

Національний університет цивільного захисту України  
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Карпов Артем Андрійович

УДК 623.454.38

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОД ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ  
ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО  
ВИКОНАННЯ

263 – цивільна безпека

26 – цивільна безпека

Подается на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ А.А. Карпов

Науковий керівник

Кустов Максим Володимирович,  
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2026

## АНОТАЦІЯ

*Карпов А.А.* Метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 – Цивільна безпека – Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання у галузі цивільної безпеки – розробці методу електромагнітного виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних елементів в інтересах підвищення рівня цивільної безпеки на деокупованих територіях із значним вмістом вибухонебезпечних предметів різного класу (протитанкові, протипіхотні, саморобні) при проведенні оперативного та гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами та гуманітарними організаціями різного підпорядкування.

У **вступі** подано загальну характеристику дисертаційної роботи. Обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЧИЩЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ВІД ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ** проаналізовано стан цивільної безпеки України у контексті проблеми наявності неконтрольованих вибухонебезпечних предметів (ВНП), який засвідчив, що наша держава належить до числа країн із найбільшою площею території, забрудненої такими об'єктами. Додаткову складність становить широкий спектр конструкційних особливостей ВНП, серед яких присутня як

штатна зброя країн колишнього СРСР та НАТО, так і саморобні вибухові пристрої. Значну частину становлять ВНП із неметалевими конструкційними елементами, що істотно ускладнює їх пошук за допомогою стандартних методів детектування.

Водночас в Україні створена нормативно-правова база, що забезпечує належні умови для ефективного виконання завдань із очищення територій від ВНП. Вона базується на міжнародних актах та процедурах, а всі роботи з розмінування проводяться відповідно до стандартів Женевського міжнародного центру гуманітарного розмінування.

У процесі досліджень проаналізовано та класифіковано основні методи дистанційного виявлення й знешкодження ВНП, які за принципом дії поділяються на чотири класи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні та органолептичні. Порівняльний аналіз засвідчив, що найбільш доцільними для застосування оперативно-рятувальними підрозділами при очищенні великих площ від ВНП невідомої конструкції є електромагнітний метод та метод нейтронного аналізу. Окрему увагу заслуговують електромагнітні методи дистанційного детектування, які мають значний потенціал у підвищенні ефективності та безпеки розмінування територій, забруднених ВНП різного конструктивного виконання. Водночас сучасні технічні рішення та алгоритми обробки сигналів ще не забезпечують повної реалізації цього потенціалу, що зумовлює потребу у подальшому вдосконаленні технологій.

**У другому розділі ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИБУХОВИХ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД ЇХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ** проаналізовано структуру найбільш поширених вибухонебезпечних предметів на території Східної Європи та визначено основні вибухові матеріали, що входять до їх складу. Встановлено, що найбільшу загрозу по параметру чутливості становлять капсулі-детонатори, які містять високочутливі речовини, зокрема тетрил, гексоген, тринітротолуол, фульмінат ртуті, азид та тринітрорезорцинат свинцю. За фізико-хімічними

властивостями ці матеріали поділяються на два класи: сполуки на основі вуглеводневої окислювальної складової та речовини з вмістом важких металів, що відрізняються щільністю та питомими вибуховими параметрами.

Розрахунок дипольних моментів показав, що найбільш небезпечними у контексті впливу електромагнітних хвиль є вибухові матеріали з вмістом тетрилу, тоді як гексоген, пентаеритриттетранітрат і фульмінат ртуті залишаються інертними до такого впливу через симетричну молекулярну структуру. Таким чином, рівень небезпеки ВВП визначається не лише їх конструкційними особливостями, а й фізико-хімічними властивостями вибухових матеріалів, що є ключовим для вдосконалення методів дистанційного виявлення та гуманітарного розмінування.

**У третьому розділі РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ХВИЛЬ З ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМИ ПРЕДМЕТАМИ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ** розроблено низку електродинамічних та математичних моделей взаємодії електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону з вибухонебезпечними речовинами та предметами. Моделювання на основі рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами дозволило розрахувати коефіцієнти відбиття, переломлення та поглинання енергії залежно від діелектричної проникності, кута падіння хвилі та властивостей матеріалів. Встановлено, що речовини з високою діелектричною проникністю (наприклад, нітрогліцерин,  $\epsilon = 19$ ) добре відбивають хвилі, що полегшує їх виявлення, тоді як TNT ( $\epsilon \approx 3$ ) поглинає до 96 % енергії, що створює ризик дистанційного підриву.

Чисельні розрахунки показали, що найбільше енергії поглинає TNT на поверхні піску (~92 %), а найменше — на вологій деревині (~67 %). При цьому для TNT та PET характерний виражений оптимум поглинання в діапазоні сухих ґрунтів. Побудовані моделі також дозволили оцінити вплив поляризації хвиль: для горизонтальної поляризації коефіцієнт відбиття зростає логарифмічно зі збільшенням діелектричної проникності, а для

вертикальної виявлено локальний максимум переломлення при кутах падіння 65–85°.

Окремо змодельовано взаємодію хвиль із багат шаровими структурами, з яких виготовлені корпуси мін ПМН-2, ПФМ-1, МОН-90 та ПОМ-3. Встановлено залежність хвильового опору та коефіцієнтів проходження від дипольного моменту вибухових речовин, що може змінюватися у 5–8 разів залежно від їх хімічного складу. Перевірка моделей підтвердила їхню працездатність і достовірність.

У четвертому розділі РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ запропонована спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів за допомогою електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону, що дозволяє підвищити безпеку та ефективність робіт із розмінування шляхом усунення безпосереднього контакту людини з ВНП. Суть методу полягає у випромінюванні в зону можливого розташування предмету сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації з набором частот, прийманні відбитих багаточастотних сигналів, утворених за рахунок взаємодії з нелінійними компонентами ВНП, та подальшому опроміненні потужним імпульсним сигналом у напрямку виявленого об'єкта на певній глибині в ґрунті.

Для реалізації цього підходу створено алгоритм електромагнітного детектування, який складається з 18 функціональних та 3 логічних блоків, а також алгоритм роботи сканера для виявлення вибухових матеріалів. Обидва алгоритми мають циклічну структуру та дозволяють покроково описати процедуру застосування методу. Ефективність роботи перевірено шляхом моделювання, що показало залежність достовірності визначення ВНП від глибини залягання та частоти сканування: зниження частоти з 3 до 1 ГГц підвищує ймовірність виявлення предметів розміром 0,1 м із глибиною розміщення 0,2 м до 0,5 м. Крім того, аналіз часових сигнатур підтвердив

можливість створення бази даних характерних відбитків для зменшення кількості хибних спрацювань.

Створено функціональну схему електромагнітного детектора на основі цифрового процесора Blackfin, до складу якого входять випромінююча та приймальна антени, блоки посилення та регулювання сигналу, цифро-аналогові перетворювачі та система таймінгів. Експериментальна перевірка підтвердила працездатність методу та продемонструвала вплив вологості ґрунту, розмірів об'єкта та конструкційних особливостей ВВП на результати детектування. Аналіз радіолокаційних карт для мін ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62 показав практичну ефективність запропонованого підходу: для мін ТМ-62 забезпечується якісне виявлення на глибинах до 50 см, а для ПМН-2 та ПФМ-1 – до 20 см.

На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо застосування електромагнітного методу в гуманітарному розмінуванні, що забезпечує належний рівень безпеки особового складу та високу якість виконання робіт із очищення територій від вибухонебезпечних предметів.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. *Вперше* розроблено математичну модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах, яка враховує діелектричні властивості та хвильовий опір вибухонебезпечного матеріалу під час опромінення, а також амплітуду та хвильове число електромагнітної хвилі, що опромінює, враховує кінцевий розмір вибухонебезпечного предмету та дозволяє визначити частки потужності електромагнітної хвилі, що поглинається вибухонебезпечним матеріалом та відбивається від його поверхні.

2. *Вперше* розроблено електродинамічну модель дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами, яка враховує діелектричну та магнітну

проникність середовища та тангенс кута діелектричних втрат для речовин, з яких вироблені корпус вибухонебезпечного предмету та детонатору, самого вибухонебезпечного матеріалу і виду ґрунту у товщі якого знаходиться вибухонебезпечний предмет, та яка дозволяє вирішувати задачі оцінки ефективності використання приладів електромагнітного детектування з урахування особливостей замінованої території.

3. *Вперше* розроблено метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання, який базується на розроблених математичних моделях дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених та багат шарових вибухонебезпечних предметах при довільному куті їх падіння, яка, на відміну від існуючих, дозволяє проводити виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних елементів та підвищує селективність дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів промислового та нелегального виробництва, як у заглибленому так і незаглибленому розміщенні.

4. *Удосконалено* математичну модель взаємодії електромагнітних хвиль з поверхнею вибухонебезпечних предметів під довільним кутом падіння, яка враховує ТМ та ТЕ поляризацію електромагнітних хвиль та діелектричні властивості всіх складових елементів вибухонебезпечних предметів та яка дозволяє розраховувати енергетичні коефіцієнти відбиття та переломлення таких хвиль та визначати оптимальні кути опромінення ймовірних місць розташування вибухонебезпечних предметів при яких забезпечується максимальна селективна здатність.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці нових підходів до забезпечення належного рівня цивільної безпеки при проведенні очищення територій від вибухонебезпечних предметів. Запропонований метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів дозволяє підвищити ймовірність дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних

елементів, що в свою чергу підвищує безпеку, якість та швидкість проведення гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами ДСНС України та іншими гуманітарними організаціями при очищенні деокупованої території.

Розроблені в дисертації математичні моделі взаємодії електромагнітних полів та хвиль з вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання та функціональна схема електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів дозволяє розробляти нові та удосконалювати існуючі технічні засоби та прилади дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів, як промислового так і нелегального виробництва. Отримані у роботі закономірності дозволяють підвищити якість обробки отриманих при детектуванні сигналів.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено до рівня конкретних алгоритмів дій та прикладних рекомендацій. Отримані в дисертації результати можуть бути використані для розробки та удосконалення технічного обладнання для детектування ВВП, а також при складанні стандартних операційних процедур для проведення гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами ДСНС України та гуманітарними організаціями різної форми підпорядкування.

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені в підрозділах Головного управління ДСНС України у Харківській області, у практичну діяльність Міжрегіонального центру гуманітарного розмінування та швидкого реагування ДСНС України, у практичну та наукову діяльність Науково-дослідного лабораторно-експериментального центру ТОВ «Бранд Трейд», а також в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси).

**Ключові слова:** рівень цивільної безпеки деокупованих території, гуманітарне розмінування, піротехнічні підрозділи, вибухонебезпечні предмети, електромагнітне детектування, детонаційний заряд, ініціація детонації, багатофакторна модель, методи.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

1. Кустов М., **Карпов А.** Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2023. № 1(37). С. 4–17.

*Здобувачу особисто належить математичний опис процесу взаємодії електромагнітного поля із вибухонебезпечною речовиною та графічна інтерпретація отриманих моделей.*

2. Кустов М. В., Кулаков О. В., **Карпов А. А.**, Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2023. № 2 (38). С. 39–52.

*Здобувачу особисто належить розробка моделі дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах та аналіз отриманих графічних залежностей.*

3. 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. Харків : НУЦЗ України, 2024. № 1(39). С. 81–95. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-6.

*Здобувачу особисто належить розробка моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини та графічна інтерпретація отриманих моделей.*

4. **Карпов А. А.**, Кустов М. В., Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Черкаси: НУЦЗ України, 2024. № 2(40). С. 57-71.

*Здобувачу особисто належить отримання моделей взаємодії електромагнітних хвиль із багат шаровою структурою вибухонебезпечного предмету та аналіз отриманих результатів.*

**5. Карпов А.А.,** Кустов М.В., Корнієнко Р.В., , Іваненко О.О., Шаріпова Д.С. Експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2025. № 1 (41). С. 50–61.

*Здобувачу особисто належить участь у проведенні досліджень та обробці результатів перевірки працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів.*

**Статті у наукових періодичних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus:**

6. 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: <https://doi.org/10.4028/p-0h8ung>

*Здобувачу особисто належить аналіз фізичних та хімічних властивостей вибухових речовин, ідея їх класифікації у три групи та аналіз отриманих даних.*

7. **Karpov A.**, Kustov M., Basmanov O., Kulakov O. Investigation of diffraction of electromagnetic microwaves on explosive materials. Advances in Science and Technology. International Scientific Applied Conference “Problems of Emergency Situations”. Vol. 156. Trans Tech Publications Ltd., 2024. P. 91–102. <https://doi.org/10.4028/p-cg2mbv>

*Здобувачу особисто належить отримання залежностей для розрахунку коефіцієнтів відбиття та поглинання електромагнітних хвиль об’ємом вибухонебезпечного матеріалу.*

8. Kustov, M., **Karpov, A.**, Zimin, S., Strelec, V. Development of an Electromagnetic Detection Method for Explosive Materials. In Advances in Science and Technology. *International Scientific Applied Conference “Problems*

*of Emergency Situations*". Vol. 170. Trans Tech Publications Ltd, 2025. P. 153–162. <https://doi.org/10.4028/p-mbumyw>

*Здобувачу особисто належить участь у розробленні електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних матеріалів та узагальненні результатів дослідження.*

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

9. **Карпов А. А., Кустов М. В.** Класифікація способів виявлення вибухонебезпечних предметів та речовин. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: ЛДУ БЖД, 2022. С. 428–430.

*Здобувачу особисто належить порівняльний аналіз існуючих методів та способів виявлення вибухонебезпечних предметів з різними конструкційними особливостями.*

10. **Карпов А. А., Кустов М. В.** Сучасні способи виявлення вибухонебезпечних предметів. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 40–41.

*Здобувачу особисто належить порівняльний аналіз існуючих методів та способів виявлення вибухонебезпечних предметів з різними конструкційними особливостями.*

11. **Карпов А. А., Кустов М. В.** Аналіз існуючих технічних способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 269–271.

*Здобувачу особисто належить порівняльний аналіз існуючих технічних засобів виявлення та дезактивації вибухонебезпечних предметів з різними конструкційними особливостями.*

12. Кустов М., **Карпов А.** Перспективні засоби дистанційного розмінування: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції

з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист».: Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2022. С. 215-216.

*Здобувачу особисто належить порівняльний аналіз існуючих методів та їх технічної реалізації щодо проведення дистанційного розмінування у межах гуманітарного розмінування.*

13. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Аналіз матеріалів вибухонебезпечних предметів: матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків»: Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 178-179.

*Здобувачу особисто належить збір, аналіз та класифікація інформації щодо найбільш поширених вибухонебезпечних предметів на території України та вибухових матеріалів, що в них використовуються.*

14. **Карпов А.А.**, Кустов М.В., Männig D. Аналіз небезпеки вибухонебезпечних предметів. Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 233-234.

*Здобувачу особисто належить збір, аналіз та класифікація інформації щодо вибухових властивостей вибухонебезпечних матеріалів, що використовуються при виготовленні бойових вибухонебезпечних предметів.*

15. **Карпов А. А.** Технічні засоби дистанційного розмінування: матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням». : – Харків : НУЦЗУ, 2023. С 137-138.

16. **Karpov A.**, Kustov M. Modern explosive object detection technologies. Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference. Bordeaux, France, 2022. Pp. 402–404. URL: <https://eu-conf.com/ua/events/youth-education-and-science-through-today-s-challenges>.

*Здобувачу особисто належить визначення переваг та недоліків в існуючих методах виявлення вибухонебезпечних предметів.*

17. Kustov M., Buscham C., **Karpov A.** Methods of detection of explosive substances: матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 159–160.

*Здобувачу особисто належить визначення переваг та недоліків в існуючих методах виявлення вибухонебезпечних предметів.*

18. **Карпов А. А.**, Кустов М. В., Басманов О. Є., Кулаков О. В. Перспективні технології та методики пошуку вибухонебезпечних матеріалів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 183–184.

*Здобувачу особисто належить порівняльний аналіз існуючих методів та їх технічної реалізації щодо проведення дистанційного розмінування у межах гуманітарного розмінування.*

19. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Використання надвисокочастотного випромінювання для підвищення ефективності розмінування. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 160.

*Здобувачу особисто належить розробка концепції виявлення вибухонебезпечних предметів із використанням надвисокочастотного випромінювання.*

20. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Перспективна технологія розмінування: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 406.

*Здобувачу особисто належить опис процедури проведення гуманітарного розмінування за допомогою методу електромагнітного зондування.*

21. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Підвищення ефективності відновлення земельного фонду замінованих територій України: Екологічна безпека в

умовах війни: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 136.

*Здобувачу особисто належить опис методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.*

22. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Роль піротехнічних технологій у забезпеченні безпеки та відновленні територій: Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 187–188.

*Здобувачу особисто належить аналіз ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.*

23. Кустов М. В., **Карпов А. А.**, Яужева О. О. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних матеріалів: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Черкаси: НУЦЗУ, 2025. С. 247–248.

*Здобувачу особисто належить опис методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.*

24. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних речовин: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: НУЦЗУ, 2025. С. 60–61.

*Здобувачу особисто належить опис методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.*

**Патент:**

25. Кустов М. В., Поспелов Б. Б., **Карпов А. А.**, Веретеннікова Ю. А.  
Спосіб дистанційного розмінування: пат. 155245 Україна : F42D 5/04. — № и  
2023 03960; заявл. 21.08.2023; опубл. 01.02.2024, Бюл. № 5.

## ABSTRACT

*Karpov A.A.* Method of electromagnetic detection of explosive objects of various designs – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 263 - Civil Safety - National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical problem in the field of civil security – the development of a method for electromagnetic detection of explosive objects with a low content of metal structural elements in order to improve civil security in deoccupied territories with a significant content of explosive objects of various classes (anti-tank, anti-personnel, homemade) during operational and humanitarian demining by operational rescue units and humanitarian organizations of various subordination.

The **introduction** provides a general description of the thesis. The relevance of the dissertation topic is substantiated, the purpose of the work and the main tasks of the research are formulated, and the connection of the work with scientific programmes is shown. The data on the personal contribution of the applicant, work approbation and publications are presented.

The **first section**, ANALYSIS OF EXISTING APPROACHES TO CLEARING TERRITORIES OF EXPLOSIVE HAZARDS, analyzes the state of civil security in Ukraine in the context of the problem of uncontrolled explosive hazards items (EHI), which showed that our country is among those with the largest area of territory contaminated with such objects. An additional complication is the wide range of design features of EHI, which include both standard weapons of the former USSR and NATO countries, as well as homemade explosive devices. A significant portion of EHI consists of non-metallic structural elements, which makes it significantly more difficult to locate them using standard detection methods.

At the same time, Ukraine has established a regulatory framework that provides the necessary conditions for the effective implementation of tasks related

to the clearance of territories from EHI. It is based on international acts and procedures, and all demining work is carried out in accordance with the standards of the Geneva International Centre for Humanitarian Demining.

In the course of the research, the main methods of remote detection and disposal of EHI were analyzed and classified, which are divided into four classes according to their principle of action: physical, physicochemical, chemical, and organoleptic. A comparative analysis showed that the electromagnetic method and the neutron analysis method are the most appropriate for use by emergency rescue units when clearing large areas of EHI of unknown design. Electromagnetic remote detection methods deserve special attention, as they have significant potential for improving the efficiency and safety of demining areas contaminated with EHI of various designs. At the same time, modern technical solutions and signal processing algorithms do not yet fully realize this potential, which necessitates further improvement of technologies.

In the **second section**, ESTABLISHING THE DEPENDENCE OF THE EXPLOSIVE AND ELECTROMAGNETIC PROPERTIES OF EXPLOSIVE MATERIALS ON THEIR PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES The structure of the most common explosive objects in Eastern Europe was analyzed and the main explosive materials included in their composition were identified. It has been established that the greatest threat is posed by detonator caps containing highly sensitive substances, in particular tetryl, hexogen, trinitrotoluene, mercury fulminate, azide, and lead trinitroresorcinate. Based on their physical and chemical properties, these materials are divided into two classes: compounds based on a hydrocarbon oxidizing component and substances containing heavy metals, which differ in density and specific explosive parameters.

The calculation of dipole moments showed that the most dangerous in the context of electromagnetic wave exposure are explosive materials containing tetryl ( $\mu = 6.34$  D), while hexogen, pentaerythritol tetranitrate, and mercury fulminate remain inert to such effects due to their symmetrical molecular structure ( $\mu = 0$  D). Thus, the level of danger of explosive materials is determined not only

by their design features, but also by the physicochemical properties of explosive materials, which is key to improving remote detection and humanitarian demining methods.

In the **third section**, DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF INTERACTION BETWEEN ELECTROMAGNETIC FIELDS AND WAVES WITH EXPLOSIVE OBJECTS OF VARIOUS CONSTRUCTION A number of electrodynamic and mathematical models of interaction between electromagnetic waves in the microwave range and explosive substances and objects have been developed. thematic models of the interaction of microwave electromagnetic waves with explosive substances and objects. Modeling based on Maxwell's equations with appropriate boundary conditions allowed us to calculate the coefficients of reflection, refraction, and energy absorption depending on the dielectric permeability, the angle of incidence of the wave, and the properties of materials. It was found that substances with high dielectric permeability (e.g., nitroglycerin,  $\varepsilon = 19$ ) reflect waves well, which facilitates their detection, while TNT ( $\varepsilon \approx 3$ ) absorbs up to 96% of the energy, which creates a risk of remote detonation.

Numerical calculations showed that TNT absorbs the most energy on the surface of sand (~92%) and the least on wet wood (~67%). At the same time, TNT and PET are characterized by a pronounced absorption optimum in the range of dry soils. The models also made it possible to assess the effect of wave polarization: for horizontal polarization, the reflection coefficient increases logarithmically with increasing dielectric permeability, and for vertical polarization, a local maximum refraction was found at angles of incidence of 65–85°.

The interaction of waves with multilayer structures, from which the PMN-2, PFM-1, MON-90, and POM-3 mine casings are made, was modeled separately. The dependence of wave resistance and transmission coefficients on the dipole moment of explosives, which can vary by a factor of 5–8 depending on

their chemical composition, has been established. Verification of the models confirmed their performance and reliability.

