР при різних кута падіння θ_0 (залежність 1– $\theta_0=0^\circ$; залежність 2– $\theta_0=30^\circ$; залежність 3– $\theta_0=60^\circ$; залежність 4– $\theta_0=90^\circ$).

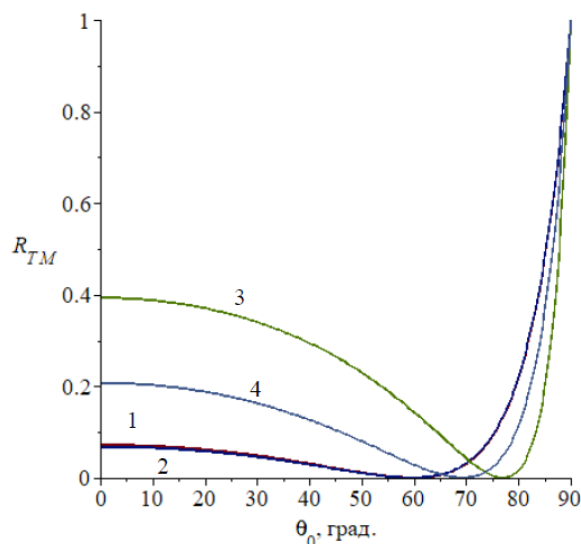


Рис. 5. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

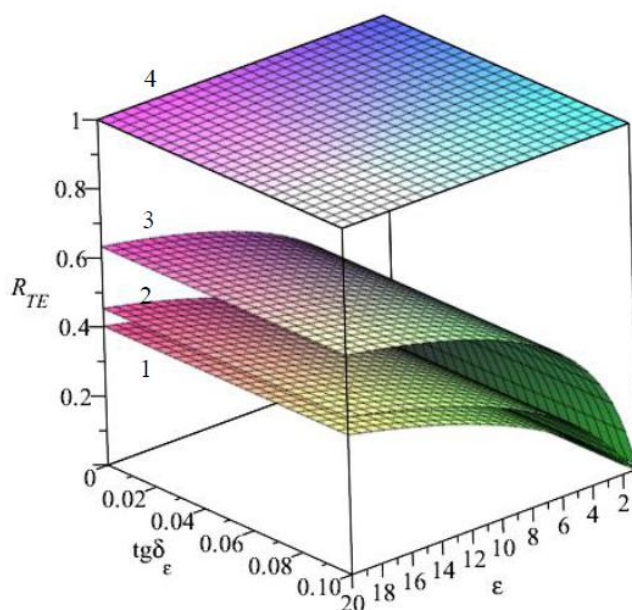


Рис. 6. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від ϵ та $\text{tg} \delta_\epsilon$ при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1– $\theta_0=0^\circ$; залежність 2– $\theta_0=30^\circ$; залежність 3– $\theta_0=60^\circ$; залежність 4– $\theta_0=90^\circ$) плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією

На рис. 7 побудовано аналогічну залежність для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1 – $\theta_0=0^\circ$; залежність 2 – $\theta_0=30^\circ$; залежність 3 – $\theta_0=60^\circ$; залежність 4 – $\theta_0=80^\circ$).

7. Обговорення результатів дослідження взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини

З рис. 2 видно, що для фіксованого значення кута падіння θ_0 зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ відбувається зменшення величини дійсної частини кута переломлення $\text{Re} \theta_2$. Тобто пласка електромагнітна хвиля розповсюджується у ВР ближче до нормалі. Уявна частина кута

переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\text{Im}\dot{\theta}_2$) для досліджених ВР (рис. 3) є незначною величиною (не перебільшує одного градуса в усьому діапазоні зміни кута падіння θ_0). З цього можна зробити припущення, що для ВР з малими діелектричними втратами вплив тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ на уявну частину кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\text{Im}\dot{\theta}_2$) буде незначним. З фізичної точки зору поява відмінної від нуля уявної складової $\text{Im}\dot{\theta}_2$ можна пояснити поглинанням частини енергії плоскої електромагнітної хвилі в реальній ВР.

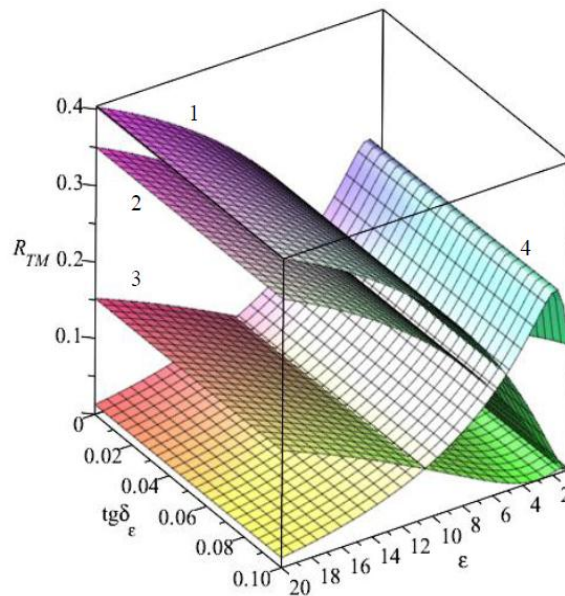


Рис. 7. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} від ϵ та $\text{tg}\delta_\epsilon$ при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1– $\theta_0=0^\circ$; залежність 2– $\theta_0=30^\circ$; залежність 3– $\theta_0=60^\circ$; залежність 4– $\theta_0=80^\circ$) плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією

Аналіз формул (9) та (11) показує, що енергетичні коефіцієнти відбиття R_{TE} та R_{TM} у будь-якому випадку не є комплексними величинами (наявність втрат у ВР не призводить до появи уявних частин цих коефіцієнтів). З рис. 4 та рис. 5 видно, що поляризація електромагнітної хвилі суттєво впливає на характер залежності обох енергетичних коефіцієнтів відбиття від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TE} плавно збільшується зі збільшенням кута падіння θ_0 хвилі (рис. 4) за законом, близьким до параболічного. Мінімальне значення R_{TE} має при куті падіння $\theta_0=0$. Тому опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху доцільно здійснювати плоскою електромагнітною хвилею з горизонтальною поляризацією нормально до поверхні ВР. Слід вважати, що при цьому максимальна кількість енергії (від 60 до 90 % для досліджених ВР) плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією переломлюється всередину ВР.

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TM} має локальний екстремум (мінімальне значення) в діапазоні кутів падіння θ_0 від 60 до 75 градусів для досліджених ВР (рис. 5). Можна припустити, що у цьому діапазоні кутів падіння практично уся енергія плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією переломлюється всередину

ВР. Тобто опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху плоскою електромагнітною хвилею з вертикальною поляризацією найбільш ефективно під кутами падіння від 60 до 75 градусів.

Очевидно, що для більш ефективного ініціювання підриву досліджених ВР доцільне застосування плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією з кутами опромінювання від 60 до 75 градусів (при цьому всередину ВР переломлюється найбільший відсоток енергії електромагнітних хвиль).

Аналіз формул (10) та (12) показує, що енергетичні коефіцієнти переломлення \dot{T}_{TE} та \dot{T}_{TM} у загальному випадку є комплексними величинами.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією дійсна частина $Re\dot{T}_{TE}$ енергетичного коефіцієнту переломлення \dot{T}_{TE} має локальний екстремум (максимальне значення) в діапазоні кутів падіння θ_0 від 65 до 85 градусів для досліджених ВР. Раніше для енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією було зроблено припущення, що при близькому діапазоні кутів падіння практично уся енергія електромагнітної хвилі переломлюється всередину ВР (рис. 5). Для $Re\dot{T}_{TE}$ це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення \dot{T}_{TE} .