In the **fourth section**, DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ELECTROMAGNETIC DETECTION OF EXPLOSIVE OBJECTS OF VARIOUS DESIGNS A method is proposed for remote detection of explosive objects using electromagnetic microwave range electromagnetic waves, which allows to increase the safety and efficiency of demining operations by eliminating direct human contact with explosive objects. The essence of the method lies in emitting vertically and horizontally polarized signals with a set of frequencies into the area where the object is likely to be located, receiving reflected multi-frequency signals formed by interaction with nonlinear components of the explosive device, and then irradiating a powerful pulse signal in the direction of the detected object at a certain depth in the ground.

To implement this approach, an electromagnetic detection algorithm consisting of 18 functional and 3 logical blocks was created, as well as a scanner algorithm for detecting explosive materials. Both algorithms have a cyclic structure and allow step-by-step description of the method application procedure. The effectiveness of the work was verified by modeling, which showed the dependence of the reliability of determining the EHI on the depth of occurrence and the scanning frequency: reducing the frequency from 3 to 1 GHz increases the probability of detecting objects with a size of 0.1 m from 0.2 m to 0.5 m. In addition, analysis of time signatures confirmed the possibility of creating a database of characteristic fingerprints to reduce the number of false positives.

A functional diagram of an electromagnetic detector based on a Blackfin digital processor has been created, which includes transmitting and receiving antennas, signal amplification and regulation units, digital-to-analog converters, and a timing system. Experimental testing confirmed the effectiveness of the method and demonstrated the influence of soil moisture, object size, and structural features of the EHI on detection results. Analysis of radar maps for PMN-2, PFM-1, and TM-62 mines showed the practical effectiveness of the proposed approach:

for TM-62 mines, high-quality detection is ensured at depths of up to 50 cm, and for PMN-2 and PFM-1 mines, up to 20 cm.

Based on the results obtained, practical recommendations have been formulated for the use of the electromagnetic method in humanitarian demining, which ensures an adequate level of safety for personnel and high quality of work in clearing areas of explosive objects.

### **Scientific novelty of the results.**

1. For **the first time**, a mathematical model of the diffraction of microwave-range electromagnetic waves on non-buried explosive objects has been developed, which takes into account the dielectric properties and wave impedance of the explosive material during irradiation, as well as the amplitude and wavenumber of the incident electromagnetic wave, accounts for the finite size of the explosive object, and allows determining the fractions of the electromagnetic wave's power absorbed by the explosive material and reflected from its surface.

2. For **the first time**, an electrodynamic model of electromagnetic wave diffraction when passing through a multilayer structure of an explosive object has been developed by solving Maxwell's equations with the corresponding boundary conditions, which takes into account the dielectric and magnetic permeability of the medium and the tangent of the dielectric loss angle for the substances from which the body of the explosive object and the detonator are made, the explosive material itself, and the type of soil in which the explosive object is located, and which allows solving problems of assessing the effectiveness of electromagnetic detection devices, taking into account the characteristics of the mined territory.

3. For **the first time**, a method has been developed for the combined electromagnetic detection of explosive objects of various designs, based on mathematical models of the diffraction of microwave electromagnetic waves on shallow and multilayer explosive objects at any angle of incidence, which, unlike existing methods, allows for the detection of explosive objects with a low

content of metal structural elements and increases the selectivity of remote detection of explosive objects of industrial and illegal production, both buried and unburied.

4. The mathematical model of the interaction of electromagnetic waves with the surface of explosive objects at any angle of incidence **has been improved**, which takes into account the TM and TE polarization of electromagnetic waves and the dielectric properties of all components of explosive objects and allows calculating the energy coefficients of reflection and refraction of such waves and determining the optimal angles of irradiation of probable locations of explosive objects at which maximum selective capability is ensured .

**The practical significance of the obtained results** lies in the development of new approaches to ensuring an adequate level of civil safety when clearing areas of explosive objects. The proposed method of electromagnetic detection of explosive objects increases the probability of remote detection of explosive objects with a low content of metal structural elements, which in turn increases the safety, quality, and speed of humanitarian demining by the operational and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine and other humanitarian organizations when clearing occupied territories.

The mathematical models of the interaction of electromagnetic fields and waves with explosive objects of various designs developed in the dissertation and the functional diagram of an electromagnetic detector of explosive objects allow for the development of new and improvement of existing technical means and devices for remote detection of explosive objects, both industrial and illegal production. The patterns obtained in the work will improve the quality of processing the signals received during detection.

The main scientific provisions and conclusions of the dissertation have been brought to the level of specific algorithms of actions and applied recommendations. The results obtained in the dissertation can be used to develop and improve technical equipment for detecting EHI, as well as to compile

standard operating procedures for humanitarian demining by operational and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine and humanitarian organizations of various forms of subordination.

The main results of the dissertation research have been implemented in the units of the Main Directorate of the State Emergency Service of Ukraine in the Kharkiv region, in the practical activities of the Interregional Center for Humanitarian Demining and Rapid Response of the State Emergency Service of Ukraine, in the practical and scientific activities of the Research Laboratory and Experimental Center of Brand Trade LLC, as well as in the educational process of the National University of Civil Protection of Ukraine (Cherkasy).

**Keywords:** civil security level in de-occupied territories, humanitarian demining, pyrotechnic units, explosive ordnance, electromagnetic detection, detonation charge, detonation initiation, multifactorial model, methods.

## LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION

**Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:**

### **Articles in scientific professional publications of Ukraine:**

1. **Kustov, M.**, Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Problems of Emergency Situations*, 1(37), 4–17.

*The applicant personally owns the mathematical description of the process of interaction between an electromagnetic field and an explosive substance, as well as the graphical interpretation of the models obtained.*

2. Kustov, M. V., Kulakov, O. V., **Karpov, A. A.**, Basmanov, O. Ye., Mykhailovska, Yu. V. (2023). Model of diffraction of electromagnetic waves on explosive objects. *Problems of Emergency Situations*, 2(38), 39–52.

*The applicant is personally responsible for developing a model of electromagnetic wave diffraction on explosive objects and analyzing the resulting graphical dependencies.*

3. Kustov, M. V., Kulakov, O. V., **Karpov, A. A.**, Basmanov, O. Ye., Mykhailovska, Yu. V. (2024). Electrodinamic model of the interaction of an electromagnetic wave with the surface of an explosive substance. *Problems of Emergency Situations*, 1(39), 81–95. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-39-6>

*The applicant is personally responsible for developing a model of the interaction of electromagnetic waves with the surface of explosive substances and for the graphical interpretation of the models obtained.*

4. **Karpov, A.**, Kustov, M., Basmanov, O., Kulakov, O. (2024). Investigation of diffraction of electromagnetic microwaves on explosive materials. In *Advances in Science and Technology: International Scientific*

Applied Conference “Problems of Emergency Situations” (Vol. 156, pp. 91–102). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-cg2mbv>

*The applicant is personally responsible for obtaining dependencies for calculating the coefficients of reflection and absorption of electromagnetic waves by the volume of explosive material.*

5. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V., Kornienko R.V., Ivanenko O.O., Sharipova D.S. Experimental verification of the electromagnetic method of detecting explosive objects. *Problems of Emergency Situations*, 1 (41), 50–61.

*The applicant personally contributed to conducting the research and processing the results of testing the operability of the electromagnetic method for detecting explosive hazards.*

**Articles in scientific periodicals indexed in the Scopus scientometric database:**

6. 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. <https://doi.org/10.4028/p-0h8ung>

*The applicant is personally responsible for analyzing the physical and chemical properties of explosive substances, proposing their classification into three groups, and analyzing the data obtained.*

7. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V., Kulakov, O. V., Basmanov, O. Ye., Mykhailovska, Yu. V. (2024). Interaction of an electromagnetic wave with the surface of a real explosive substance. *Problems of Emergency Situations*, 2(40), 57–71.

*The applicant is personally responsible for obtaining models of electromagnetic wave interaction with the multilayer structure of an explosive object and analyzing the results obtained.*

8. Kustov, M., **Karpov, A.**, Zimin, S., & Strelec, V. (2025). Development of an Electromagnetic Detection Method for Explosive Materials. In *Advances in Science and Technology* (Vol. 170, pp. 153–162). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-m6umyw>

*The applicant personally contributed to the development of an electromagnetic method for detecting explosive materials and to the generalization of the research results.*

**Scientific papers that certify the approbation of the dissertation materials:**

9. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2022). Classification of methods for detecting explosive objects and substances. In Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation (pp. 428–430). Lviv: LDU BZhD.

*The applicant is personally responsible for conducting a comparative analysis of existing methods and techniques for detecting explosive objects with different design features.*

10. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2022). Modern methods for detecting explosive objects. In Combining Theory and Practice to Enhance Operational-Rescue Units' Readiness: Proceedings of the Round Table (pp. 40–41). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for conducting a comparative analysis of existing methods and techniques for detecting explosive objects with different design features.*

11. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2022). Analysis of existing technical methods for detection and neutralization of explosive objects. In Fire Safety Issues 2022: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (pp. 269–271). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for conducting a comparative analysis of existing technical means for detecting and deactivating explosive objects with different design features.*

12. Kustov, M., **Karpov, A.** (2022). Prospective tools for remote demining. In XII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference with International Participation “Emergency Situations: Safety and Protection” (pp. 215–216). Cherkasy: CHIPB im. Heroiv Chornobylya, NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for conducting a comparative analysis of existing methods and their technical implementation for remote demining within the framework of humanitarian demining.*

13. **Karpov, A. A.,** Kustov, M. V. (2023). Analysis of explosive materials. In Round Table (Webinar) “Prevention, Response, and Elimination of Emergency Situations” (pp. 178–179). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for collecting, analyzing, and classifying information on the most common explosive objects in Ukraine and the explosive materials used in them.*

14. **Karpov, A. A.,** Kustov, M. V., Männig, D. (2023). Hazard analysis of explosive objects. In Problems of Emergency Situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference (pp. 233–234). Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for collecting, analyzing, and classifying information on the explosive properties of explosive materials used in the manufacture of explosive ordnance.*

15. **Karpov, A. A.** (2023). Technical tools for remote demining. In Round Table “Combining Theory and Practice to Enhance Operational-Rescue Units’ Readiness” (pp. 137–138). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

16. **Karpov, A.,** Kustov, M. (2022). Modern technologies for detecting explosive objects. In Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference (pp. 402–404). Bordeaux, France. <https://eu-conf.com/ua/events/youth-education-and-science-through-today-s-challenges>

*The applicant is personally responsible for identifying the advantages and disadvantages of existing methods for detecting explosive objects.*

17. Kustov, M., Buscham, C., **Karpov, A.** (2024). Methods for detecting explosive substances. In Round Table (Webinar) “Prevention, Response, and Elimination of Emergency Situations” (pp. 159–160). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for identifying the advantages and*

*disadvantages of existing methods for detecting explosive objects.*

18. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V., Basmanov, O. Ye., Kulakov, O. V. (2024). Advanced technologies and methodologies for detecting explosive materials. In International Scientific and Practical Conference “Problems of Emergency Situations” (pp. 183–184). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for conducting a comparative analysis of existing methods and their technical implementation for remote demining within the framework of humanitarian demining.*

19. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2024). Application of ultra-high frequency radiation to improve demining efficiency. In Theory and Practice of Firefighting and Emergency Response: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference (pp. 160). Cherkasy: ChIPB im. Heroiv Chornobylya, NUCZ of Ukraine.

*The applicant is personally responsible for developing a concept for detecting explosive objects using ultra-high frequency radiation.*

20. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2024). Prospective demining technology. In Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists (pp. 406). Kharkiv: NUCZ of Ukraine.

*The applicant personally owns the description of the procedure for conducting humanitarian demining using the electromagnetic sounding method.*

21. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2024). Enhancing the efficiency of land recovery in mined areas of Ukraine. In Environmental Safety in Wartime: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (pp. 136). Lviv: LDUBZhD.

*The applicant personally owns the description of the method of electromagnetic detection of explosive objects of various designs.*

22. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2024). The role of pyrotechnic technologies in ensuring safety and territory restoration. In Current Issues of Fire Safety and Emergency Prevention: Abstracts of the International Scientific and Practical Conference (pp. 187–188). Lviv: LDUBZhD.

*The applicant is personally responsible for analyzing the effectiveness of the electromagnetic detection method for explosive objects of various designs.*

23. Kustov, M. V., **Karpov, A. A.**, Yauzheva, O. O. (2025). Electromagnetic methods for detecting explosive materials. In International Scientific and Practical Conference “Problems of Emergency Situations” (pp. 247–248). Cherkasy: NUCZ of Ukraine.

*The applicant personally owns the description of the method of electromagnetic detection of explosive objects of various designs.*

24. **Karpov, A. A.**, Kustov, M. V. (2025). Electromagnetic detection of explosive substances. In XVI International Scientific and Practical Conference “Theory and Practice of Firefighting and Emergency Response” (pp. 60–61). Cherkasy: NUCZ of Ukraine.

*The applicant personally owns the description of the method of electromagnetic detection of explosive objects of various designs.*

**Patent:**

25. Kustov, M. V., Pospelov, B. B., **Karpov, A. A.**, & Veretennikova, Yu. A. (2024). Method for remote demining [Patent No. u 2023 03960]. Ukraine: F42D 5/04. Filed 21 August 2023; published 1 February 2024, Bulletin No. 5.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	32
ВСТУП .....	33
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЧИЩЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ВІД ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ	42
1.1. Аналіз стану проблеми забруднення територій вибухонебезпечними предметами.....	42
1.1.1. Аналіз особливостей забруднення територій країн світу де відбувались збройні конфлікти.....	42
1.1.2. Особливості забруднення території України у наслідок військових дій.....	47
1.1.3. Аналіз характеристик вибухонебезпечних предметів різного типу.....	50
1.2. Аналіз нормативно-технічної бази України щодо забезпечення цивільної безпеки на територіях, що забруднені ВНП.....	56
1.3. Аналіз методів та способів проведення очищення територій від вибухонебезпечних предметів.....	59
1.3.1. Аналіз існуючих методів та способів виявлення ВНП.....	59
1.3.2. Аналіз існуючих методів та способів знешкодження ВНП.....	67
1.3.3. Особливості проведення гуманітарного розмінування на прикладі України.....	73
1.4. Аналіз досягнень та проблемних питань в галузі дистанційного електромагнітного детектування предметів.....	76
Висновки до розділу 1 .....	79
РОЗДІЛ 2. ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИБУХОВИХ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД ЇХ ФІЗИКО- ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ.....	81

2.1. Класифікація основних вибухонебезпечних матеріалів за їх фізико-хімічними властивостями.....	81
2.2. Вплив фізико-хімічних властивостей вибухонебезпечних матеріалів на умови їх використання.....	87
2.3. Визначення ступеню чутливості вибухонебезпечних матеріалів на дію електромагнітних полів та хвиль.....	94
Висновки до розділу 2 .....	102
<b>РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ХВИЛЬ З ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМИ ПРЕДМЕТАМИ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ.....</b>	<b>104</b>
3.1. Дослідження інтенсивності поглинання вибухонебезпечним матеріалом електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону.....	104
3.1.1. Математичний опис взаємодії довільно падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини....	105
3.1.2. Визначення коефіцієнтів відбиття та переломлення електромагнітної хвилі.....	110
3.2. Математична модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах.....	120
3.3. Математична модель впливу на вибухонебезпечні предмети електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону при довільному куті їх падіння.....	132
3.4. Математична модель дифракції електромагнітних хвиль на багат шаровій структурі вибухонебезпечного предмету.....	137
3.4.1. Математична модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь багат шарову структуру .....	137
3.4.2. Встановлення ступеня ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні вибухонебезпечного предмету.....	141

3.5. Перевірка працездатності розроблених моделей взаємодії електромагнітних полів та хвиль на вибухонебезпечні предмети різного конструктивного виконання.....	150
Висновки до розділу 3 .....	158
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ.....	161
4.1. Спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону.....	161
4.2. Алгоритм та процедура реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.....	169
4.3. Оцінка ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання...	178
4.4. Експериментальна перевірка працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання.....	185
4.4.1. Розробка функціональної схеми електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів.....	185
4.4.2. Результати експериментальної перевірки працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.....	189
4.5. Розробка практичних рекомендацій щодо використання методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.....	195
Висновки до розділу 4 .....	198
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	201
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	204
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації .....	222
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів досліджень .....	227

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЕНІ - explosive hazards items;
- ЕОД - Explosive Ordnance Disposal;
- ІСРС - Міжнародний комітет Червоного Хреста;
- ІМАС - International Mine Action Standards;
- FNА - аналіз швидких нейтронів;
- TNT - тринітротолуол;
- РЕТ, ТЕН – пентаеритриттетранітрат;
- PFNA - імпульсний аналіз швидких нейтронів;
- TNA - аналіз теплових нейтронів;
- ВМ – вибухонебезпечні матеріали;
- ВНП - вибухонебезпечний предмет;
- ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;
- ЄДС ЦЗ – Єдина державна система цивільного захисту;
- КМУ – Кабінет Міністрів України;
- МВС – Міністерство внутрішніх справ України;
- НВЧ – хвилі надвисоких частот;
- НС – надзвичайні ситуації;
- ОБСЄ - Організація з безпеки і співробітництва в Європі;
- РТК – робототехнічний комплекс;
- СОП - стандартні операційні процедури;
- США – Сполучені Штати Америки;
- ТНРС – триніт-рорезорцинат свинцю.

## ВСТУП

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

Унаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україну майже половина території нашої держави потенційно була забруднена мінами та вибухонебезпечними предметами (ВНП). Площа території, яка потребує очищення від ВНП, складає 185 тисяч квадратних кілометрів [1].

На сучасному етапі всі передові держави розробляють технології підвищення безпеки рятувальників [2]. Основним показником безпеки є оцінка ризику людини при знаходженні в агресивному середовищі [3]. Найефективнішим підходом забезпечення безпеки є завчасне прогнозування наслідків надзвичайної ситуації [4] та характеру небезпеки з якою рятувальник може стикнутися [5]. Однак, не зважаючи на суттєвий технічний прогрес, процес розмінування залишається одним з найнебезпечніших сфер дії рятувальників. Протипіхотні наземні міни є однією з головних причин жертв цивільного населення в районах, уражених конфліктом, і значною перешкодою для післявоєнної відбудови [6]. Незважаючи на технологічний прогрес двадцять першого століття, досягнутий західними військовими для розмінування та видалення саморобних вибухових пристроїв, гуманітарне розмінування здебільшого спирається на технології середини двадцятого століття [7].

Ситуація суттєво ускладнюється тим, що розміщення мін на території мінування не відомо внаслідок того, що активним мінуванням займались не лише Збройні Сили України, але й військові підрозділи ворога. Особливу небезпеку представляє те, що при цьому використовувались ВНП з різними конструкційними особливостями, включаючи саморобні. Це призведе до неможливості повернення евакуйованого населення до своїх домівок на визволених територіях, неможливості відновлення роботи промислового та сільськогосподарського комплексів. Тому на сьогодні першочерговою задачею оперативно-рятувальних сил цивільного захисту ДСНС України є

якнайшвидше очищення місцевості від ВНП. Для розв'язання цієї задачі піротехнічні підрозділи ДСНС України використовують різні методи виявлення та деактивації ВНП. Однак, незважаючи на активну та професійну роботу піротехнічних підрозділів та наявність у них новітніх зразків техніки та приладів для розмінування, спостерігаються випадки неконтрольованого підриву ВНП. Внаслідок цього є випадки загибелі та травмування працівників ДСНС України та пересічних громадян. Це, перш за все, пов'язано з тим, що широкого розповсюдження набули ВНП із мінімальним вмістом металевих компонентів або взагалі без них.

Для спрощення роботи саперів та підвищення їх безпеки існує необхідність у встановленні загальних закономірностей та відпрацюванні загальних правил безпеки з вибухонебезпечними предметами.

Найбільш вагомими науковими результатами в даній галузі отримані в роботах вітчизняних та закордонних вчених: Толкунов І.О. [8], Устименко В.О. [9], Невлюдов І. Ш. [10], Williams D. P. [11], Armstrong R.W. [12], Daniels D. J. [13], Wilson J. [14] та ін.

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 [15]. 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. Наукові дослідження в цій сфері активно розвиваються, пропонуючи нові рішення і поліпшення.

Таким чином, розробка методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у науково-дослідній лабораторії радіаційного, хімічного та біологічного захисту навчально-наукового інституту інженерної та спеціальної підготовки Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси) відповідно до Постанови КМУ від 01.03.2024 №220 «Середньострокові пріоритетні напрями інноваційної діяльності загальнодержавного рівня на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні», наказу МВС України №326 від 21.05.2024 «Про затвердження тематики наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок на 2025-2029 роки» та у рамках науково-дослідної роботи «Дослідження впливу електромагнітного випромінювання на поведінку вибухонебезпечних предметів» (№ ДР 0124U000287), в якій здобувач був відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності дій піротехнічних підрозділів шляхом розробки методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання, включаючи вибухонебезпечні предмети із незначним вмістом металевих елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні науково-технічні задачі:

1. Проаналізувати існуючі підходи до очищення територій від вибухонебезпечних предметів.
2. Встановити залежності вибухових та електромагнітних властивостей вибухонебезпечних матеріалів від їх фізико-хімічних властивостей.
3. Розробити математичні моделі взаємодії електромагнітних полів та хвиль з вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання.
4. Розробити метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання, оцінити його ефективність та адекватність.

**Об’єкт дослідження.** Процес детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання за допомогою електромагнітного опромінення.

**Предмет дослідження.** Параметри взаємодії електромагнітного випромінювання з вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання при їх детектуванні.

**Методи дослідження.** Для розв’язання поставлених наукових завдань у дисертаційному дослідженні використовувалися методи математичного та імітаційного моделювання, теорії управління і проведення наукових досліджень, теорії електродинаміки та електропровідності.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу в галузі цивільної безпеки – розроблено метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання, включаючи вибухонебезпечні предмети із незначним вмістом металевих елементів, що підвищує безпеку роботи піротехнічних підрозділів та якість виявлення таких предметів.