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією дійсна частина $Re\dot{T}_{TM}$ енергетичного коефіцієнту переломлення \dot{T}_{TM} плавно зменшується за збільшенням кута падіння θ_0 . Максимальне значення $Re\dot{T}_{TM}$ має при куті падіння $\theta_0=0$ (при нормальному падінні електромагнітної хвилі на поверхню ВР). Вище подібна ситуація спостерігалася для енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією (рис. 4) й було зроблено припущення, що опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху доцільно здійснювати плоскою електромагнітною хвилею з горизонтальною поляризацією при падінні нормально до поверхні ВР. Для $Re\dot{T}_{TM}$ це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення \dot{T}_{TM} .

З фізичної точки зору поява уявної складової коефіцієнту переломлення має призводити до зменшення потужності електромагнітної хвилі внаслідок розсіювання енергії всередині реальної ВР.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TE} для досліджених кутів падіння θ_0 зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ збільшується за законом, близьким до логарифмічного (рис. 6). Причому чим більшим є кут падіння, тим більшим є величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} . Як й очікувалося, при куті падіння $\theta_0=90^\circ$, енергетичний коефіцієнт відбиття $R_{TE}=1$ в усьому діапазоні зміни дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\epsilon$ ВР (з фізичною точки зору, плоска електромагнітна хвиля розповсюджується над ВР). Чим більшим є величина дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ , тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} . Тобто ВР з великими значеннями ϵ відбивають більшу частину енергії електромагнітних хвиль, що може бути використано

для їх виявлення. Величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} незначно залежить від зміни величини тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ ВР при фіксованих значеннях величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ та куті падіння θ_0 в дослідженому діапазоні його зміни (від 0 до 0,1). Слід відмітити, що для більшості ВР тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ не перевищує 0,1 (табл. 1).

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TM} зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ збільшується за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння θ_0 менших за 60 градусів (рис. 7). Чим більше кут падіння, тим більшим є величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} . Як й для електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією, тим більшим є величина дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ , тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} . Тобто ВР з великими значеннями ϵ відбивають більшу частину енергії електромагнітних хвиль, що може бути використано для їх виявлення. При кутах падіння θ_0 більших 60 градусів виникає екстремум залежності R_{TM} від величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ (подібно залежності, приведений на рис. 5). Величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} (як й для R_{TE}) незначно залежить від зміни величини тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_\epsilon$ ВР при фіксованих значеннях величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ϵ та куті падіння θ_0 в дослідженому діапазоні його зміни (від 0 до 0,1).

Проведений аналіз дозволяє моделювати процеси взаємодії електромагнітних хвиль для широкого кола реальних умов. Проблемним питанням залишається багат шаровість вибухонебезпечних предметів, саме на вирішення цього питання необхідно спрямувати подальші дослідження.

8. Висновки

1. Побудована математична модель взаємодії електромагнітних хвиль ТМ та ТЕ поляризації з поверхнею вибухонебезпечних речовин під довільним кутом падіння, що дозволяє розраховувати енергетичні коефіцієнти відбиття та переломлення. Коефіцієнти відбиття та переломлення є критеріальними показниками при розробці механізмів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів за допомогою опромінювання електромагнітними хвилями.

2. Проведені розрахунки за побудованими моделями підтвердили працездатність отриманих теоретичних результатів. Встановлено, що для вибухонебезпечних речовин з малими діелектричними втратами вплив тангенсу кута діелектричних втрат на уявну частину кута переломлення буде незначним. Опромінення вибухонебезпечної речовини з метою ініціювання її вибуху плоскою електромагнітною хвилею з вертикальною поляризацією буде найбільш ефективно під кутами падіння від 60 до 75 градусів. Для досліджених вибухонебезпечних речовин енергетичний коефіцієнт переломлення електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією має локальний екстремум (максимальне значення) в діапазоні кутів падіння від 65 до 85 градусів. Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття зі збільшенням величини дійсної

частини відносної діелектричної проникності збільшується за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння θ_0 менших за 60 градусів. Таким чином, можна визначити межі використання методу дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів шляхом опромінення електромагнітними хвилями та мінімізувати хибні результати при аналізі сигналів відбитих хвиль.