При виконанні дисертації отримано нові наукові результати:

1. *Вперше* розроблено математичну модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах, яка враховує діелектричні властивості та хвильовий опір вибухонебезпечного матеріалу під час опромінення, а також амплітуду та хвильове число електромагнітної хвилі, що опромінює, враховує кінцевий розмір вибухонебезпечного предмету та дозволяє визначити частки потужності електромагнітної хвилі, що поглинається вибухонебезпечним матеріалом та відбивається від його поверхні.

2. *Вперше* розроблено електродинамічну модель дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв’язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами, яка враховує діелектричну та магнітну проникність середовища та тангенс кута діелектричних втрат для речовин, з

яких вироблені корпус вибухонебезпечного предмету та детонатору, самого вибухонебезпечного матеріалу та виду ґрунту у товщі якого знаходиться вибухонебезпечний предмет, та яка дозволяє вирішувати задачі оцінки ефективності використання приладів електромагнітного детектування з урахування особливостей замінованої території.

3. *Вперше* розроблено метод сукупного електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання, який базується на розроблених математичних моделях дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених та багат шарових вибухонебезпечних предметах при довільному куті їх падіння, яка, на відміну від існуючих, дозволяє проводити виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних елементів та підвищує селективність дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів промислового та нелегального виробництва, як у заглибленому так і незаглибленому розміщенні.

4. *Удосконалено* математичну модель взаємодії електромагнітних хвиль з поверхнею вибухонебезпечних предметів під довільним кутом падіння, яка враховує ТМ та ТЕ поляризацію електромагнітних хвиль та діелектричні властивості всіх складових елементів вибухонебезпечних предметів та яка дозволяє розраховувати енергетичні коефіцієнти відбиття та переломлення таких хвиль та визначати оптимальні кути опромінення ймовірних місць розташування вибухонебезпечних предметів при яких забезпечується максимальна селективна здатність.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробці нових підходів до забезпечення належного рівня цивільної безпеки при проведенні очищення територій від вибухонебезпечних предметів. Запропонований метод електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів дозволяє підвищити ймовірність дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних елементів, що в свою чергу підвищує безпеку, якість та швидкість

проведення гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами ДСНС України та іншими гуманітарними організаціями при очищенні деокупованої території.

Розроблені в дисертації математичні моделі взаємодії електромагнітних полів та хвиль з вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання та функціональна схема електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів дозволяє розробляти нові та удосконалювати існуючі технічні засоби та прилади дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів, як промислового так і нелегального виробництва. Отримані у роботі закономірності дозволяють підвищити якість обробки отриманих при детектуванні сигналів.

Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи доведено до рівня конкретних алгоритмів дій та прикладних рекомендацій. Отримані в дисертації результати можуть бути використані для розробки та удосконалення технічного обладнання для детектування ВВП, а також при складанні стандартних операційних процедур для проведення гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами ДСНС України та гуманітарними організаціями різної форми підпорядкування.

Основні результати дисертаційного дослідження були впроваджені в підрозділах Головного управління ДСНС України у Харківській області, у практичну діяльність Міжрегіонального центру гуманітарного розмінування та швидкого реагування ДСНС України, у практичну та наукову діяльність Науково-дослідного лабораторно-експериментального центру ТОВ «Бранд Трейд», а також в навчальному процесі Національного університету цивільного захисту України (м. Черкаси).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто і наведені в роботах [16-40]. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, особисто здобувачу належать: у роботі [16] - аналіз фізичних та хімічних властивостей вибухових речовин, ідея їх класифікації у три групи та аналіз отриманих

даних; в роботі [17] - математичний опис процесу взаємодії електромагнітного поля із вибухонебезпечною речовиною та графічна інтерпретація отриманих моделей; в роботі [18] - розробка моделі дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах та аналіз отриманих графічних залежностей; в роботі [19] - розробка моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини та графічна інтерпретація отриманих моделей; в роботі [20] - отримання залежностей для розрахунку коефіцієнтів відбиття та поглинання електромагнітних хвиль об'ємом вибухонебезпечного матеріалу; в роботі [21] - отримання моделей взаємодії електромагнітних хвиль із багат шаровою структурою вибухонебезпечного предмету та аналіз отриманих результатів; в роботі [22] наведено результати експериментальної перевірки працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів та здійснено аналіз його ефективності; в роботі [23] розглянуто основні технічні вимоги до розроблення електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних матеріалів, здійснено моделювання ймовірності їх виявлення за різних умов та розроблено алгоритм реалізації методу; в роботах [24, 25] - порівняльний аналіз існуючих методів та способів виявлення вибухонебезпечних предметів з різними конструкційними особливостями; в роботі [26] - порівняльний аналіз існуючих технічних засобів виявлення та дезактивації вибухонебезпечних предметів з різними конструкційними особливостями; [27, 33] – порівняльний аналіз існуючих методів та їх технічної реалізації щодо проведення дистанційного розмінування у межах гуманітарного розмінування; в роботі [28] - збір, аналіз та класифікація інформації щодо найбільш поширених вибухонебезпечних предметів на території України та вибухових матеріалів, що в них використовуються; в роботі [29] - збір, аналіз та класифікація інформації щодо вибухових властивостей вибухонебезпечних матеріалів, що використовуються при виготовленні бойових вибухонебезпечних предметів; в роботах [31, 32] - визначення переваг та недоліків в існуючих методах

виявлення вибухонебезпечних предметів; в роботі [33] – розробка концепції виявлення вибухонебезпечних предметів із використанням надвисокочастотного випромінювання; в роботі [35] - опис процедури проведення гуманітарного розмінування за допомогою методу електромагнітного зондування; в роботі [36, 38, 39] – опис методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання; в роботі [37] - аналіз ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання; в роботі [40] – опис способу дистанційного розмінування за допомогою електромагнітного детектування.

**Апробація результатів дисертаційного дослідження.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення» (м. Львів, Україна, 2022 та 2024 р., форма участі – заочна); круглому столі «Об’єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням» (м. Харків, Україна, 2022 р., форма участі – очна); Міжнародних науково-практичних конференціях «Problems of Emergency Situations» (м. Харків, Україна, 2022, 2023, 2024 та 2025 рр., форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022)” (м. Харків, Україна, 2022 р., форма участі – очна); XII Міжнародна науково-практична конференція. (м. Бордукс, Франція, 2022 р., форма участі – заочна); XII Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, Україна, 2022 р., форма участі – очна); круглому столі (вебінарі) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». (м. Харків, Україна, 2023 та 2024 рр., форма участі – очна); XV Міжнародній науково-практичній конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій»

(м. Черкаси, Україна, 2024 р., форма участі – очна); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених (м. Черкаси, Україна, 2024 р., форма участі – очна); V міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека в умовах війни» (м. Львів, Україна, 2024 р., форма участі – заочна).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 25 наукових праць: 8 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Academic Research Index – ResearchBib, Ulrich’s Periodicals Directory, Root Indexing, Ulrich Web, Cite Facto (з них 3 статті – у виданнях, яке входить до міжнародної наукометричної бази Scopus), 16 тез доповідей на конференціях та 1 патент на корисну модель.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота загальним об’ємом 234 сторінок складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 142 найменувань і 2 додатки, містить 54 рисунки та 9 таблиць.

## **РОЗДІЛ 1.**

### **АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО ОЧИЩЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ВІД ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ**

У даному розділі проведено аналіз стану проблеми забруднення територій вибухонебезпечними предметами. Проаналізовані особливості забруднення територій країн світу де відбувались збройні конфлікти та особливості забруднення території України у наслідок військових дій. Проведено аналіз характеристик вибухонебезпечних предметів різного типу та аналіз нормативно-технічної бази України щодо забезпечення цивільної безпеки на територіях, що забруднені ВВП. Проведено аналіз методів та способів проведення очищення територій від вибухонебезпечних предметів. Проаналізовані існуючі методи та способи виявлення та знешкодження ВВП. Встановлено особливості проведення гуманітарного розмінування на прикладі України. Проаналізовано досягнення та проблемні питання в галузі дистанційного електромагнітного детектування предметів.

Основні результати розділу викладені у публікаціях [24-27, 29-33, 37].

#### **1.1. Аналіз стану проблеми забруднення територій вибухонебезпечними предметами**

##### **1.1.1. Аналіз особливостей забруднення територій країн світу де відбувались збройні конфлікти**

Новітні досягнення науково-технічного прогресу у оборонно-промисловому комплексі, несуть за собою зростання різновидів та смертоносності засобів ураження. Одну із найдавніших історій має мінна зброя. Кілька століть тому, людина вперше почала використовувати порохову енергію вибуху. Її використовують для вбивства та каліцтва живої сили, ушкодження та подальше виведення з ладу техніки, шляхом впливу вибуху та осколками. Як показує практика, під час військових конфліктів,

мінна зброя несе за собою не лише втрати для військових підрозділів, а й для мирного населення, серед яких значну частину становлять діти.

Жодного воєнного конфлікту не проходило без застосування мінної зброї. Великі території забруднені вибухонебезпечними предметами (ВНП), які закладають хаотично та без фіксування у відповідних документах. Основною метою використання мінної зброї є каліцтво та смерть особового складу, виведення техніки із ладу, шляхом взаємодії на них енергії вибуху та осколків. На превеликий жаль, велика кількість спрацювань зафіксована по мирному населенні, переважна більшість з яких діти.

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.

Більшість держав світу займається розробкою власної зброї на основі вибухонебезпечних предметів. Крім цього різні терористичні організації займаються нелегальним виготовленням вибухових приладів. В наслідок цього у світі існує широке різноманіття вибухонебезпечних предметів з різними системами доставки, ініціації, вибуху. Це приводить до значних складностей при їх розмінуванні та деактивації. Пошук вибухонебезпечних матеріалів набув своєї актуальності відразу від початку активного використання таких предметів в якості зброї. На сьогодні активність використання мін військовими різних конфліктів набуло масовий характер, а активність збройних конфліктів нажалі не згасає. Довжина лінії бойового зіткнення може досягати тисячі кілометрів, що у поєднанні із довгою тривалістю військових дій призводить до щільного забруднення

вибухонебезпечними предметами десятків тисяч квадратних кілометрів території. Яскравим прикладом цього є військові дії на території України [41]. В таких умовах вкрай актуальним стає питання швидкого та безпечного очищення території від небезпечних вибухових предметів. Питаннями гуманітарного розмінування в різних країнах світу займаються різні структури та відомства, але основну роботу виконують державні рятувальні підрозділи та цивільні волонтерські організації. Основною проблемою при проведенні гуманітарного розмінування є саме виявлення вибухонебезпечних матеріалів, що пов'язано із їх значною різноманітністю [42].

Окрім України досвід гуманітарного розмінування активно накопичується в різних країнах світу. Зокрема, Камбоджа є однією з найбільш забруднених мінними полями країн, де працюють як місцеві, так і міжнародні організації. В Афганістані для розмінування активно застосовують інноваційні технології, зокрема дрони. У Колумбії проблема мінування виникла через тривалий збройний конфлікт, і процес очищення територій залишається складним. Хорватія демонструє технологічно розвинені підходи до розмінування, напрацьовані після війни на Балканах.

Постановка протипіхотних та протитанкових мін є дієвим способом оборони на полі бою. На сьогодні активно розробляються засоби дистанційного мінування, що суттєво збільшило площі територій забруднених вибухонебезпечними матеріалами. Звичайно що протимінна боротьба стикається із класичною проблемою протистояння систем ураження та захисту від них. Тобто із розробкою ефективних методів та способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних матеріалів розробляються новітні рішення щодо скритності таких предметів. Питання очищення територій від вибухонебезпечних предметів додатково ускладнюється широким різноманіттям конструкцій та матеріалів із яких виготовляються вибухонебезпечні предмети. Окрім стандартних мін можуть зустрічатися інші види боєприпасів (гранати, снаряди тощо). Окремим класом вибухонебезпечних предметів є предмети виготовлені власноруч, які

використовують диверсійні та терористичні угруповання. В таких випадках різноманіття конструкцій та матеріалів стає практично необмежним.

2022 рік продемонстрував всьому світу суттєве зростання небезпек різного характеру. Нажаль у 2025 році ця тенденція лише зростає. В останні роки суттєво збільшується кількість надзвичайних ситуацій природного, техногенного, соціального та військового характерів [43]. Не зважаючи на те що розвинені країни світу інтенсифікують розвиток технологій та організаційних підходів безпекового характеру ризику для життя та здоров'я людини зростають [44]. Розвиток загального стану безпеки в окремому регіоні має декілька стадій та напрямів. Перш за все це оцінка рівня ризику [45]. Для цього необхідна наявність повної та достовірної інформації, яку можна зібрати під час якісного моніторингу [46]. По-друге, розробка сучасних методів та засобів попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій різного характеру [47].

Наявність великої кількості активних військових конфліктів супроводжуються новими, більш масштабними загрозами [48]. Основними з таких загроз є мінна небезпеки та ризик використання зброї масового ураження. Якщо ризик масштабного забруднення території та водних екосистем [49] небезпечними хімічними та радіоактивними матеріалами унаслідок використання зброї масового ураження залишається потенційним [50], то загрози для мирного населення від вибухонебезпечних предметів є сумною реальністю вже зараз [51]. Так, наприклад, в Україні більше 15 % території є потенційно забрудненими вибухонебезпечними предметами. Технології та методики пошуку та знешкодження вибухонебезпечних матеріалів останнім часом суттєво розвинулись [52]. До основних методів відносяться: магнітний та ультразвуковий. Однак основним недоліком цих методів є мала дальність виявлення [24]. Це призводить до двох негативних наслідків. По-перше рятувальники для виявлення ВМ повинні наблизитись до нього на небезпечну відстань, що деколи призводить до травмування та загибелі унаслідок неконтрольованого підриву. По-друге мала дальність

виявлення призводить до низьких темпів обстеження території, що є неефективним у випадку, коли площа обстеження становить декілька сотень квадратних кілометрів [53]. Останнім часом активно розвивається візуалізаційний метод із використанням інструментів штучного інтелекту, який дозволяє автоматично розпізнавати предмети на поверхні землі [54]. Цей метод дозволяє швидко обстежувати значну площу території, але недосконалість технології штучного інтелекту призводить до суттєвих похибок. Додатковими перепонами такого методу є розташування ВМ у щільній рослинності та під шаром ґрунту, що практично унеможливорює пошук візуалізаційним методом.

Додатковим негативним фактором, який знижує ефективність існуючих методів виявлення та знешкодження ВМ є поширене використання вибухонебезпечних предметів із суттєво різними конструктивними особливостями, які вимагають специфічного підходу [55]. Так, наприклад, широкого використання набули безоболонкові ВМ та ВМ без металевих конструкційних матеріалів. Це практично повністю не дозволяє використовувати найбільш поширений та відпрацьований магнітний метод детектування ВМ [56].

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 [25]. Важливим показником безпеки є оцінка ризику людини в складних ситуаціях [57].

Найбільш ефективним підходом до забезпечення безпеки є передбачення наслідків надзвичайної ситуації [26] та характеру небезпек, з якими можуть зіткнутися рятувальники. Ліквідація наслідків вибуху вимагає величезних фінансових ресурсів і великої кількості персоналу [58]. Незважаючи на технологічний прогрес, розмінування залишається однією з найнебезпечніших сфер для рятувальних команд [29]. Протипіхотні міни є

однією з основних причин жертв серед цивільного населення на територіях, що постраждали від конфлікту, і головною перешкодою для післявоєнної реконструкції [59].

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 [60]. 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.

### **1.1.2. Особливості забруднення території України у наслідок військових дій**

На сьогоднішній день, через ведення воєнних дій в Україні, площа забрудненої території вибухонебезпечними предметами (ВНП) складає 185 тисяч квадратних кілометрів. Найбільш розповсюдженими ВНП є: протипіхотні фугасні міни, міни пастки, протитанкові міни фугасної дії, протипіхотні міни осколкової дії, протитанкові міни дистанційного мінування.

Активні бойові дії на території України за останні 10 років призвели до забруднення значної території держави вибухонебезпечними предметами, що містять вибухонебезпечні матеріали (ВМ). При цьому використовувались різноманітні вибухонебезпечні предмети, включаючи саморобні та безоболонкові. При деокупації територій виникає небезпека для населення та персоналу, що повертаються з евакуації. Тому на сьогодні в Україні першочерговою задачею є очищення місцевості від вибухонебезпечних предметів. Для розв'язання цієї задачі використовуються різні методи для їх

виявлення та деактивації [61]. Однак для очищення території України від ВМ при використанні існуючих методів та технічних приладів потребує десятки років пошукових робіт. Підвищення інтенсивності роботи, призводить до зростання ризику неконтрольованого підриву ВМ та неповного очищення території. Все це вимагає активізувати роботу по пошуку та розробці нових методів виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів. Такі методи повинні базуватись на нових принципах роботи для забезпечення умов швидкого сканування території великого масштабу та дистанційної деактивації ВМ.

Практичні підрозділи гуманітарного розмінування користуються приладами аналізу магнітного поля, які є простими та дешевими однак ефективно працюють лише на малих відстанях для пошуку ВМ з металевими оболонками [62]. Виходячи з того, що останнім часом широкого використання на полі бою набули ВМ без металевих елементів спостерігаються випадки неконтрольованого підриву ВМ, що призводить до загибелі та травмування людей. Неконтрольовані підриви ВМ обумовлені наявністю широкого кола вибухонебезпечних предметів, зокрема з мінімальним вмістом металевих компонентів. Тому існуючі методи виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів показали свою недостатню ефективність.

Оперативне розмінування доріг та населених пунктів буде здійснено впродовж року, втім на повне розмінування піде багато часу. Аналіз досвіду застосування ВМП у локальних війнах і збройних конфліктах показує, що застосуванню мін притаманні такі характерні риси: замість протяжних мінних полів, зазвичай встановлюються невеликі групи мін і навіть окремі міни; мінні групи й окремі міни найчастіше ставлять безсистемно і не фіксують у документах, розповсюджується установка керованих мін; мінні поля; використовується величезна кількість мін, детонаторів і вибухових речовин кустарного та саморобного виготовлення, небезпечних у виробництві і застосуванні для самих виробників. Розмінування ВМП в таких

випадках потребує знання та аналізу технічної складової вибухового приладу та хімічних властивостей вибухонебезпечних матеріалів.

Стан мінної безпеки в Україні залишається критичним через масштабне замінування територій унаслідок військових дій. На сьогодні потенційно небезпечними є понад 140 тисяч квадратних кілометрів, що потребують гуманітарного розмінування. Основні зусилля зосереджені на звільнених територіях, де піротехнічні підрозділи активно очищують землі від мін і вибухонебезпечних залишків. За інформацією станом на 2024 рік, знешкоджено понад 117 тисяч вибухонебезпечних предметів (ВНП), очищено дороги, залізничні шляхи та інші важливі об'єкти інфраструктури [30].

Пріоритетними залишаються аграрні землі, адже відновлення їхньої безпеки є важливим для стабілізації економіки. Використовуються сучасні технології, зокрема дрони, георадари та роботизовані системи, що пришвидшують процес і зменшують ризики для саперів. Однак робота ускладнюється через активні бойові дії та масштабність забруднених територій. Повне розмінування може зайняти десятиліття, але частина територій планується очистити протягом кількох років завдяки підтримці міжнародних організацій і передовому обладнанню.

Внаслідок широкомасштабних військових дій за останні 10 років майже третина території України забруднена ВНП (мінами, боеприпасами, що не вибухнули, тощо). Територія, що потребує очищення від ВНП, охоплює понад 185 тис. км<sup>2</sup>. Дороги та населені пункти розмінуються 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 окремі 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.

### 1.1.3. Аналіз характеристик вибухонебезпечних предметів різного типу

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 [37]. Оскільки вибухи відбуваються в умовах швидкої хімічної реакції, правила безпеки при застосуванні ВР визначаються насамперед їхніми фізико-хімічними властивостями.

Звичайно, що основним осередком небезпеки вибухонебезпечних предметів є вибухонебезпечні матеріали, які складають їх основу. Виходячи з того, що вибух це швидкоплинне протікання хімічної реакції, тому правила безпеки з вибуховими матеріалами визначаються перш за все їх фізико-хімічними властивостями.

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 [63]. Однак, незважаючи на широке розмаїття конструктивних особливостей боєприпасів, основну небезпеку становить сама ВР [64]. Втім, саме ініціювання вибухової реакції таких матеріалів намагаються запобігти всі рятувальні команди.

Характерні ознаки, підозрілих предметів, що можуть вказати, що він відноситься до ВНП:

- предмет знаходиться в людному місці чи у транспорті без нагляду, ящик, коробка, рюкзак, валіза, сумка, тощо;
- схожа будова на ВНП чи саморобний вибуховий пристрій;
- присутність на виробі мотузок, дротів, ниток, що тягнуться від предмету;
- наявність антен, годинникових або електронних таймерів, акумуляторів чи батарейок;

- присутність не характерних, підозрілих звуків, наприклад цокання годинника, періодичних сигналів);
- підозрілий запах (хімічних речовин чи пального, газу, тощо);
- присутність не характерних деталей, що не призначенні для даного предмету;



Рис. 1.1. Саморобні вибухонебезпечні предмети

Найбільш часто виявленими ВНП, являються артилерійські снаряди, інженерні боєприпаси, гранати та гранатометні постріли, мінометні міни, авіаційні бомби, підривники до різних боєприпасів, набої.

Ініціюючі пристрої (зосереджені заряди та заряди на розтяжках) – велика кількість вибухової речовини, що розміщена в одному місці або розміщені в ящиках, балонах, ємностях, котрі можна ініціювати як дистанційно, так і поставити на підривання після механічної дії на нього чи годинникові механізми. Заряди на розтяжках характеризуються натяжними дротами чи ліскою, котрі ведуть до них, задачею таких ВНП травмувати людей.



Рис. 1.2. Зосереджені заряди та заряди на розтяжках

Міна-пастка - спеціалізований механізм, який з зовнішнього вигляду являє собою звичайний предмет, але в нього встановлений ініціюючий підрильник, котрий приводить в дію ВР. Зазвичай їх маскують у вигляді предметів щоденного користування. Пристосований для того, щоб убивати чи завдавати ушкоджень. Ініціація відбувається раптово, коли відбувається якась маніпуляція з міною пасткою.