Література

1. Furuta K., Ishikawa J. Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining. Berlin, Germany: Springer. 2009. P. 3–81. doi: 10.1007/978-1-84882-346-4_11
2. Marsh L. A., Verre W. Combining Electromagnetic Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar for the Detection of Anti-Personnel Landmines. *Sensors*, 2019. Vol. 19. № 15. P. 3390. doi: 10.3390/s19153390
3. Onodera T. *Biochemical Sensors*. 2013. P. 351. doi: 10.1201/b15650-26.
4. Prada P. A., Rodríguez M. C. Demining dogs in Colombia—A review of operational challenges, chemical perspectives, and practical implications. *Science & Justice*. 2016. Vol. 56(4). P. 269–277. doi: 10.1016/j.scijus.2016.03.002
5. Hemapala M. U., Huseyin C. Robots Operation in Hazardous Environment. *IntechOpen*. Croatia. 2017. P. 140. doi: 10.5772/65992
6. Koyama E., Hirose A. Development of Complex-Valued Self-Organizing-Map Landmine Visualization System Equipped with Moving One-Dimensional Array Antenna. *IEICE Transactions on Electronics*. 2018. Vol. 101(1). P. 35. doi: 10.1587/transele.E101.C.35
7. Ekenberg L., Fasth T., Larsson A. Hazards and quality control in humanitarian demining. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2018. Vol. 35. № 4. P. 897–913. doi:10.1108/IJQRM-01-2016-0012
8. Müller C., Scharmach M., Gaal M., Guelle D., Lewis A., Sieber A. Performance demonstration for humanitarian demining: Test and evaluation of mine searching equipment in detecting mines. *Materials Testing*. 2003. Vol. 45(11–12). P. 504–512. doi: 10.1515/mt-2003-0004
9. Mikulic D., Mikulic D. Design of demining machines. Springer London. 2013. P. 73–152. doi: 10.1007/978-1-4471-4504-2_5
10. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗ України. 2023. № 1(37). С. 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1
11. Salam A., Raza U., Salam A., Raza U. Electromagnetic characteristics of the soil. *Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things*. 2020. P. 39–59. doi: 10.1007/978-3-030-50861-6_2
12. Krivtsun V., Nanivska L. Factors affecting the demining process. *Social Development and Security*. 2023. Vol. 13(5). P. 38–44. doi: 10.33445/sds.2023.13.5.5
13. Lee J. S., Yu J. D. Non-destructive method for evaluating grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019. Vol. 38. P. 1–15. doi: 10.1007/s10921-019-0582-9
14. Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. *Проблеми надзвичайних ситуацій: Науковий журнал*, Харків: НУЦЗ України. 2024. № 1(39). С. 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6
15. Zhou Q., Yao X., Hu J. Study on the propagation characteristic of electro-

magnetic wave based on WUSN. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2021. Vol. 35(13). P. 1708–1718. doi: 10.1080/09205071.2021.1915882

A. Karpov, Adjunct

M. Kustov, DSc, Professor, Head of the Scientific Department

O. Kulakov, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Department

O. Basmanov, DSc, Professor, Chief Researcher of the Scientific Department

Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

INTERACTION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE WITH THE SURFACE OF A REAL EXPLOSIVE SUBSTANCE

To develop the theoretical basis for the effective detection and neutralization of explosive substances using electromagnetic radiation. The problem of detecting explosives is extremely relevant in the modern world. The development of new methods based on the physical principles of the interaction of electromagnetic radiation with matter is a promising area of research. An electrodynamic model of the interaction of an electromagnetic wave with the surface of a VR has been developed. The model takes into account an arbitrary angle of incidence of the wave and two main polarizations – TM and TE. Maxwell's equations with the corresponding boundary conditions at the interface between two media (air – explosive substance) were used to solve the electrodynamic problems. Different types of explosive substances with different dielectric properties were considered as objects of study. To solve the problem, numerical modeling based on the finite difference method was used. The modeling allowed us to calculate the energy coefficients of reflection, refraction, and absorption of electromagnetic radiation by the explosives. It was found that the efficiency of interaction of an electromagnetic wave with a radiation source significantly depends on the angle of its incidence. The optimal incidence angle for most of the studied radiation sources is in the range of 60 to 75 degrees. For the VRs with low dielectric losses, the influence of the dielectric loss tangent on the imaginary part of the refractive angle is insignificant. This indicates that for such materials the main mechanism of interaction is the reflection of an electromagnetic wave. It has been shown that the energy refractive index has a local extreme (maximum) in the range of incident angles from 65 to 85 degrees. The energy reflection coefficient for a plane electromagnetic wave with vertical polarization increases with the increase of the real part of the relative permittivity according to a law close to the logarithmic law for incident angles less than 60 degrees.