Рис. 1.3. Зразок міни-пастки

Протипіхотна міна – інженерний боєприпас, призначений для ураження живої сили противника від дії вибуху ВР та осколкового ураження. В залежності від модифікації міна може вражати декілька людей, та має різний радіус розльоту осколків.



Рис. 1.4. Протипіхотні міни (ПМН-2, ОЗМ-72, ПОМ-2)

ПМН-2 має характерну хрестоподібну гумову натискну пластину, призначену для обмеження чутливості міни до надлишкового тиску вибухової хвилі. Корпус міни виготовлений із пластику. В міні використовується більш потужна вибухова речовина ТГ-40 на основі гексогену (RDX).

Серед протипіхотних мін осколкової дії розглядаються МОН-90 та ПОМ-3. МОН-90 з великою дистанцією ураження до 90 м. Вона має два різних типи підрильників. Частина, з якої формуються уламки міни, складається з 2 000 елементів із рубаної сталі. ПОМ-3 є новим типом протипіхотної міни, призначеної для дистанційного мінування. Основний корпус міни циліндричний і має шість підпружинених опор. ПОМ-3 містить певний тип сейсмічного датчика, який встановлюється в землю під міною, що знаходиться у вертикальному положенні. ПОМ-3 не оснащена розтяжками.

Протитанкові міни – інженерний боєприпас, призначені для виведення з ладу або знищення ворожої техніки, як легко так і броньованої. Такі міни приводять в дію, зазвичай, при наїзді на неї. Ініціюванні відбувається від нажимної дії мінімум 150 кг.



Рис. 1.5. Протитанкові міни (ТМ-62, ПТКМ-1Р)

Серед проти транспортних фугасних мін обрані міни ТМ-62ПЗ та ПТМ-3. ТМ-62ПЗ це велика протитранспортна фугасна міна у поліетиленовому корпусі. Міна має одне велике центральне гніздо для підричника й проміжний детонатор, установлений в основу міни. Проміжний детонатор містить 180 г пресованого тротилу. ПТМ-3 це протитранспортна міна дистанційного мінування з магнітним підричником. Міна призначена для ураження броньованого днища танку. Ця міна споряджена кумулятивним зарядом вибухової речовини ТГ-40 (гексоген (RDX) / тротил (TNT) 60/40) масою 1 800 г.

Касетні боєприпаси (артилерійські снаряди, авіаційні бомби, боєприпаси з реактивних систем залпового вогню типу «ГРАД», «УРАГАН», «СМЕРЧ», «ТОРНАДО»), це особливий елемент озброєння, тому що касетними боєприпасами споряджають різноманітні ВВП, а сам касетний елемент являє собою не велику кількість ВР в корпусі, більшість з них містять у собі самоліквідатор, котрий спрацьовує по закінченню терміну, що призводить до вибуху.



Рис. 1.6. Касетні елементи ( ПТАБ-2,5, 9Н24/210/235, ПФМ-1)

ПФМ-1 це протипіхотна міна, яка розкидається за допомогою артилерійських реактивних засобів або скидається з літальних апаратів. Міну можна порівняно легко виявити, і хоча підривник виготовляється переважно з алюмінію, в ньому присутні сталеві компоненти (пружини, стопорні кульки й т. ін.). Як різновид мін для дистанційного мінування, ці вироби зазвичай знаходять на поверхні.

Артилерійські боєприпаси призначені для ведення стрільби із артилерійських гармат та гаубиць, пускових установок. За призначенням бувають осколкові, осколково-фугасні, димні, освітлюючі, броньобійні, запалювальні, бетонобійні, тощо). Артилерійські боєприпаси, також поділяться за калібрами:

малий калібр – до 70 мм;

середніх калібр – від 70 до 155,5 мм,;

великих калібр – понад 155,5 мм.



Рис. 1.7. Артилерійські боєприпаси

Мінометна міна вид артилерійського озброєння, призначений для навісного обстрілу живої сили противника, котра знаходиться в укриттях цілей, а також для знищення польових укріплень. Характерною особливістю даного виду ВВП є каплеподібна форма та оперіння на хвостовій частині, де знаходиться вишибний патрон. Їхні підрильники дуже чутливі до механічного виливу.

При дослідженні розглядалися найбільш поширені у Східній Європі вибухонебезпечні предмети. Серед протипіхотних фугасних мін обрані ПМН-2, ПФМ-1.

Таким чином, аналіз стану цивільної безпеки України у розрізі проблем наявності неконтрольованих ВВП показав, що України відноситься до країн із найбільшою площею території, яка забруднена ВВП. Більше 180 тис. км<sup>2</sup> потребують термінового розмінування. Ця проблема несе великі ризики для життя та здоров'я населення, а також відчужує великі площі сільськогосподарських земель. Додатковою проблемою є широкий спектр конструкційних особливостей ВВП, якими забруднена територія. До таких ВВП відноситься, як штатна зброя країн СРСР та НАТО, так і саморобні ВВП. Це призводить до того, що значну частину представляють ВВП із неметалевими конструкційними елементами, що ускладнює їх пошук із використання стандартних методів детектування.

## **1.2. Аналіз нормативно-технічної бази України щодо забезпечення цивільної безпеки на територіях, що забруднені ВВП**

Ключовим документом, яким регламентується проведення робіт по очищенню територій від ВВП є Кодекс цивільного захисту України №5403-VI від 02.10.2012, який визначає повноваження ДСНС у забезпеченні безпеки населення. Дії підрозділів регулюються Статутом дій в надзвичайних ситуаціях органів і підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного

захисту [65] та відомчими інструкціями з розмінування [наказ МНС №791 від 20.09.2010]. Згідно цих документів застосування вибухових технологій дозволяється під час виконання завдань з нетехнічного та технічного обстеження територій на наявність ВВП, проведення піротехнічних робіт та гуманітарного розмінування, спеціальних вибухових робіт, транспортування виявлених ВВП, знешкодження (утилізацію) боєприпасів та інших ВВП, отримання, транспортування та зберігання (за потреби) вибухових речовин та засобів підризу здійснюють піротехнічні підрозділи згідно із законодавчими та іншими організаційно-розпорядчими документами.

Окремо встановлено Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС [наказ МНС №312 від 07.05.2007], що містять вимоги щодо захисту особового складу при роботах з вибуховими предметами.

Реагування на НС, пожежі, небезпечні події, проведення АРІНР, розмінування (гуманітарного розмінування), евакуацію та життєзабезпечення населення, доставку гуманітарної допомоги (гуманітарних вантажів), забезпечення функціонування пунктів надання допомоги населенню, надання домедичної та психологічної допомоги постраждалим, забезпечення аварійним електроживленням об'єктів критичної інфраструктури, відновлювальні роботи та облаштування фортифікаційних споруд підрозділи ОРС ЦЗ здійснюють у підконтрольних населених пунктах і територіях: за умови відсутності загрози життю і здоров'ю особового складу; у взаємодії з підрозділами Збройних Сил України, Національної поліції України, Національної гвардії України, Державної прикордонної служби України та місцевими органами виконавчої влади; за умови супроводження підрозділу ОРС ЦЗ представниками підрозділів Збройних Сил України, Національної поліції України, Національної гвардії України, Державної прикордонної служби України в разі виконання завдань за призначенням у районах (на територіях), де можлива діяльність диверсійно-розвідувальних груп противника.

ДСНС видала низку стандартних операційних процедур (СОП), зокрема СОП 10.10-40/ДСНС «Заходи безпеки під час розмінування» [66], що регламентує загальні правила безпеки для піротехнічних підрозділів під час вилучення та знешкодження ВВП. Інша важлива інструкція – СОП 05.10/ДСНС “Управління інформацією щодо виконання заходів протимінної діяльності” (доручення №В-389 від 27.10.2021), яка визначає порядок обліку і передачі даних про виявлені вибухові предмети. Таким чином, правова база в Україні забезпечує керівництво діями саперів та встановлює обов’язкові процедури для гарантування безпеки.

Україна орієнтується на найкращі світові практики протимінної діяльності, зокрема на серію міжнародних стандартів IMAS (International Mine Action Standards). Базовим документом є IMAS 01.10 “Guide for the application of IMAS”, що містить глосарій термінів і принципи впровадження стандартів у національні програми. Для управління операціями розмінування використовується IMAS 07.10 “Guide to mine action operations management”, який описує організацію робіт, планування та контроль якості під час гуманітарного розмінування.

Міжнародні організації, такі як *Женева міжнародний центр гуманітарного розмінування (GICHD)*, публікують посібники та огляди з підводного розмінування. Наприклад, збірник ОБСЄ 2013 р. включає переклади IMAS та IMAS-подібних технічних настанов, що допомагає уніфікувати термінологію та підходи в Україні. Загалом, дотримання IMAS забезпечує, щоб розмінування проводилось безпечно, ефективно та з урахуванням гуманітарних пріоритетів.

Україна є учасницею Оттавської конвенції, що забороняє використання протипіхотних мін. Крім того, діяльність у цій сфері регулюється наказами Міністерства оборони України.

Таким чином, встановлено, що в Україні створена нормативно-правова база, яка достатня для ефективного виконання завдань по очищенню територій від ВВП та яка базується на міжнародних актах та процедурах. Всі

роботи по розмінуванню території України проводяться у відповідності з Женевським міжнародним центром гуманітарного розмінування.

### **1.3. Аналіз методів та способів проведення очищення територій від вибухонебезпечних предметів**

#### **1.3.1. Аналіз існуючих методів та способів виявлення ВВП**

Мінна війна отримала два вектори розвитку. Перший вектор, пристосування до канонів сучасної маневреної війни. Методи ручного мінування стали більш досконалішими, додалися засоби дистанційного мінування, що підвищує динаміку ведення бойових дій. Другий вектор це катастрофічне відставання засобів виявлення та розмінування, що робить мінну війну більш ефективною. ВВП застосовують не тільки на мінних полях, а й за межами. Окрім цього, використання примітивного, але безвідмовного в точності пошуку щупа, стає неможливим, через вдосконалення мін, які спрацьовують до моменту, як сапер їх виявить [67].

Особовий склад підрозділів ДСНС, використовуючи ці металодетектори, має безпосередньо знаходитись в зоні їх ураження, оскільки засоби дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів відсутні, що призводить до травмування та втрат.

Жодна технологія не здатна виявляти всі типи наземних мін за будь-яких умов навколишнього середовища, існує потреба в розробці мультисенсорних систем виявлення, щоб подолати обмеження кожного датчика.

Процес розмінування територій в небойових умовах складається з двох етапів – виявлення ВВП та його деактивація. Кожен з цих етапів передбачає низку різноманітних способів та методик реалізації. Що стосується технічних засобів виявлення ВВП, слід зазначити, що інженерні війська ЗСУ і піротехнічні підрозділи ДСНС оснащені магнітними шукачами МБИ-1, МБИ-2, ИНМ (ПР-506); бомбошукачами ИМБ; міношукачами переносними ИМП,

ИМП-2 (ПР507), МИВ (для водолазів-розвідників), РВМ «ВЕРЕСК», РВМ-2, РВМ-2М (ПР-504А), ММП «ЦИКЛОП» для пошуку протитанкових і протипіхотних мін [68]. В інших державах світу магнітний метод також набув широкого розповсюдження за рахунок своєї простоти реалізації [69]. Однак магнітний метод пошуку ВНП має суттєві обмеження по конструкційним особливостям самих ВНП та їх місць розміщення. Тому паралельно розвиваються й інші методи виявлення ВНП. Всі методи виявлення вибухонебезпечних речовин та ВНП можна поділити на чотири групи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні, органолептичні. Всі ці прилади відносяться до ручного способу розмінування, тому особовий склад має безпосередньо використовувати ці металодетектори, оскільки дистанційні засоби виявлення ВНП відсутні, що призводить до втрат особового складу інженерно-саперних підрозділів ЗСУ і піротехніків ДСНС. Так, за період виконання завдань у районах проведення АТО/ООС з 2014 по 2019 р. втрати інженерно-саперних підрозділів ЗСУ становили 125 осіб: загинули — 36, отримали поранення різного ступеня тяжкості — 89. [24]

Розвиток мінної зброї не стоїть на місці та спонукає до удосконалення засобів контрмінної діяльності. Способи виявлення базуються на різних методах, які наведені у схемі (рис. 1.8).

Відповідно до схеми всі методи виявлення вибухонебезпечних речовин та предметів можна поділити на чотири групи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні, органолептичні.

До фізичної групи належать такі як дрейф-спектрометричний метод. Він полягає в тому, що іонізовані молекули вибухових речовин попадають в дрейф-камеру, під дією електричного поля переміщуються до колектора. Потрапляючи до нього, вони створюють імпульс струму в електричному ланцюзі, що підсилюється й обробляється електронним блоком. Час дрейфу до колектора залежить від рухливості іонів і параметрів електричного поля, що і покладено в основу ідентифікації аналізованої речовини [70]. Однак цей метод не є ефективним для ВНП із герметичною оболонкою.

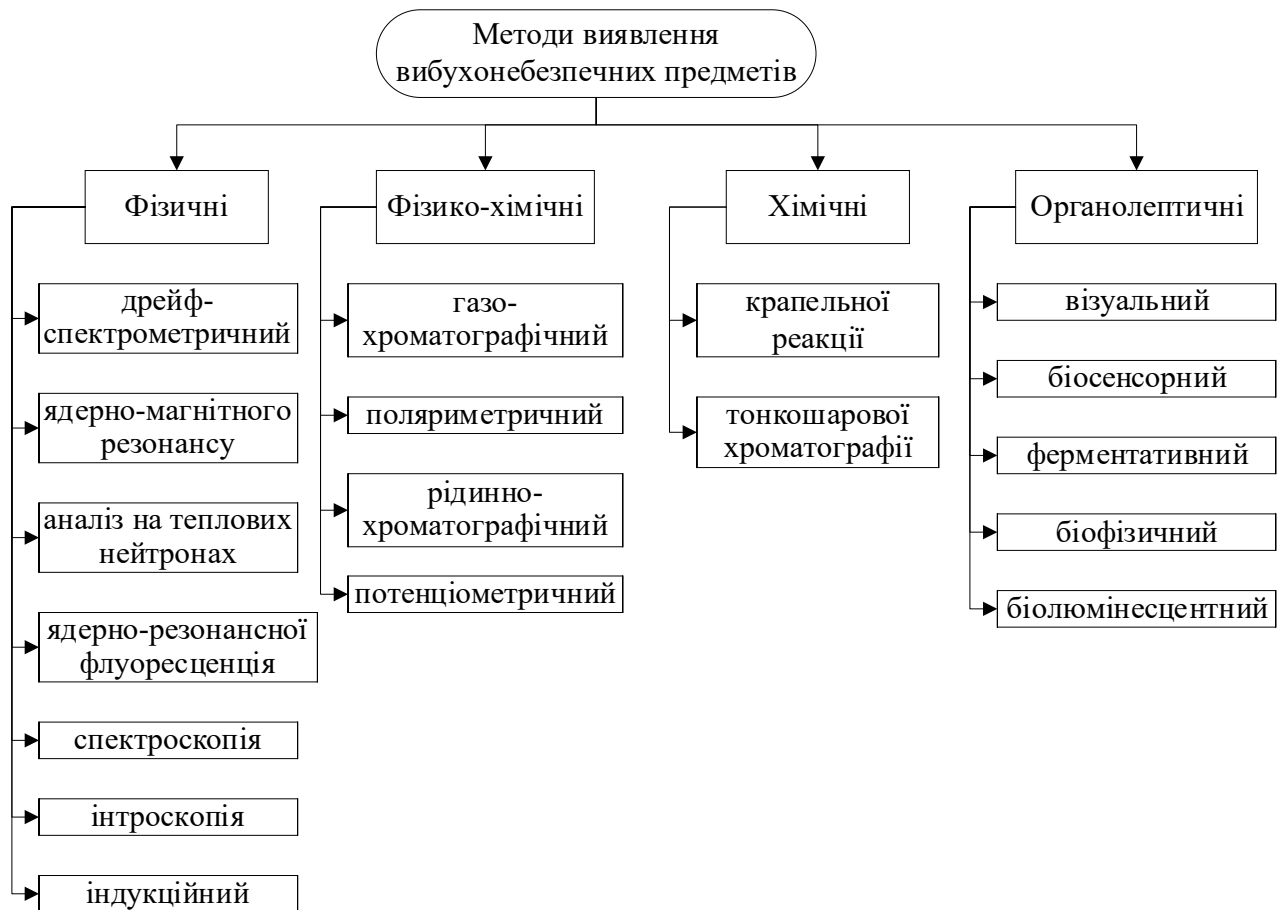


Рис. 1.8. Методи виявлення вибухонебезпечних предметів

Ядерні методи виявлення вибухових речовин використовують ядерні реакції для виявлення вибухових речовин, прихованих, наприклад, у багажі чи вантажі. Досліджені ядерні методи виявлення вибухових речовин, у яких нейтрони або, в деяких випадках, рентгенівські промені високої енергії (MeV) використовуються для опромінення [71]. Приклади включають аналіз на теплових нейтронах, спектроскопію, інтроскопію пропускання імпульсних швидких нейтронів, асоційоване зображення частинок і ядерну резонансну флуоресценцію [72].

Індукційний метод полягає на індукційному балансі – кілька котушок індуктивності, одна передавальна і одна або дві прийомні, що утворюють індуктивний датчик. Всі котушки розміщені в просторі таким чином, щоб сигнал з передавальної котушки при відсутності поблизу металевих

предметів не наводився на приймальні, тобто вся система була б збалансована і сигнал на виході був би рівний нулю.

До фізико-хімічних методів відносять газо-хроматографічний метод, який ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за рахунок розподілу її компонентів на межі фаз високочистих газів-носіїв та чутливому сорбенті. Рідинно-хроматографічний метод ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за рахунок його властивостей розчинятися в рідинах-носіях та утримуватися певний час на сорбенті [73]. Як і у випадку спектрометричного методу він є неефективним для ВВП у герметичній оболонці, коли вилучається можливість потрапляння часток самої вибухової речовини у навколишнє середовище. Потенціометричний метод ґрунтується на зміні електричного опору речовини під дією електричного струму [74], поляриметричний метод – під дією світлового потоку кожна речовина має свій спектр [75]. Обидва методи передбачають безпосередній контакт детектора із поверхнею пошуку, що є небезпечним для випадків практичного застосування піротехнічними підрозділами.

До хімічних методів належить метод крапельної реакції (крапельні тести), який ґрунтується на зміні кольору слідів вибухової речовини під дією певного хімічного реагенту. Метод тонкошарової хроматографії ґрунтується на властивостях вибухової речовини в певних умовах (насичена пароповітряна суміш розчинників) розкладатися на чисті речовини. Ця група методів розрахована на знаходження вибухових речовин на різних поверхнях, шкірі, одязі [76].

До органолептичних методів відносять візуальний метод, який ґрунтується на вивченні розпізнавальних зовнішніх прикмет вибухових речовин та пристроїв. Біофізичний метод, який у свою чергу, поділяється на такі:

біосенсорний метод ґрунтується на виявленні азотовмісних речовин за допомогою собак, свиней тощо;

біоломінесцентний метод ґрунтується на виявленні за допомогою УФ-люмінесценції залишок вибухової речовини на руках, одязі тощо.

Ферментативний метод ґрунтується на виявленні мікрочасток вибухової речовини на руках, багажу тощо при нанесенні її на спеціальний оброблений тампон.

Одним із сучасних методів виявлення вибухонебезпечних предметів є ядерний. Ядерні методи виявлення вибухових речовин використовують ядерні реакції для виявлення вибухових речовин, прихованих, наприклад, у ґрунті. Були досліджені ядерні методи виявлення вибухових речовин, у яких нейтрони або, в деяких випадках, рентгенівські промені високої енергії (MeV) використовуються для опромінення. Приклади нейтронної активація системи включають:

- імпульсний аналіз швидких нейтронів (PFNA);
- аналіз швидких нейтронів (FNA);
- аналіз теплових нейтронів (TNA).

Усі три системи засновані на взаємодії нейтронів з об'єктами, що перевіряються, та засновані на детекції результуючих гамма-променів для визначення елементів, що випромінюються. TNA використовує захоплення теплових нейтронів для генерації гамма-променів. FNA та PFNA використовують швидке розсіювання нейтронів для генерування гамма-променів. Крім того, PFNA використовує імпульсний колімований пучок нейтронів. Завдяки цьому PFNA генерує тривимірне елементне зображення об'єкта, що перевіряється [71].

Детектор аналізу теплових нейтронів (TNA) був розроблений як підтверджуючий датчик для канадської мультисенсорної системи детектора наземних мін, встановленої на транспортному засобі ILDP [72].

ILDP — це єдина мультисенсорна система виявлення мін із датчиком підтвердження, яка може зменшити помилкові тривоги до прийняттого рівня. Експериментально доведено, що TNA здатний виявляти протитанкові та великі протипіхотні міни за прийнятні короткі періоди часу. Він показав

хороші результати в екстремальних кліматичних умовах, у канадських і американських автономних випробуваннях і в американських випробуваннях повної системи ILDP.

Система TNA використовується для визначення рівня азоту в ґрунті. Оскільки всі вибухові речовини містять від 15% до 40% азоту, виявлення високих рівнів азоту дає вказівку на наявність наземної міни. Використовуючи 100-мкг джерела нейтронів Каліфорній-252, система TNA досліджує область інтересу для нейтронного випромінювання. Після захоплення теплових нейтронів будь-який наявний азот випромінює певну кількість гамма-променів, які сприймаються кільцем із чотирьох спеціально виготовлених детекторів йодиду натрію розміром 7,62 x 7,62 см. Для виявлення наземних мін найбільший енергетичний перехід цих гамма-променів відбувається при 10,835 MeV [37].

Під час роботи система TNA спочатку отримує фоновий спектр. Потім підсистема виявлення TNA переміщується до цільового розташування, що цікавить, яке може містити або не містити міни. Далі отримується інший набір спектрів. Після цього отримання ймовірності присутності наземної міни розраховується системою TNA на основі кількості надлишкових відліків у зоні інтересу.

Тому на сьогодні широкого розвитку набувають методи дистанційного пошуку та деактивації ВНП. Основним принципом роботи роботизованих комплексів пошуку ВНП є забезпечення транспортування приладів пошуку по замінованій місцевості без присутності людини [77]. Однак при цьому залишається невирішеним питання вилучення та деактивації ВНП. Активно розробляються та використовуються роботизовано комплекси розмінування, принципом дії яких є підриг ВНП за рахунок механічного контакту [78]. Цей метод виключає необхідність пошуку ВНП, однак при цьому має низьку швидкість розмінування та необхідність обов'язкового контакту роботизованого комплексу з ВНП. Цього недоліку можна позбавитись шляхом використання методу дистанційної деактивації ВНП опроміненням

електромагнітними хвилями, який запропоновано в роботі [37]. Використання такого методу дозволить дистанційно підривати або деактивувати ВВП, які не містять металевих конструкційних елементів, та які знаходяться в полі опромінення без необхідності визначення їх місця розташування. Однак питання проникнення та розповсюдження електромагнітних хвиль у тілі ВВП залишається нез'ясованим.

Процес розмінування територій проходить за допомогою засобів розроблених ще в радянські часи. Їхній принцип роботи заснований на індукційному та радіохвильовому методах пошуку вибухонебезпечних предметів. Для визначення місця знаходження окремих протитанкових, протипіхотних, протитранспортних, та об'єктних мін, а також невибухнувших авіабомб, артилерійських снарядів, мінометних мін тощо на оснащені піротехнічних підрозділів знаходяться наступні прилади:

- індукційні і радіохвильові міношукачі ІМП, ІМП-2 (ПР-507), МІВ, РВМ-2М, РВМ-2 (ПР-504А), ММП (ПР-505);
- бомбошукачі (шукачі феромагнітних тіл) ІМБ, МБІ, ОГФ;
- для пошуку радіопідричників ІНМ (ПР-506);
- механічне приладдя: шупи, кішки, каткові трали [30].

Особовий склад підрозділів ДСНС, використовуючи ці металодетектори, має безпосередньо знаходитись в зоні їх ураження, оскільки засоби дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів відсутні, що призводить до травмування та втрат.

Протипіхотні наземні міни є однією з головних причин жертв цивільного населення в районах, уражених конфліктом, і значною перешкодою для післявоєнної відбудови [67].

Незважаючи на технологічний прогрес двадцять першого століття, досягнутий західними військовими для розмінування та видалення саморобних вибухових пристроїв, гуманітарне розмінування здебільшого спирається на технології середини двадцятого століття [68]. Жодна технологія не здатна виявляти всі типи наземних мін за будь-яких умов

навколишнього середовища, існує потреба в розробці мультисенсорних систем виявлення, щоб подолати обмеження кожного датчика.

Злиття датчиків для виявлення протипіхотних мін присвячено поєднанню технологій георадара та металошукача [79]. Прикладом злиття цих датчиків є система ALIS [80]. ALIS — це ручний, портативний «подвійний датчик», може отримувати електромагнітні випромінювання та сигнал георадара разом із інформацією про місцезнаходження, тоді як він сканується на поверхні землі оператором вручну. Але його використання стає неможливим, через вдосконалення мін, які спрацьовують до моменту, як сапер їх виявить [25]. Також надійне та економічно ефективно виявлення та геофізичне картографування ділянок, забруднених невибухаючими боєприпасами, такими як касетні боєприпаси, покинуті боєприпаси та саморобні вибухові пристрої, залежить від здатності відрізнити небезпечні предмети від металевих [81]. Підхід портативного ручного виявлення [82] мін до руху датчика є повільним і небезпечним для окремих операторів, тому стає гостре питання, щодо розробки засобів дистанційного виявлення та розмінування [83].

Перспективними розробками є створення безпечних засобів, які керується оператором на безпечній відстані та дозволяють отримувати спеціальні карти з розміткою місцевості з інформацією про можливу наявність вибухонебезпечних об'єктів на певних ділянках місцевості та, в цілому, карти сигналів сенсорів [84]. Ці засоби можуть бути як одиничною платформою (гексаподного робота та скануючого маніпулятора) [85] так і системи з платформи для моніторингу та безпілотного літального засобу, для виявлення ймовірних місць розташування мін, які потім можуть бути підтверджені наземним транспортним засобом [86]. Використання таких засобів в компонуванні з мультисенсорними системами, які мають високу ймовірність виявлення, низький технічний ризик, можливість об'єднання даних після збору, приведуть до зменшення втрат піротехнічних підрозділів, високих показників виявлення вибухонебезпечних предметів.

Перспективними напрямками дистанційного виявлення вибухових речовин є лазерна десорбція [87], датчики рентгенівського та  $\gamma$ -випромінювання, датчики оптичного випромінювання, електрохімічні та хімічні сенсори, оптико-електронні датчики [88], нейтронні методи [29]. Але ефективність всіх цих методів залежить від фізико-хімічних та електромагнітних властивостей матеріалів на пошук яких вони направлені.

### **1.3.2. Аналіз існуючих методів та способів знешкодження ВВП**

Окрім розробки превентивних заходів недопущення вибуху, активно досліджується і безпека поведінки з вибуховими речовинами [67]. З метою підвищення безпеки роботи рятувальників розробляються нові більш безпечні алгоритми дій рятувальників при поводженні з вибухонебезпечними предметами. Для цього досконало вивчаються конструкційні особливості та принципи дій всіх боєприпасів та вибухонебезпечних предметів. Виходячи з того, що за останні роки розроблено та використовується на теренах велика кількість різноманітних вибухових предметів рятувальникам необхідно володіти великою базою знань. В таких випадках використовують принцип подібності та розглядають вибухонебезпечні предмети по класам за однаковими параметрами [69]. Але незважаючи на велике різноманіття конструкційних особливостей боєприпасів основною небезпекою у них є самі вибухові матеріали [70]. Та всі дії рятувальників сконцентровані саме на недопущенні ініціації вибухової реакції таких матеріалів.

Протікання вибуху це швидкоплинна реакція окиснення. Але на відмінну від такої ж реакції окиснення при горіння багатократне підвищення швидкості реакції досягається присутністю у складі структури молекули вибухового матеріалу окисника та окислювальної речовини [75]. Останнім часом серед вибухонебезпечних матеріалів широкого розповсюдження набули речовини із атомами нітрогену в якості окисника. Це пояснюється високою окислювальною активністю нітрогену. В якості речовини, що

окислюється у структурі сучасних вибухових матеріалів зустрічаються вуглеводовмісні та на основі важких металів. Виходячи від хімічної структури вибухового матеріалу впливає і їх фізико-хімічні властивості [88]. При дослідженні фізико-хімічних властивостей матеріалів їх перевіряють на вплив вогню [89], електромагнітного випромінювання [90], радіації [91] та інше. Саме фізико-хімічні характеристики матеріалів визначають їх вибухові властивості. Відповідно для підвищення безпеки роботи рятувальників при деактивації та розчищення території від вибухонебезпечних предметів, а також розробки нових правил безпеки поводження з такими предметами необхідно встановлення, як загальних ознак вибухонебезпеки матеріалів так і особливостей їх фізико-хімічних параметрів.

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 [92]. Фізичні методи засновані на фізичному впливі на міни для їхньої детонації або знешкодження. Наприклад, використання інших вибухових речовин, електромагнітних імпульсів або термічного впливу [93]. Достатньо рідко використовуються хімічні речовини для виявлення або знешкодження мін. Наприклад, як індикатори вибухових речовин [95]. Використання тварин (зазвичай собак або щурів) для виявлення мін за запахом відноситься до біологічних методів [96]. 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 [97]. На теперішній час активного розвитку набули методи з використанням

штучного інтелекту [98]. 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 [99]. 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.

У багатьох країнах світу вже прийнято на озброєння робототехнічні комплекси (РТК), а також ведуться розробки щодо підвищення їх ефективності та функціональних можливостей.

На озброєнні США стоїть MarkV-A1 або Mark5-A1 (рис. 1.9) – це робот-знищувач бомб, розроблений компанією Northrop Grumman для роботи з ВНП та мінами без ризику для життя. Це частина лінійки Remotec ANDROS, яка включає інші РТК EOD (Explosive Ordnance Disposal). Служби швидкого реагування в усьому світі покладаються на MarkV для боротьби з ВНП поза небезпечною зоною. Як правило, поліцейські сили та департаменти у великих містах мають спеціалізований вибуховий загін або підрозділ для роботи з ВНП, а також небезпечними матеріалами чи загрозами; MarkV – це технологічний подвиг, який деякі з цих підрозділи мають у своєму арсеналі саме з цієї причини [24].



Рис. 1.9. Робот-знищувач бомб Mark5-A1

Робот оснащений такими ключовими функціями:

- Кольорова камера спостереження з підсвічуванням, масштабуванням 72:1, панорамуванням/нахилом, можливістю перемикання при слабкому освітленні
  - Захват із постійним обертанням - для роботи із захватом можна додати багато аксесуарів
  - Швидкоз'ємне кріплення камери
  - 24-дюймовий подовжувач камери
  - Рука маніпулятора може досягати висоти до 8 футів
  - Двосмугова аудіосистема з динаміком, що захищає від погодних умов, і мікрофоном, встановленими на роботі
  - Живлення від 24 В постійного струму - дві спіральні батареї на 65 ампер/год 12 В постійного струму

Для роботи Remotec Andros MarkV-A1 має блок керування, який містить 15-дюймовий РК-екран. У залежності від часу, роботом можна керувати виключно за допомогою візуального зворотного зв'язку, який

надають його камери. Загалом MarkV-A1 має чотири кольорові відеокамери, у тому числі камеру, встановлену на одному зі стовпів, що стирчать із верхньої частини робота. Він також має кілька мікрофонів, освітлення та ряд інших датчиків. MarkV-A1 можна керувати одним із трьох таких способів:

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 [100]. 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.

На озброєнні Німеччини стоїть дистанційно керована машина пошуку вибухових пристроїв RCDV (рис. 1.10) оснащена двома системами пошуку мін: з металошукачем та ґрунтовим радіолокатором. Використання цих систем дозволяє з високою точністю визначати місце та глибину залягання міни або ВНП. RCDV розроблено на базі ББМ «Візель-1». З машини було знято озброєння, а верхню частину корпусу модифіковано та обладнано новим дворежимним сенсором, підповерхневим радаром (ППР) у поєднанні з металодетектором (МД) для виявлення мін та ВНП [25].

При роботі «Візель-1» їде на максимальній швидкості 6 км/год. Дана система пошуку мін розташована в кормовій частині машини RCDV, внаслідок чого під час пошуку мін та вибухонебезпечних предметів вона рухається заднім ходом. За непотрібністю або під час транспортування ППР/МД забираються на дах.

Управління машиною здійснюється механіком-водієм або оператором дистанційно за допомогою пульта з корпусу CCV.

Максимальна швидкість руху RCDV шосе 85 км/год; потужність двигуна 90 л. с; запас ходу паливом 200 км; бойова маса 2,75 т; довжина (без систем пошуку хв.) 3,6 м, ширина 1,82 м, висота 1,85 м



Рис. 1.10. Машина пошуку вибухових пристроїв RCDV

Яскравим прикладом сучасного, дистанційно керованого засобу знаходження ВНП та мін є розробка дослідників з Оборонного науково-дослідного інституту Саффілд та інших лабораторій Міністерства оборонних досліджень і розробок Канади (DRDC) (рис. 1.11) [26].

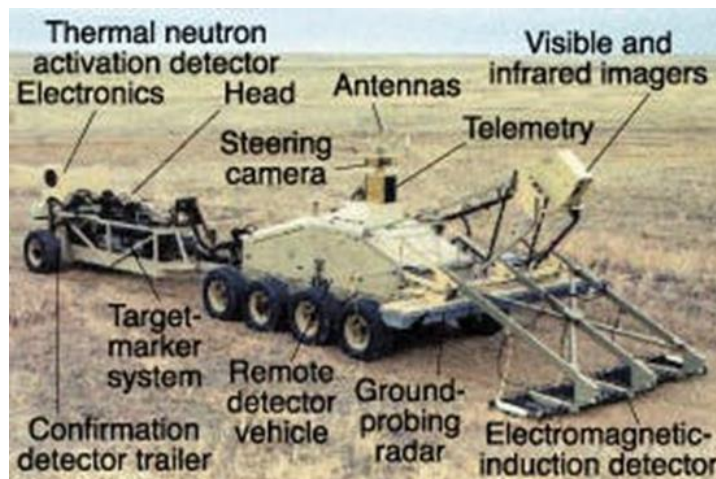


Рис.1.11. Автоматизована система дистанційного виявлення ВНП

Для знаходження ВНП використовуються 4 датчики. Водночас збираються дані електромагнітних перешкод, фіксуються як теплові, так і видимі зображення. Над масивом датчиків електромагнітних перешкод розташований водонепроникний контейнер, у якому розміщено ІЧ-камеру та

CCD-камеру видимого світла. Після мультиплексування цих зображень вони передаються через бортову телеметричну систему з розширеним спектром і систему передачі відео на станцію керування автомобілем, розташовану в сотнях метрів від автомобіля виявлення. За кріпленням ІЧ/видимого світла камери розташована антена георадарного детектора. Георадар сигналізує про місцезнаходження цілі відносно положення її антени та рівень достовірності цілі, що вказує на те, наскільки "міноподібним" георадар сприймає та класифікує потенційну ціль.

Після підтвердження підозрілої цілі використовується четвертий метод виявлення. На трейлері позаду автомобіля-детектора встановлено детектор активації теплових нейтронів. Оскільки всі вибухові речовини містять від 15% до 40% азоту, виявлення високих рівнів азоту дає вказівку на наявність наземної міни. Використовуючи 100-мкг джерело нейтронів Каліфорній-252, система досліджує область інтересу для нейтронного випромінювання. Дані передаються до процесора керування транспортним засобом, де вони об'єднуються з даними інших датчиків.

### **1.3.3. Особливості проведення гуманітарного розмінування на прикладі України**

В Україні гуманітарним розмінуванням займаються різні організації, як міжнародні, так і національні. Серед них — Міжнародний комітет Червоного Хреста (ICRC), який надає допомогу постраждалим у конфліктах. Британська благодійна організація The HALO Trust та група MAG (Mines Advisory Group) спеціалізуються на виявленні та знешкодженні мін у різних країнах світу. В Україні ці завдання виконує Державна спеціальна служба транспорту, а також активну роль у розмінуванні відіграє Організація з безпеки і співробітництва в Європі (ОБСЄ). Однак незважаючи на активну роботу цих організацій основне навантаження по виявленню та знешкодженню вибухонебезпечних предметів несе ДСНС України.

Операторами протимінної діяльності в Україні можуть бути різні українські чи міжнародні суб'єкти, незалежно від форми власності, такі як уповноважені державні підрозділи, підприємства, установи та організації. Їхня діяльність включає повний цикл робіт: від нетехнічного та технічного обстеження територій, складання карт, виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів до маркування місцевості, підготовки документації та інформування громад. Для цього оператори залучають кваліфікованих фахівців з розмінування, які підлягають обов'язковому страхуванню життя та здоров'я на значну суму (понад 2 мільйони гривень) і несуть відповідальність за порушення закону. Фінансування може здійснюватися з державного та місцевих бюджетів, коштів підприємств або за рахунок міжнародної допомоги. Ключовою вимогою є отримання сертифіката відповідності від акредитованого органу, причому компанії з офшорних зон, держав-агресорів чи під санкціями не можуть його отримати. Після сертифікації оператор вноситься до загальнодоступного електронного реєстру, що дозволяє йому розпочати роботу. Важливо, що держава не несе відповідальності за шкоду, заподіяну неправомірними діями такого оператора. Станом на зараз в Україні діє низка сертифікованих операторів, серед яких як міжнародні організації (наприклад, HALO Trust, Norwegian People's Aid), так і українські компанії та громадські об'єднання.

Щоб зменшити небезпеку при проведенні розмінування, важливо забезпечити якісну підготовку персоналу, який займається цими роботами. Використання дистанційних технологій, таких як дрони та роботи, дозволяє мінімізувати ризики для людей. Також необхідно суворо дотримуватись міжнародних стандартів безпеки та застосовувати сучасне обладнання, яке підвищує ефективність і безпечність процесу. Крім того, інформування місцевого населення про наявність небезпечних зон є ключовим заходом для запобігання випадковим травмам і нещасним випадкам.

Однак гуманітарне розмінування стикається з низкою проблем. По-перше, це значні площі забруднених територій, які потребують очищення.

По-друге, обмеженість ресурсів, зокрема фінансування, спеціалізованого обладнання та кваліфікованого персоналу. Третім викликом є високий рівень небезпеки для фахівців, які виконують ці роботи. Крім того, недостатня обізнаність населення про ризики мін також ускладнює ситуацію. Останньою проблемою є значна тривалість процесу розмінування, що вимагає багато часу.

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, державні та неурядові організації, функцією яких є гуманітарне розмінування, напружували великий досвід по організації та проведенню робіт із виявлення та знешкодження ВВП різного конструктивного виконання, але існуючі методи проведення гуманітарного розмінування не дозволяють виконувати роботи із задовільною якістю у достатньо обмежені часові терміни. Відсутність можливості швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

#### **1.4. Аналіз досягнень та проблемних питань в галузі дистанційного електромагнітного детектування предметів**

Найбільшого розповсюдження на сьогодні набув метод магнітної ідентифікації ВВП [75]. 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 ВНП безоболонкового типу чи без металевих конструкційних елементів практично зводить нанівець всі можливості метод магнітної ідентифікації. Тому останніми роками поширилися інші методи виявлення неметалевих ВНП.

Перш за все, до неселективних методів розмінування можна віднести роботизовані комплекси механічного впливу на ґрунт [76]. Внаслідок жорсткого механічного впливу при використанні таких роботизованих комплексів відбувається підрив ВНП будь-якої конструкції. Однак такий метод також має ряд недоліків, основними з яких є низький темп розмінування, неможливість роботи по поверхні в обмежених умовах [67], неможливість виявлення та знешкодження ВНП глибокого закладання.

В останні роки із розвитком технологій штучного інтелекту розвитку набули методи візуального виявлення ВНП за допомогою камер високої розподільчої здатності, встановлених на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), та інтелектуальної системи обробки візуальних даних [101]. 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 ВНП. Крім того, даний метод має обмеження по пошуку прихованих ВНП.

Усунути ряд перелічених вище недоліків дозволяє метод радіоелектромагнітного сканування [102]. Такий метод має велику дистанцію ідентифікації, що дає змогу використовувати БПЛА, дозволяє виявлення прихованих ВНП 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  $1 \div 10$  ГГц (НВЧ-діапазон) [78]. 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.

В роботі [37] запропоноване використання НВЧ-електромагнітних хвиль для пошуку ВМ будь-якого складу та конструкції. Перевагою НВЧ-електромагнітних хвиль є можливість передачі сигналу на велику відстань із незначними енергетичними втратами та селективна взаємодія ВМ з НВЧ-електромагнітними хвилями. Остання властивість дозволяє чітко виявляти місця аномалій шляхом прийняття відбитого сигналу. Недоліком роботи [34] можна вважати побудову моделі на основі теорії довгих ліній (теорія, за якої поздовжній розмір лінії передачі перевищує довжину хвилі, що розповсюджується в ній, а поперечний розмір лінії передачі є значно меншим довжини хвилі).

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 [103]. Незважаючи на наявні обмеження, вони продовжують удосконалюватися, і в найближчому майбутньому можна очікувати на появу нових, ще більш ефективних рішень.

Таким чином, встановлено, що електромагнітні методи дистанційного детектування ВВП потенційно здатні підвищити якість та безпеку робіт по розмінуванню територій із вибухонебезпечними предметами різного

конструктивного виконання, але існуючі на сьогодні технічні рішення та алгоритми обробки сигналів не дозволяють у повній мірі розкрити цей потенціал.

## **Висновки до розділу 1**

1. Аналіз стану цивільної безпеки України у розрізі проблем наявності неконтрольованих ВВП показав, що України відноситься до країн із найбільшою площею території, яка забруднена ВВП. Більше 180 тис. км<sup>2</sup> потребують термінового розмінування. Ця проблема несе великі ризики для життя та здоров'я населення, а також відчужує великі площі сільськогосподарських земель. Додатковою проблемою є широкий спектр конструкційних особливостей ВВП, якими забруднена територія. До таких ВВП відноситься, як штатна зброя країн СРСР та НАТО, так і саморобні ВВП. Це призводить до того, що значну частину представляють ВВП із неметалевими конструкційними елементами, що ускладнює їх пошук із використання стандартних методів детектування.

2. Встановлено, що в Україні створена нормативно-правова база, яка достатня для ефективного виконання завдань по очищенню територій від ВВП та яка базується на міжнародних актах та процедурах. Всі роботи по розмінуванню території України проводяться у відповідності з Женевським міжнародним центром гуманітарного розмінування.

3. Проаналізовано та класифіковано основні методи дистанційного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Встановлено, що всі методи за принципом дії можна розділити на 4 класи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні та органолептичні. Кожен з методів відрізняється надійністю виявлення, часом аналізу, автономністю та матеріаловитратністю. Виходячи із порівняння цих характеристик найбільш оптимальними методами для використання оперативно-рятувальними підрозділами при очищенні великої площі місцевості від вибухонебезпечних приладів невідомої конструкції є

електромагнітний метод та метод нейтронного аналізу. Визначено, що державні та неурядові організації, функцією яких є гуманітарне розмінування, напрацювали великий досвід по організації та проведенню робіт із виявлення та знешкодження ВВП різного конструктивного виконання, але існуючі методи проведення гуманітарного розмінування не дозволяють виконувати роботи із задовільною якістю у достатньо обмежені часові терміни. Відсутність можливості швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

4. Встановлено, що електромагнітні методи дистанційного детектування ВВП потенційно здатні підвищити якість та безпеку робіт по розмінуванню територій із вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання, але існуючі на сьогодні технічні рішення та алгоритми обробки сигналів не дозволяють у повній мірі розкрити цей потенціал.