Keywords: dielectric properties, electromagnetic radiation, explosive substance, humanitarian demining, reflection coefficient, wave polarization

References

1. Furuta, K., Ishikawa, J. (2009). *Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining*. Berlin, Germany: Springer, 3–81. doi: 10.1007/978-1-84882-346-4_11
2. Marsh, L. A., Verre, W. (2019). Combining Electromagnetic Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar for the Detection of Anti-Personnel Landmines. *Sensors*, 19, 3390. doi: 10.3390/s19153390
3. Onodera, T. (2013). *Biochemical Sensors*, 351. doi: 10.1201/b15650-26
4. Prada, P. A., Rodríguez, M. C. (2016). Demining dogs in Colombia—A review of operational challenges, chemical perspectives, and practical implications. *Science & Justice*, 56(4), 269–277. doi: 10.1016/j.scijus.2016.03.002
5. Hemapala, M., Huseyin, C. (2017). *Robots Operation in Hazardous Environment*. IntechOpen. Croatia, 140. doi: 10.5772/65992
6. Koyama, E., Hirose, A. (2018). Development of Complex-Valued Self-Organizing-Map Landmine Visualization System Equipped with Moving One-Dimensional Array Antenna. *IEICE Transactions on Electronics*, 101(1), 35. doi: 10.1587/transele.E101.C.35

7. Ekenberg, L., Fasth, T., Larsson, A. (2018). Hazards and quality control in humanitarian demining. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 35, 4, 897–913. doi:10.1108/IJQRM-01-2016-0012
8. Müller, C., Scharmach, M., Gaal, M., Guelle, D., Lewis, A., Sieber, A. (2003). Performance demonstration for humanitarian demining: Test and evaluation of mine searching equipment in detecting mines. *Materials Testing*, 45(11–12), 504–512. doi: 10.1515/mt-2003-0004
9. Mikulic, D., Mikulic, D. (2013). *Design of demining machines*. Springer London, 73–152. doi: 10.1007/978-1-4471-4504-2_5
10. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Naukovyi zhurnal, Kharkiv: NUCZU*, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1
11. Salam, A., Raza, U., Salam, A., Raza, U. (2020). Electromagnetic characteristics of the soil. *Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things*, 39–59. doi: 10.1007/978-3-030-50861-6_2
12. Krivtsun, V., Nanivska, L. (2023). Factors affecting the demining process. *Social Development and Security*, 13(5), 38–44. doi: 10.33445/sds.2023.13.5.5
13. Lee, J. S., Yu, J. D. (2019). Non-destructive method for evaluating grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 38, 1–15. doi: 10.1007/s10921-019-0582-9
14. Kustov, M., Kulakov, O., Karpov, A., Basmanov, O., Mykhailovska, Yu. (2024). Elektrodynamichna model vzaiemodii elektromahnitnoi khvyli z poverkhneiu vybukhonebezpechnoi rehovyny. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Naukovyi zhurnal, Kharkiv: NUCZU*, 1(39), 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6
15. Zhou, Q., Yao, X., Hu, J. (2021). Study on the propagation characteristic of electromagnetic wave based on WUSN. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(13), 1708–1718. doi: 10.1080/09205071.2021.1915882

Надійшла до редколегії: 12.10.2024

Прийнята до друку: 11.11.2024