## **РОЗДІЛ 2.**

### **ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВИБУХОВИХ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ВІД ЇХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

У даному розділі проведено класифікацію основних вибухонебезпечних матеріалів за їх фізико-хімічними властивостями. Встановлено вплив фізико-хімічних властивостей вибухонебезпечних матеріалів на умови їх використання. Визначено ступінь чутливості вибухонебезпечних матеріалів на дію електромагнітних полів та хвиль. На основі аналізу обґрунтовано необхідність детального дослідження властивостей таких речовин, як тетрил, гексоген, тринітротолуол, фульмінат ртуті, азид свинцю та тринітрорезорцинат свинцю. Визначено ступінь небезпеки використання чи зберігання речовин з високими дипольними моментами в умовах дії зовнішніх полів.

Основні результати розділу викладені у публікаціях [16, 17, 28, 29].

#### **2.1. Класифікація основних вибухонебезпечних матеріалів за їх фізико-хімічними властивостями**

Конструкційні особливості вибухонебезпечних предметів проаналізовані у попередньому розділі, але зрозуміло, що основною складовою всіх ВВП є сам вибухонебезпечний матеріал, який в більшості ВВП займає більше 95% по об'єму. Тому детальний аналіз властивостей саме вибухонебезпечного матеріалу є визначальним для вирішення поставлених в роботі задач. Основною та найбільш небезпечною частиною будь-якого вибухонебезпечного предмету є саме ВМ, то в роботі [104] проведено дослідження фізико-хімічних властивостей найбільш поширених ВМ. Як відомо саме фізико-хімічні властивості матеріалів визначають їх електромагнітні властивості та стійкість до теплового та радіаційного

впливу [105]. Для розробки нових ефективних методів пошуку вибухонебезпечних предметів необхідно сконцентрувати увагу саме на дослідженні закономірностей взаємодії ВМ з НВЧ-електромагнітними хвилями. Виходячи з цього об'єктом дослідження даного розділу є вибухонебезпечні матеріали, що використовуються у вибухонебезпечних предметах східноєвропейського виробництва. Предметом дослідження є чутливість вибухонебезпечних матеріалів до дії електромагнітних полів та хвиль. Робоча гіпотеза полягала у визначенні чутливості ВМП до діє електромагнітних полів через показник дипольного моменту найбільш поширених вибухових матеріалів.

Серед протипіхотних фугасних мін обрані ПМН-2, ПФМ-1. В якості протипіхотних мін осколкової дії розглядаються МОН-90 та ПОМ-3. Серед протитранспортних фугасних мін обрані міни ТМ-62ПЗ та ПТМ-3. Ця міна споряджена кумулятивним зарядом вибухової речовини ТГ-40 (гексоген (RDX) / тротил (TNT) 60/40) масою 1 800 г.

В якості вибухонебезпечних матеріалів розглядаються матеріали зарядів цих ВМП. Для основного заряду використовують бризантні вибухові речовини, які характеризуються здатністю подрібнювати під час вибуху розташовані поряд з нею матеріали. Найчастіше використаною вибуховою речовиною є тротил (тринітротолуол) або суміші з ним. Хімічна стійкість тротилу висока; тривале нагрівання за температури до 130 °С мало змінює його вибухові властивості, він не втрачає цих властивостей і після тривалого перебуванні у воді.

Детонатори представляють собою окремий елемент підвищеної небезпеки. В середині гільзи знаходиться заряд тетрилу, ТЕНУ (пентрину) або гексогену. Згори в гільзу впресована чашечка, що має зверху отвір. Всередині чашечки знаходиться шашка ТНРС та азиду свинцю (або гримуча ртуть). Азид свиню (або гримуча ртуть) має досить велику силу детонації щоб підірвати тетрил, ТЕН (пентрин) або гексоген, але недостатню чутливий для відкритого полум'я або удару, тому над ним розміщена шашка ТНРС,

який відмінно реагує на полум'я або удар, але слабкий для збудження тетрилу, ТЕНУ (пентрину) або гексогену.

Ступінь поляризації молекул визначався виходячи із наявності та розташування полярних хімічних зв'язків в структурі молекул вибухонебезпечних речовин.

Детальний аналіз конструкції та принципу дії обраних вибухонебезпечних предметів дозволив виявити особливості та загальні риси які структуровані в таблиці 2.1 [17].

Таблиця 2.1. - Матеріали, які притаманні різним вибухонебезпечним предметам [17]

Класифікація ВВП	Назва ВВП	Основна ВР	Підричник	Матеріал корпусу
1	2	3	4	5
Протипіхотні фугасні міни	ПМН 2	100 г. TG-40 (гексоген (RDX) / тротил (TNT) 60/40)	Механічний із натискним датчиком цілі	Пластик
	ПФМ-1	37 г., ВС-6Д	Механічний із натискним датчиком цілі	Поліетилен
Протипіхотні міни осколкової дії	МОН-90	6200 г. (ПВВ-5А)	МУВ/ВПФ/ЕПДр/НМ із МД-5	Пластик
	ПОМ-2С	140 г. тротил	Механічний із натяжними датчиками цілі	Сталь
	ПОМ-3	100 г., А-ІХ-1	Електричний підричник із сейсмічними датчиками	Сталь
	ОЗМ-72	660 г. (тротил)	МУВ/ВПФ/НМ	Внутрішній чавунний, зовнішній з листової сталі
Протитанкові фугасні міни	ТМ-62ПЗ	б 500-7500 г, тротил, морська сум.	МВЧ-62/МВП-62/МВП-62М/МВН-72/МВН-80/МВД-62	Поліетилен

Продовження таблиці 2.1.

1	2	3	4	5
	ПТМ-3	1 800 г, вибухова речовина ТГ-40 (гексоген (RDX) / тротил (TNT) 60/40)	Магнітний підривник БТ-06	Пластик
Суббоекприпас	КОБЕ-ЗБ30	46 г, вибухова речовина ОМА (на основі октогену (НМХ))	Ударно-інерційний із механізмом самознищення	Сталь
	9Н235	310 г. К-991	9Е272	Сталь

Як видно з таблиці 2.1 не зважаючи на суттєво різне призначення, розміри та принцип дії, основними матеріалами, які використовуються для основного заряду є бризантні вибухові речовини, які характеризуються здатністю подрібнювати під час вибуху розташовані поряд з нею матеріали (сталь, чавун, пластмаса, дерево). Найчастіше використаною вибуховою речовиною є тротил (тринітротолуол) або суміші з ним. Чутливість тротилу до детонації залежить від його стану. Пресований і порошкоподібний тротил безвідмовно детонує від капсуля-детонатора, литий же, лускатий і гранульований тротил детонує лише від проміжного детонатора із пресованого тротилу або іншої бризантної ВР. Хімічна стійкість тротилу висока; тривале нагрівання за температури до 130 °С мало змінює його вибухові властивості, він не втрачає цих властивостей і після тривалого перебуванні у воді. Він використовується як індивідуальна вибухова речовина, а також у різних вибухових сумішах (у сплавах з гексогеном, тетриллом, ТЕНом тощо) [16].

Матеріал корпусу залежить від призначення [106], так з таблиці 2.1 видно, що для фугасних мін характерне використання пластмас, для мін осколкової дії – сталь. Міни з пластиковим корпусом мають дуже малий вміст металу і не усі міношукачі зможуть їх виявити в силу різноманітних причин від швидкості помаху до відсутності такої можливості через тактико

технічних характеристик міношукача [28]. Пластмаси для ВНП виготовляють за технологією лиття під тиском. Цей матеріал має високу ступінь удароміцності, стійкість до вологи, переносимість впливу високих температур, під час вибуху розлітається на дрібні осколки.

Але як видно з таблиці 2.1 детонатори представляють собою окремий елемент підвищеної небезпеки. Крім того при проведенні дезактивації та вилучення мін саме на роботу з детонаторами направлені основні зусилля та заходи небезпеки. Тому їх слід розглянути окремо.

Детонатор або підривник — це пристрій, що використовують для підриву вибухівки. Для всіх вищезгаданих ВНП він має один і той же принцип роботи (рис. 2.1).

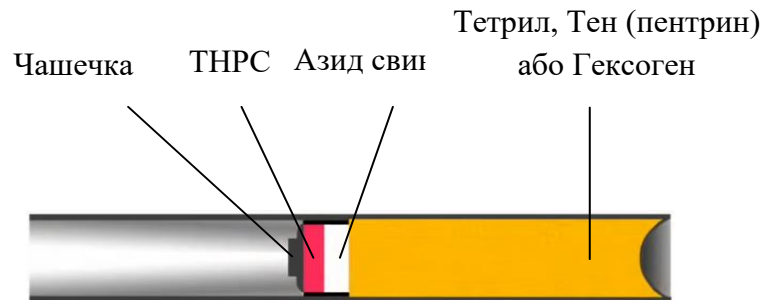


Рис. 2.1. Типова структура детонатора

В середині гільзи знаходиться заряд тетрилу, ТЕНУ (пентрину) або гексогену. Згори в гільзу впресована чашечка, що має зверху отвір. Всередині чашечки знаходиться шашка ТНРС та азиду свинцю (або гримуча ртуть). Азид свинцю (або гримуча ртуть) має досить велику силу детонації щоб підірвати тетрил, ТЕН (пентрин) або гексоген, але недостатню чутливий для відкритого полум'я або удару, тому над ним розміщена шашка ТНРС, який відмінно реагує на полум'я або удар, але слабкий для збудження тетрилу, ТЕНУ (пентрину) або гексогену.

Таким чином на основі повного аналізу структури вибухонебезпечних предметів встановлено основні вибухонебезпечні матеріали (табл. 2.2), які визначають безпеку роботи з такими предметами.

Таблиця 2.2. - Основні фізико-хімічні та вибухові властивості вибухонебезпечних матеріалів

Найменування вибухового матеріалу, технічне/хімічне	Тетрил/ метилпкірилнітрамін	Гексоген/ циклотриметилентринітрамін	ТЕН/ тетранітропентаеритрит	Тротил/ тринітрогонулол	Гримуча ргуть/ фульмінат ргугі	Азид свинцю	ТНРС/ тринітрорезорцинат свинцю
Хімічна формула	$C_7H_5N_5O_8$	$C_3H_6N_6O_6$	$C_5H_8(ONO_2)_4$	$C_7H_5N_3O_6$	$Hg(ONC)_2$	$Pb(N_3)_2$	$C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$
Питома вага, г/см <sup>3</sup>	1,73	1,8	1,17	1,66	4,42	4,7	3,1
Швидкість детонації м/с	7500	8640	8400	6990	4850	4800	5000
Бризантність, мм	19	24	24	13	-	-	-
Фугасність, мм <sup>3</sup>	3900	70	500	285	-	-	-
Об'єм продуктів вибуху: л/кг	765	908	768	730	315	308	365
Температура вибуху, К	2950	3870	4200	3600	4400	4250	4200
Теплота вибуху, МДж/кг	4,6	5,45	5,76	4,4	1,8	1,5	1,6
Температура спалаху, К	480	500	540	560	550	600	575

Таким чином, визначено найбільш поширений вид вибухонебезпечних предметів, які можуть зустрічатись на теренах Східної Європи при роботі по розмінуванню територій та деактивації вибухових приладів. При аналіз обрано поширені протипіхотні, проти транспортні та суббоєприпаси. Проведено аналіз структури цих вибухонебезпечних предметів та встановлено основні вибухонебезпечні матеріали, які в них використовуються. Встановлено, що найбільшу небезпеку мають вибухові

матеріали у капсулях-детонаторах, тому саме на безпеку роботи з ними необхідно звернути увагу.

## 2.2 Вплив фізико-хімічних властивостей вибухонебезпечних матеріалів на умови їх використання

Тетрил є посиленою вибуховою речовиною нітрагіну (рис. 2.1), хоча його застосування значною мірою замінено на гексоген. Тетрил - це чутлива вторинна вибухова речовина, яка використовується як прискорювач, невеликий заряд, що міститься поруч з детонатором, щоб поширити детонацію в основний заряд вибухової речовини.

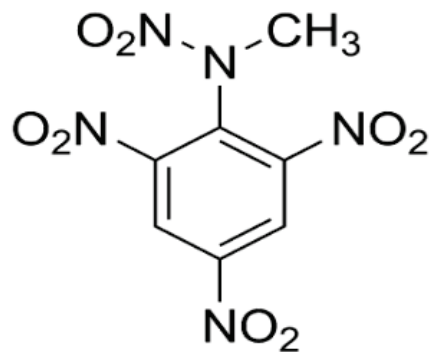
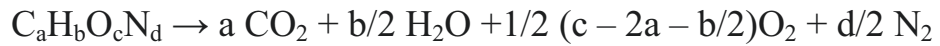


Рис.2.2. Структура молекулі тетрилу

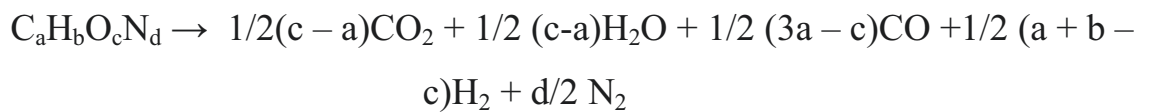
Технічний продукт тетрилу має світло-жовтий колір. Розчинність при  $20^\circ\text{C}$  та  $50^\circ\text{C}$  г/100г у воді (0.008г та 0.019г). Чистий продукт стійкий до слабких кислот і не взаємодіє з аміачною селітрою. Технічний продукт через домішки пікринової кислоти кородує звичайну сталь і несумісний з аміачною селітрою. При сплавленні з тротилом утворює продукт із температурою плавлення  $68^\circ\text{C}$ . Термічно стабільна до  $100^\circ\text{C}$ . Температура спалаху становить близько  $190^\circ\text{C}$ . Більш потужне та чутливе ВР ніж тротил. Чутливість до удару для вантажу 2.5 кг (12tool 50%) 37 см (гексоген – 28 см, тротил – 148 см) [107].

Для всіх азотовмісних вибухових матеріалів вибух протікає по трьом основним схемам:

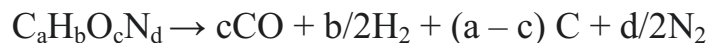
$c \geq (2a + b/2)$  Повне окислення С та Н.



$a < c < (2a + b/2)$  Кисень спочатку окислює С до СО, потім його залишок ділиться порівну між  $H_2$  та СО, окислюючи їх до  $H_2O$  та  $CO_2$ .



$c \leq a$  Часткове окислення С та Н. Наявність карбону в твердій фазі.



До того ж класу азотовмісних вибухових матеріалів відносяться й гексоген, пентаеритриттетранітрат та тринітротолуол (рис. 2.3).

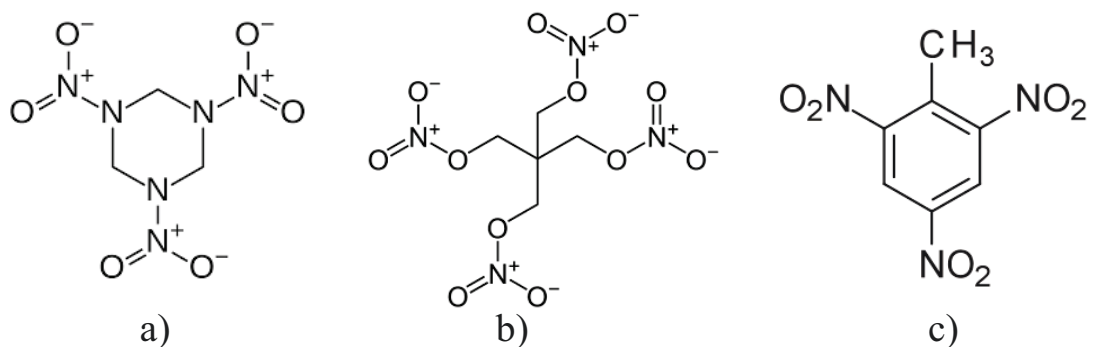
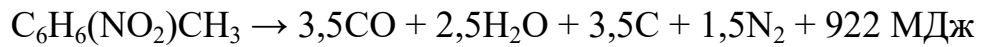


Рис. 2.3. Структура молекул гексогена (а), пентаеритриттетранітрата (b) та тринітротолуола (с)

Характерною особливістю матеріалів цього класу є наявність окисника в структурі самої молекули, а саме нітрогену (N), що обумовлює швидке

протікання реакції окиснення вуглеводневої основи. При цьому виділяється велика кількість теплоти:



Гексоген (циклотриметилентринітрамін, RDX) являє собою органічну сполуку з формулою  $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ . Це біла тверда речовина без запаху і смаку, що широко використовується як вибухова речовина. Хімічно класифікується як нітрамід, хімічно схожий на октоген (HMX). Він часто використовується у сумішах з іншими вибуховими речовинами та пластифікаторами або флегматизаторами (десенсибілізаторами), наприклад, у пластичній вибуховій речовині С-4. Гексоген стабільний при зберіганні і вважається одним із найпотужніших і бризантних військових фугасних вибухових речовин, з відносним коефіцієнтом ефективності 1,60 [108].

Пентаеритриттетранітрат (ТЕН), також відомий як PENT, PENTA, тен, corpent або penthrite (або, рідше і переважно німецькою мовою, як нітропента) - це бризантна вибухова речовина. Це нітрат складного ефіру пентаеритриту і за структурою він дуже схожий на нітрогліцерин. При змішуванні з пластифікатором ТЕН утворює пластикову вибухову речовину. Нейтронне випромінювання розкладає ТЕН з утворенням діоксиду вуглецю та деякої кількості динітрату та тринітрату пентаеритриту. Гамма-випромінювання підвищує чутливість ТЕНу до термічного розкладання, знижує температуру плавлення на кілька градусів Цельсія та викликає набухання зразків. Як і інших складних ефірів нітратів, основним механізмом розкладання є втрата діоксиду азоту, ця реакція є автокаталітичною.

У довкіллі ТЕН піддається біодеградації. Деякі бактерії денітрують ТЕН до тринітрату, а потім динітрату, який потім піддається подальшому розкладанню. ТЕН має низьку леткість і низьку розчинність у воді і, отже, має низьку біодоступність для більшості організмів. Підірвати його складніше, ніж первинні вибухові речовини, тому падіння або займання його,

як правило, не викличуть вибуху (при атмосферному тиску його важко спалахнути і згоряє він відносно повільно), але він більш чутливий до ударів і тертя, ніж інші вторинні вибухові речовини, такі як тротил або тетрил. За певних умов може статися перехід від горіння до детонації [107].

Тринітротолуол (2,4,6-тринітротолуол, 2,4,6-тринітрометилбензол, тротил, тол, TNT) - одна з найпоширеніших бризантних вибухових речовин. Являє собою жовту кристалічну речовину з температурою плавлення 80,85 °C (плавиться в дуже гарячій воді). Тротил менш чутливий до тертя та нагрівання, ніж багато інших вибухових речовин, наприклад динаміт, і спалахує тільки при температурі 290 °C, тому може бути відносно безпечно нагрітий до температури плавлення. Цим тротил зручний у виробництві боєприпасів, така властивість дозволяє легко надати йому потрібну форму за допомогою лиття. Він горить без вибуху жовтуватим полум'ям. Для вибуху необхідне використання детонатора, проте порошкоподібний тротил з домішками може мати підвищену чутливість до зовнішніх впливів, зокрема і полум'я. Має невисоку чутливість до удару (4-8% вибухів при падінні вантажу 10 кг з висоти 25 см). Тротил не вибухає, якщо його впустити чи навіть прострелити з гвинтівки. Для вибуху потрібна сильна ударна хвиля [109].

До іншого класу вибухових матеріалів відносяться фульмінат ртуті та азид свинцю (рис. 2.4). Якщо в структурі молекули в якості окисника також присутній нітроген, то вже в якості окислювальної основи виступають важкі метали.

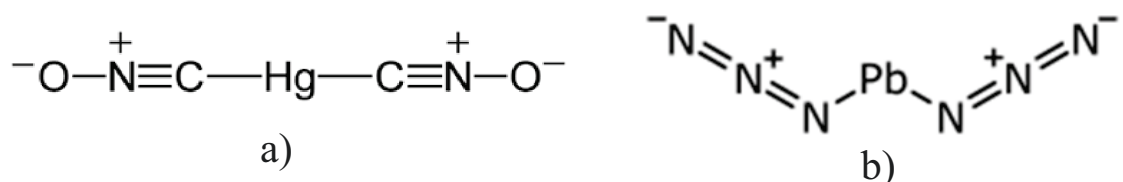
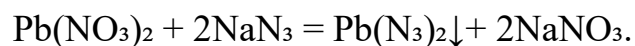


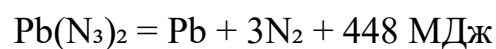
Рис. 2.4. Структури молекул фульмінату ртуті (a) та азиду свинцю (b)

Фульмінат ртуті (гримуча ртуть) - ртутна сіль фульмінової (гримучої) кислоти, що ініціює вибухову речовину. Широко застосовують у капсулях-детонаторах і капсулях-запальниках. Одне з найбільш затребуваних ініціюючих ВР. Останнім часом гримуча ртуть витісняється ефективнішими ініціюючими вибуховими речовинами - азидом свинцю. Легко вибухає при ударі, дії полум'я, розпеченого тіла. При 130-150 °С на повітрі самозаймається з вибухом. У вакуумі вибух може статися вже за 105—115 °С. Волога гримуча ртуть набагато менш вибухонебезпечна, тому її зберігають під шаром води. Вологість гримучої ртуті, що запресована в капсуль-детонатор, повинна бути не більше 0,03%. Концентрована сірчана кислота запускає вибух однієї краплі. Спресована під високим тиском гримуча ртуть втрачає властивості, що ініціює ВР. При вибуховому розкладанні фульмінату ртуті утворюються вуглекислий газ, азот, чадний газ і коричневий твердий нерозчинний залишок, що містить ряд відносно стабільних сполук ртуті.

Азид свинцю — ініціувальна високобризантна вибухова речовина, яка є свинцевою сіллю азотистоводневої кислоти  $Pb(N_3)_2$ . Вода практично не змінює здатності азиду свинцю до вибуху. Синтез азиду свинцю здійснюється в ході обмінної реакції між розчинами солей свинцю та розчинними азидами лужних металів. Азид свинцю в результаті випадає у вигляді білого кристалічного осаду:



Вибухове розкладання азиду свинцю відбувається за схемою:



Тринітрорезорцинат свинцю  $C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$  (1,3-дигідрокси-2,4,6-тринітро-бензол, ТНРС, свинцю (II) тринітрорезорцинат, стифнат свинцю,

тенерес) має в своїй структурі як вуглеводневий цикл так й атом важкого металу (рис. 2.5), тому ця речовина поєднує в собі властивості першого та другого класів.

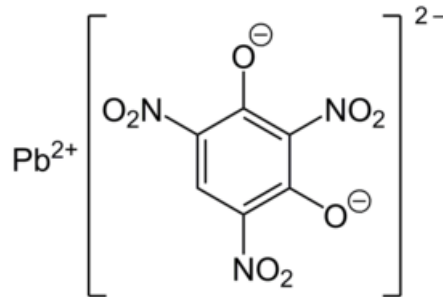


Рис. 2.5. Структура молекули тринітрорезорцинату свинцю

Кристалічна речовина від помаранчевого до коричневого кольору, має сильні токсичні та вибухові властивості. Моногідрат ТНРС має хорошу чутливість до іскри та полум'я, тому використовується як ініціююча вибухова речовина (ВВ) у капсулях-детонаторах і запальниках. Не взаємодіє з металами (мідь, алюміній), чим вигідно відрізняється від азиду свинцю. Погано розчинний у воді та органічних розчинниках. ТНРС дуже сприйнятливий до променя вогню, від якого легко детонує з різким звуком. Вологий продукт (до 10% вологості) спочатку спалахує, а потім детонує. Температура спалаху при часі затримки 1 с складає 320°C. ТНРС набагато легше запалюється від електричної іскри, чим гримуча ртуть і азид свинцю.

Для визначення характерних вибухонебезпечних особливостей представлених матеріалів проведено порівняльний аналіз їх властивостей (рис. 2.6).

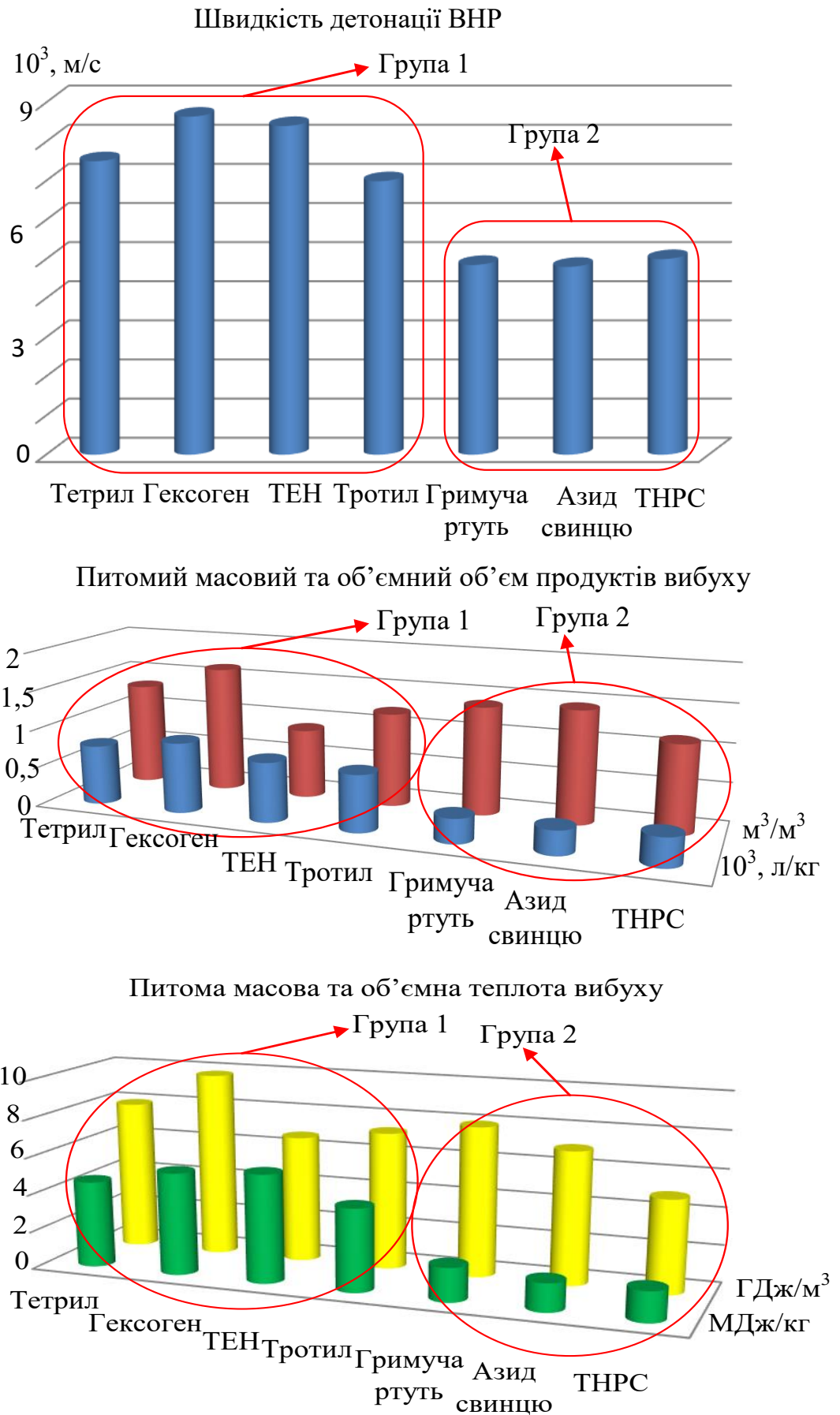


Рис. 2.6. Порівняльні діаграми вибухових властивостей матеріалів

Із рисунку 2.6 чітко видна суттєва різниця вибухових властивостей матеріали другої групи, до якої відносяться матеріали на основі важких металів. При цьому питомі масові величини мають однаковий характер залежності, а саме більш низькі вибухові характеристики матеріалів другої групи. Однак якщо представити характеристики у питомих об'ємних величинах, то відношення вибухових характеристик між першою та другою групами зміниться протилежно. Тобто при цьому вибухові характеристики саме для другої групи стають більшими. Це пов'язано із суттєвою різницею щільності цих матеріалів. Тому при оцінці ступеня вибухонебезпеки того чи іншого матеріалу слід чітко з'ясувати яка маса та об'єм цих речовин розглядається та поєднується.

При аналізі фізико-хімічних властивостей цих матеріалів встановлено, що найбільшу небезпеку становить гексоген, так як він має найбільшу швидкість детонації – 8640 м/с, об'єм продуктів вибуху – 908 л/кг, порівняно високу теплоту вибуху – 5,45 МДж/кг та низьку температуру спалаху – 500 К. Відповідно це необхідно враховувати при розробці безпечних алгоритмів поведіння із цими матеріалами.

### **2.3. Визначення ступеню чутливості вибухонебезпечних матеріалів на дію електромагнітних полів та хвиль.**

Одним з основних електромагнітних властивостей вибухонебезпечних матеріалів є діелектричний нагрів. Нагрів викликається втратами на дипольну поляризацію діелектриків.

Відмінною особливістю діелектричного нагріву є об'ємність тепловиділення в середовищі, що нагрівається. Для НВЧ-нагріву характерна мала глибина проникнення та поверхневе нагрівання, а також неоднорідність прогріву у просторі стоячих хвиль. Однорідність досягається за рахунок теплопровідності матеріалу. У порівнянні з індукційним нагріванням, що застосовується для розігріву електропровідних матеріалів змінним струмом

частотою не більше 30 МГц, діелектричний нагрівання проводиться зазвичай з використанням більш високих частот.

При НВЧ-нагріві використовують електромагнітні хвилі з частотами вище 100 МГц. При використанні електромагнітних НВЧ-хвиль нагрівання викликається молекулярним дипольним обертанням у діелектриці. Вимушені коливання полярних молекул під впливом зовнішнього електричного поля призводять до міжмолекулярного тертя, у результаті в усьому обсязі діелектрика виділяється теплота. У неідеальних діелектричних матеріалах (частково провідних електричний струм) відбувається додатковий нагрівання рахунок провідності.

Тобто чутливість вибухонебезпечного матеріалу до впливу електромагнітних хвиль буде визначатися дипольним моментом молекул цих матеріалів. Дипольний момент молекул в свою чергу залежить від поляризації хімічних зв'язків в структурі цих молекул. Поляризація хімічного зв'язку відбувається за рахунок асиметрії (зміщення) електронної густини, що зв'язує молекулярної орбіталі ковалентного зв'язку. Якщо атоми, що утворюють ковалентний зв'язок, однакові і несуть однакові або близькі по електронегативності замісники, розподіл електронної площини симетрично щодо площини, перпендикулярного зв'язку і зв'язок, що перетинає, на рівних відстанях від атомів; такі зв'язки називають неполярними.

Полярний зв'язок має постійний електричний дипольний момент внаслідок розбіжності центрів тяжіння негативного заряду електронів і позитивного заряду ядер. Більшість ковалентних зв'язків є полярними. Молекули з полярним зв'язком зазвичай набагато реакційніші, ніж неполярні молекули. Поляризація зв'язків робить істотний внесок у електричний дипольний момент молекули.

Дипольний момент поляризованого зв'язку може викликати поляризацію сусідніх зв'язків у молекулі (індуктивний або І-ефект), проте такий ефект швидко слабшає ланцюгом  $\sigma$ -зв'язків. У разі наявності в молекулі системи пов'язаних  $\pi$ -зв'язків можливий сильний вплив

мезомерного або М-ефекту делекалізації електронів на поляризацію зв'язку — аж до поляризації.

З метою визначення дипольного моменту молекул вибухонебезпечних матеріалів розглянемо структуру їх молекул (рис. 2.7).

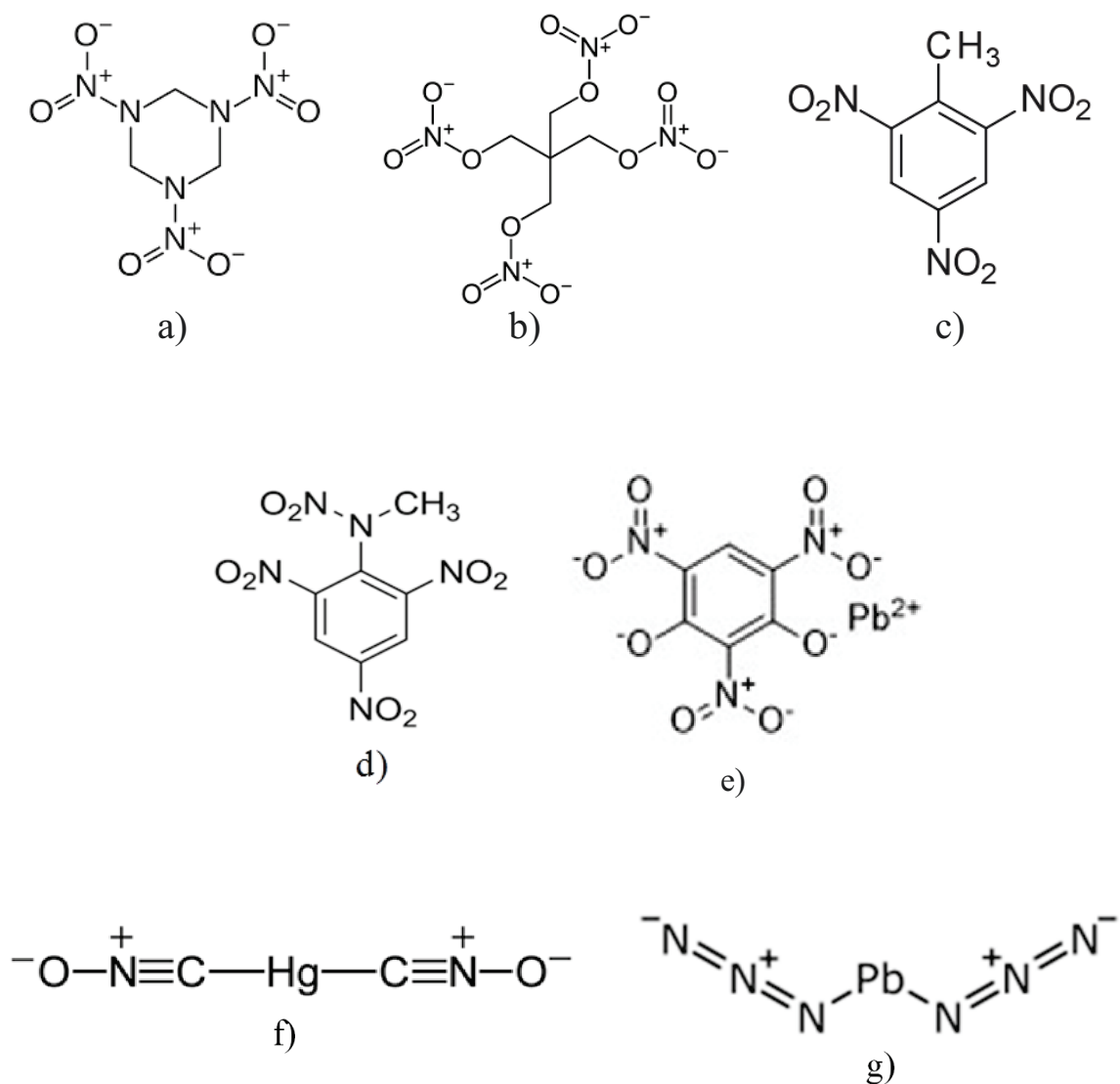


Рис. 2.7. Структури молекул гексогену (а), пентаеритриттетранітрату (b) тринітротолуола (с), тетрилу (d), тринітрорезорцинату свинцю (e), фульмінату ртуті (f) та азиду свинцю (g)

Полярність зв'язку обумовлюється зміщенням сполучної електронної пари до одного з атомів, внаслідок чого утворюється диполь, який вимірюється дипольним моментом (m) добутком кінцевого заряду (q) на

відстань між зарядами ( $l$ ):  $m = q \cdot l$ . Отже, дипольний момент тим більше, чим більше накопичуються при поділі заряди і чим більше відстань між позитивним і негативним зарядами.

Дипольний момент молекули, що містить понад два атоми, залежить як від полярності зв'язків, так і від молекулярної геометрії. Багатоатомна молекула може мати дипольний момент лише у тому випадку, якщо її зв'язки полярні. Однак навіть за наявності полярних зв'язків молекула як ціле може мати дипольного моменту, якщо зв'язку спрямовані отже їх полярності взаємно компенсуються. Розглянемо дипольні моменти деяких хімічних зв'язків (табл. 2.3) та електронегативності окремих атомів (табл. 2.4).

Таблиця 2.3. – Дипольні моменти ( $\mu$ ) зав'язків, що часто зустрічаються

Хімічний зв'язок	Дипольний момент	Хімічний зв'язок	Дипольний момент
H — F	1,9	H — O	1,5
H — Cl	1,1	C — F	1,4
H — Br	0,8	C — O	0,7
H — I	0,4	C — N	0,2
H — C	0,3	C — O	2,4
H — N	1,3	C = N	3,6

Таблиця 2.4. – Ряд електронегативності окремих елементів.

Елемент	Електронегативність	Елемент	Електронегативність
Na	0,9	S	2,5
Li	1,0	I	2,5
Mg	1,2	Br	2,8
Si	1,8	Cl	3,0
P	2,1	N	3,0
H	2,1	O	3,5
C	2,5	F	4,0

Температура кипіння органічних рідин підвищується по мірі підвищення молекулярного дипольного моменту. Енергія тяжіння ( $E$ ) між дипольними молекулами підкорюється залежності:

$$E = m^4/d^6, \quad (2.1)$$

де  $m$  – дипольний момент;  $d$  – відстань між центрами диполей.

Розрахунки дипольних моментів молекул, що містять кілька полярних груп, можна, звичайно, провести, складаючи попарно всі групові моменти, а потім вчинивши так само з результуючими векторами. Значно зручніший спосіб розрахунку через проєкції вектора дипольного моменту на довільно вибрані осі координат:

$$\mu = (m_x^2 + m_y^2 + m_z^2)^{1/2}. \quad (2.2)$$

Проекція вектора дипольного моменту на відповідну вісь складається із суми проєкцій на цю вісь всіх групових моментів. Таким чином для молекули, що включає  $n$  полярних груп:

$$\mu = [(\sum_{i=1}^n m_{xi})^2 + (\sum_{i=1}^n m_{yi})^2 + (\sum_{i=1}^n m_{zi})^2]^{1/2} \quad (2.3)$$

Для обчислення за формулою необхідно знати кути, під якими нахилені вектори групових моментів до осей координат. У деяких випадках, особливо для плоских молекул, ці кути легко розрахувати, знаючи валентні кути. У багатьох випадках під час розрахунків дипольних моментів молекул зручніше користуватися не моментами зав'язків, а моментами окремих атомних груп. Наприклад, при аналізі дипольних моментів молекул зручніше користуватися не моментами зав'язків, а моментами окремих атомних груп. Наприклад, при аналізі дипольних моментів ароматичних нітросполук немає необхідності враховувати окремо моменти зав'язків C – N, N = O, N → O, а доцільно ввести результуючу величину групового моменту  $\mu_{NO_2}$ . За величину групового моменту в ароматичному ряду приймається значення дипольного

моменту монозаміщеного бензолу, в аліфатичному відповідного монозаміщеного метану.

Якщо молекула містить дві полярні групи з моментами  $\mu_1$  та  $\mu_2$ , вільно обертається відповідно навколо осей  $a_1$  та  $a_2$ , причому кути, що утворюються напрямками осей обертання і векторами групових моментів, становлять  $\theta_1$  та  $\theta_2$ , а самі осі укладають між собою кут  $\omega_{12}$ , то сумарний момент розраховується за формулою.

$$\mu = (\mu_1^2 + \mu_2^2 + 2\mu_1\mu_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \omega_{12})^{1/2} \quad (2.4)$$

Розрахуємо дипольні моменти вибухонебезпечних матеріалів. З рисунку 2.7 видно, що молекули гексогену, пентаеритриттетранітрату та фульмінату ртутісиметричні відповідно їх дипольний момент буде дорівнювати 0 ( $\mu(\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6) = 0$ ;  $\mu(\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4) = 0$ ;  $\mu(\text{Hg}(\text{ONC})_2) = 0$ ). Тому нижче приведені розрахунки дипольного моменту для тринітротолуолу, тетрилу та азиду свинцю (Рис. 2.8-2.11).

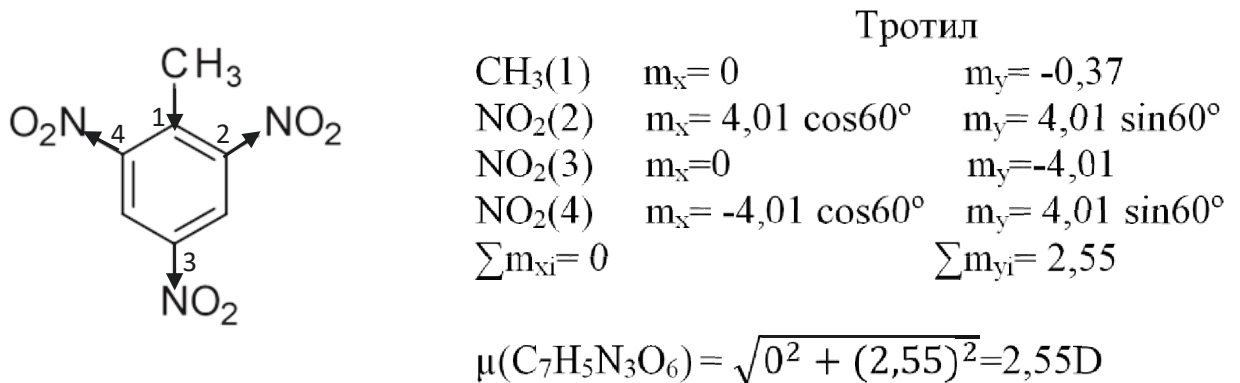


Рис. 2.8. Розрахунок дипольного моменту тротилу

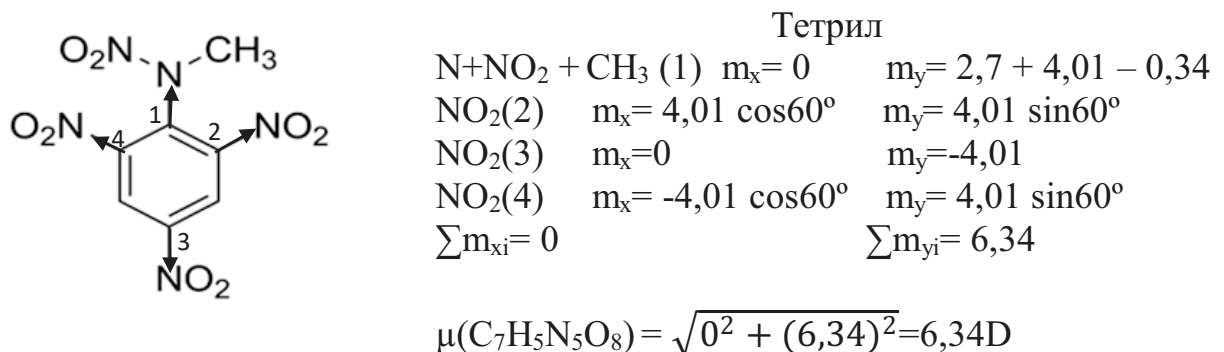


Рис. 2.9. Розрахунок дипольного моменту тетрилу

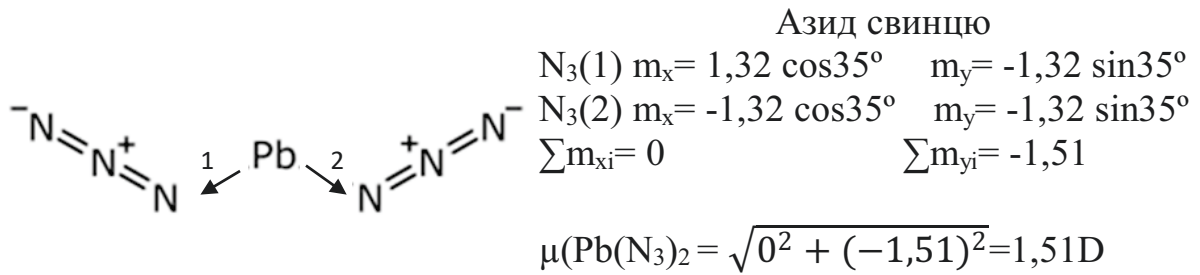


Рис. 2.10. Розрахунок дипольного моменту азиду свинцю

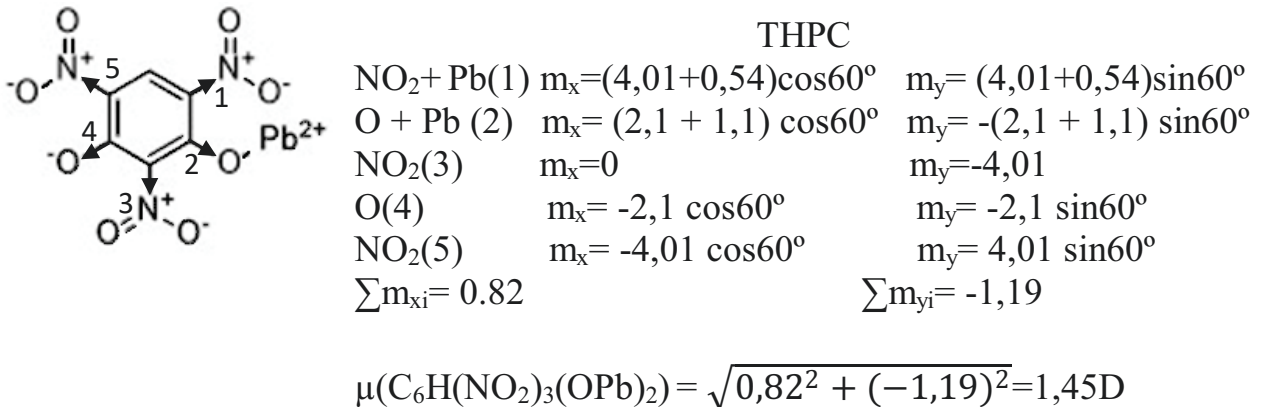


Рис. 2.11. Розрахунок дипольного моменту ТНРСу

Встановлені класи способів дистанційного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів показали, що всі вони мають прямий або опосередкований вплив на матеріалі цих предметів. При цьому їх можна розділити на способи, які зорієнтовані на вплив на матеріали корпусу ВНП та на ті, що впливають на сам матеріал вибухівки. Однак внаслідок того, що кожен ВНП представляє собою суцільну конструкцію із матеріалів корпусу та вибухонебезпечних матеріалів впливом на вибухонебезпечний матеріал неможна нехтувати у будь якому варіанти. В деяких випадках зустрічаються ВНП без корпусу на основі твердих матеріалів вибухівки [17].

Як показав аналіз найбільшого поширення на сьогодні набув саме електромагнітний метод дистанційного виявлення ВНП. Тому виникає необхідність у дослідженні впливу електромагнітних хвиль на вибухонебезпечні матеріали. Під час аналізу механізму впливу електромагнітних хвиль на вибухонебезпечний матеріал встановлено що до

його вибуху може призвести діелектричний нагрів хвилями із частотою вище 100 МГц. Особливістю отриманих результатів є визначення ступеню чутливості вибухонебезпечних матеріалів через величину дипольного моменту їх молекул. Розрахунок дипольних моментів молекул основних вибухонебезпечних матеріалів показав, що такі речовини, як гексоген, пентаеритриттетранітрат та фульмінат ртуті не мають дипольного моменту. Відповідно  $\mu(\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6) = 0$ ,  $\mu(\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4) = 0$  та  $\mu(\text{Hg}(\text{ONC})_2) = 0$ . Це пояснюється симетричною структурою їх молекул, де дії полярних зв'язків скомпенсовані такими ж зв'язками у протилежному напрямку. Тобто такі речовини є нечутливими до електромагнітних полів та хвиль.

Так як структура молекул всіх вибухонебезпечних речовин, що розглядаються в даній роботі є двомірними, то використання методу додавання векторів сил дипольних зв'язків дозволяє спростити розрахунки при задовільній похибці ( $< 10\%$ ). Розрахунки показали, що такі різні за структурою молекули, як тринітрорезорцинат свинцю ( $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3(\text{OPb})_2$ ) та азид свинцю ( $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ) мають близькі значення дипольного моменту – 1,55 D та 1,45 D відповідно. При цьому слід зазначити, що такий результат неможна пояснювати вмістом Pb, тому що вид міжатомних зв'язків з плюмбумом та їх кількість суттєво різняться. При цьому такі речовини, як тринітротолуол ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ ) та тетрил ( $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$ ) хоча і мають схожу з гексогеном ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ) структуру молекул, але при цьому суттєво відрізняються за показником дипольного моменту. Дипольний момент для тринітротолуолу достатньо високий, та становить 2,55 D, що більше середнього значення для органічних речовин. Однак дипольний момент тетрилу є взагалі аномально високим – 6,34 D [29]. Частково таке високе значення дипольного моменту у тетрилу можна пояснити значним вмістом азоту, який має значну електронегативність, що становить 3 (табл. 2.3). Однак для остаточного визначення такого аномально високого значення дипольного моменту тетрилу необхідно проводити додаткові дослідження, що не є задачею цієї роботи.

З використанням методу додавання векторів сил розраховано дипольні моменти для основних вибухонебезпечних матеріалів, а саме тринітротолуолу ( $\mu$  ( $C_7H_5N_3O_6$ )=2,55 D), тетрилу ( $\mu$  ( $C_7H_5N_5O_8$ )=6,34 D), тринітрорезорцинату свинцю ( $\mu$  ( $C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$ )=1,51 D) та азиду свинцю ( $\mu$  ( $Pb(N_3)_2$ )=1,45D). Ці матеріали обрані для дослідження виходячи із аналізу конструктивного складу найбільш поширених вибухонебезпечних предметів. Оцінка дипольного моменту молекул вибухонебезпечних матеріалів дозволяє оцінити чутливість вибухонебезпечних матеріалів до дії електромагнітних полів та хвиль. Відповідно до розрахунку найбільшу небезпеку при впливі електромагнітних хвиль становлять вибухонебезпечні предмети із вмістом тетрилу. Встановлено, що на такі вибухонебезпечні матеріали як гексоген, пентаеритриттетранітрат та фульмінат ртуті електромагнітні хвилі не чинять активуючої дії так як вони мають  $\mu = 0D$ , що пояснюється двовимірною симетричною структурою їх молекул.

## Висновки до розділу 2

1. Проведено аналіз структури найбільш поширених видів вибухонебезпечних предметів, які можуть зустрічатись на теренах Східної Європи при роботі по розмінуванню територій та встановлено основні вибухонебезпечні матеріали, які в них використовуються. Встановлено, що найбільшу небезпеку мають вибухові матеріали у капсулях-детонаторах, тому саме на безпеку роботи з ними необхідно звернути увагу. Серед найбільш поширених та небезпечних матеріалів проаналізовані вибухові властивості тетрилу, тексогену, тринітротолуолу, фульмінату ртуті, азиду свинцю, тринітрорезорцинату свинцю.

2. Встановлено, що по фізико-хімічним властивостям вибухових матеріалів діляться на два характерних класи. Ці класи чітко співпадають із структурою молекул цих речовин. А саме до першого класу відносяться вибухові матеріали на основі вуглеводневої окислювальної складової, до

другого відповідно матеріали із вмістом важких металів. Визначено, що так як густина матеріалів другого класу у 2-4 рази більше густини матеріалів першого класу, то питомі об'ємні величини вибухових параметрів мають протилежне співвідношення.

3. З використанням методу додавання векторів сил розраховано дипольні моменти для основних вибухонебезпечних матеріалів, а саме тринітротолуолу ( $\mu$  ( $C_7H_5N_3O_6$ )=2,55 D), тетрилу ( $\mu$  ( $C_7H_5N_5O_8$ )= 6,34 D), тринітрорезорцинату свинцю ( $\mu$  ( $C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$ )=1,51 D) та азиду свинцю ( $\mu$  ( $Pb(N_3)_2$ )=1,45D). Відповідно до розрахунку найбільшу небезпеку при впливі електромагнітних хвиль становлять вибухонебезпечні предмети із вмістом тетрилу. Встановлено, що на такі вибухонебезпечні матеріали як гексоген, пентаеритриттетранітрат та фульмінат ртуті електромагнітні хвилі не чинять активуючої дії так як вони мають  $\mu = 0D$ , що пояснюється двовимірною симетричною структурою їх молекул.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ХВИЛЬ З ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМИ ПРЕДМЕТАМИ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ

У даному розділі досліджено інтенсивності поглинання вибухонебезпечним матеріалом електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону. Проведено математичний опис взаємодії довільно падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Розроблена математична модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах. Розроблена математична модель впливу на вибухонебезпечні предмети електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону при довільному куті їх падіння. Розроблена математична модель дифракції електромагнітних хвиль на багатошаровій структурі вибухонебезпечного предмету. Розроблена математична модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь багатошарову структуру. Встановлено ступеня ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні вибухонебезпечного предмету. Проведено перевірку працездатності розроблених моделей взаємодії електромагнітних полів та хвиль на вибухонебезпечні предмети різного конструктивного виконання

Основні результати розділу викладені у публікаціях [18-21, 34, 40].

### **3.1. Дослідження інтенсивності поглинання вибухонебезпечним матеріалом електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону**

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 [67].

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 [68]. Розробка алгоритмів для ефективного опрацювання сигналів, отриманих з датчиків, і виділення корисної інформації на тлі перешкод є особливо складним питанням.

### **3.1.1. Математичний опис взаємодії довільно падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини**

На основі результатів, отриманих у попередньому розділі далі будемо розглядати безоболонкові ВНП 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.

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 [110]:

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E} \times \dot{H}^*], \quad (3.1)$$

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{E}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{H}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

$\dot{E}^+$  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:

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \dot{\mu}} = k - i \cdot \alpha, \quad (3.3)$$

де  $\omega$  – кутова частота електромагнітної хвилі;

$\dot{\epsilon} = \epsilon \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_\epsilon]$  – відносна діелектрична проникність ВР;

$\dot{\mu} = \mu \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_\mu]$  – відносна магнітна проникність ВР;

$k$  – хвильове число (фазова постійна розповсюдження, що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані);

$\alpha$  – коефіцієнт затухання хвилі.

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

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\epsilon} + 1)}, \\ \alpha &= \frac{\omega}{2 \cdot c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\epsilon} - 1)}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де  $c$  – швидкість світла.

Розглянемо падіння з повітря електромагнітної хвилі з хвильовим числом  $k_0$  під кутом  $\theta_0$  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  $\theta_1$  до нормалі  $z$ . Відповідно до закону Френеля  $\theta_0 = \theta_1$ . Так як всі ВР відносяться до діелектриків з різними діелектричними проникностями  $\epsilon$ , 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  $\theta_2$  до нормалі  $z$  (рис. 3.1).

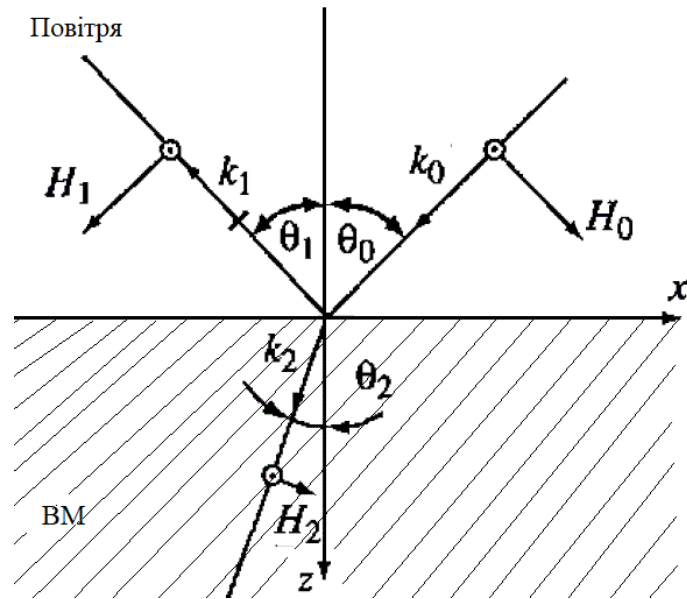


Рис. 3.1. Падіння електромагнітної хвилі на поверхню ВР

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

$$k_0 = k_{1x} = k_{2x}, \quad (3.5)$$

$$\text{де } k_0 = \frac{\omega}{c}.$$

Проекція хвильових векторів на вісь  $z$  при  $\mu_1 = \mu_2 = 1$  та куті падіння  $\theta_0$  виражається згідно (3.5) у вигляді:

$$\begin{cases} k_{1z} = -k_{0z} = \frac{\omega}{c} \cdot \cos\theta_0 \\ \dot{k}_{2z} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon - k_{0x}^2} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta_0} \end{cases} \quad (3.6)$$

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:

$$\theta_1 = \theta_0, \quad (3.7)$$

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}}}. \quad (3.8)$$

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 (3.7) та (3.8) для кутів падіння  $\theta_0$ , відбиття  $\theta_1$  та переломлення  $\theta_2$  відомі з геометричної оптики як закон Снелліуса [110].

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. 3.1), то граничні умови безперервності  $E_y$  та  $H_x$  приводять до формул Френеля:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= \frac{k_{0z} - \dot{k}_{2z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0 \\ \dot{E}_2 &= \frac{2 \cdot k_{0z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{2 \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

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

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\sin(\theta_2 - \theta_0)}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0 \\ E_2 &= \frac{2 \cdot \cos\theta_0 \cdot \sin\theta_2}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

При розташуванні вектора  $\vec{E}_0$ , падаючої хвилі в площині падіння формули Френеля видозмінюються [111]:

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= \frac{\dot{\epsilon} \cdot \cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}}{\dot{\epsilon} \cdot \cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot H_0, \\ \dot{H}_2 &= \frac{2 \cdot \dot{\epsilon} \cdot \cos\theta_0}{\dot{\epsilon} \cdot \cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot H_0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

та для умов прозорості ВР записуються як [18]:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{\operatorname{tg}(\theta_0 - \theta_2)}{\operatorname{tg}(\theta_0 + \theta_2)} \cdot H_0, \\ H_2 &= \frac{\sin(2 \cdot \theta_0)}{\sin(\theta_0 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_0 - \theta_2)} \cdot H_0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Отримані вирази (3.7–3.12) дозволяють визначати співвідношення відбитої та тією що пройшла всередину ВР енергії електромагнітних хвиль.

### 3.1.2. 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:

$$R = \frac{|\vec{E}_1|^2}{|\vec{E}_0|^2}. \quad (3.13)$$

При нормальному падінні плоскої хвилі на границю поділу середовищ ( $\theta_0 = 0$ ) обидва випадки поляризації еквівалентні й тому [19]:

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} \right|^2. \quad (3.14)$$

Формула (3.14) 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 (3.8)-(3.13) як:

$$R_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_0)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_0)}, \quad (3.15)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\text{tg}^2(\theta_2 - \theta_0)}{\text{tg}^2(\theta_2 + \theta_0)}, \quad (3.16)$$

де індекс  $\perp$  відповідає поляризації хвилі перпендикулярно площині падіння, а індекс  $\parallel$  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:

$$T = 1 - R \quad (3.17)$$

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

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

На рис. 3.2 приведено залежність коефіцієнту відбиття  $R$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  (в діапазоні  $0 \div 0,1$ ) ВР, розраховану за формулою (3.14).

На рис. 3.3 приведено залежність коефіцієнту переломлення  $T$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  (в діапазоні  $0 \div 0,1$ ) ВР, розраховану за формулою (3.14) та (3.17) [20].

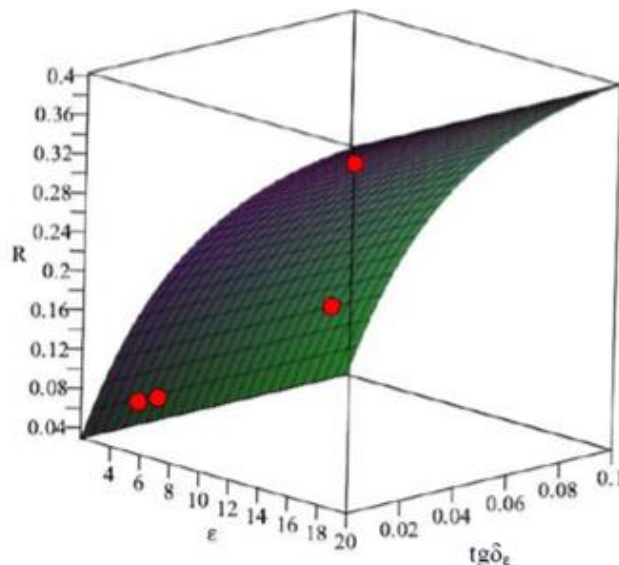


Рис. 3.2. Залежність коефіцієнту відбиття  $R$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  (в діапазоні  $0 \div 0,1$ ) ВР

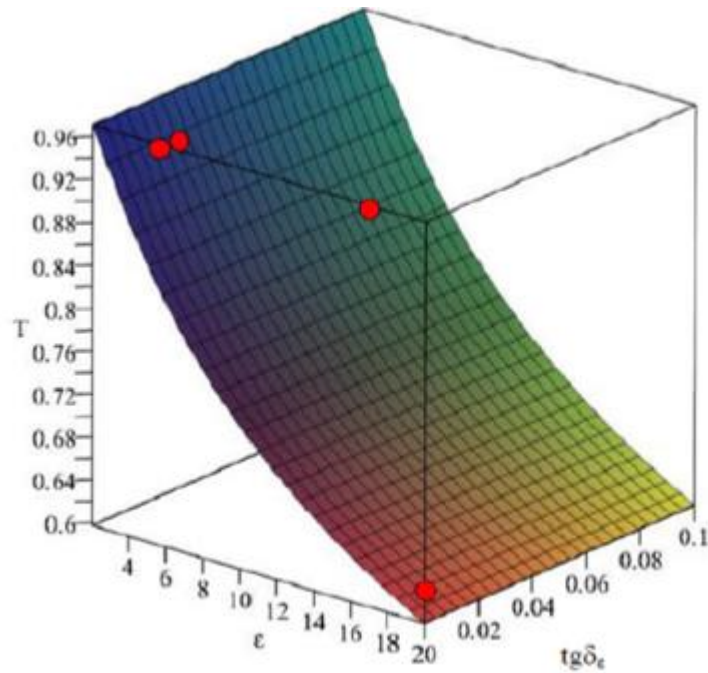


Рис. 3.3. Залежність коефіцієнту переломлення  $T$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  (в діапазоні  $0 \div 0,1$ ) ВР

На рис. 3.2 та рис. 3.3 додатково нанесено точки – коефіцієнти відбиття  $R$  та коефіцієнти переломлення  $T$  для найбільш розповсюджених ВР, параметри яких приведено в табл. 3.1.

Найбільше значення коефіцієнт відбиття  $R$  має для ВР «нітрогліцерин», найменшим – для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол». Це можна пояснити тим, що нітрогліцерин має найбільшу величину відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  у порівнянні з іншими ВР, що досліджувалися.

З рис. 3.2 видно, що при збільшенні величини відносної діелектричної проникності в діапазоні  $\epsilon = 1 \div 20$  при фіксованій величині тангенсу кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  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 досліджуваному діапазоні його зміни ( $\text{tg}\delta_\epsilon = 0 \div 0,1$ ) при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$ . Відповідно з

рис. 3.3 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 досліджуваному діапазоні його зміни  $\text{tg}\delta_\varepsilon = 0 \div 0,1$  при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$ . Найбільше значення коефіцієнт переломлення  $T$  має для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол», найменше – для ВР «нітрогліцерин», що також можна пояснити величиною відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  ВР.

З аналізу рис. 3.2 та рис. 3.3 випливає, що чим більше величина відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  ВР, тим більше коефіцієнт відбиття  $R$  та менше коефіцієнт переломлення  $T$ . Тобто чим більше величина відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  ВР, тим більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається й тим легше визначення місця знаходження ВР.

Як видно з рис. 3.2 та рис. 3.3 величини коефіцієнтів відбиття та переломлення практично не залежать від зміни тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\varepsilon$  в обраному діапазоні його зміни. Тому на рис. 3.4 представлена залежність коефіцієнту відбиття  $R$  від десяткового логарифму тангенса кута діелектричних втрат  $\lg(\text{tg}\delta_\varepsilon)$  ВР, а на рис. 3.5 – залежність коефіцієнту переломлення  $T$  від  $\lg(\text{tg}\delta_\varepsilon)$  відповідно в більш широкому діапазоні зміни  $\text{tg}\delta_\varepsilon$ .

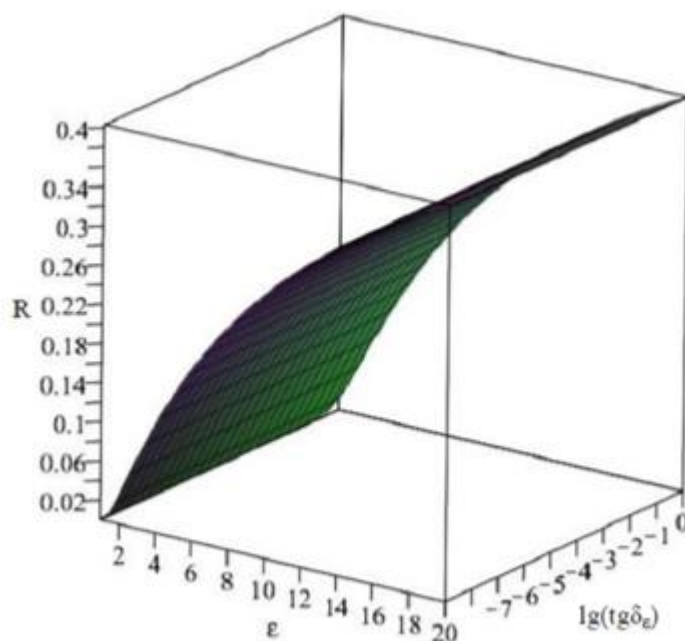


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнту відбиття  $R$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат  $\lg(\operatorname{tg}\delta_\epsilon)$  ВР

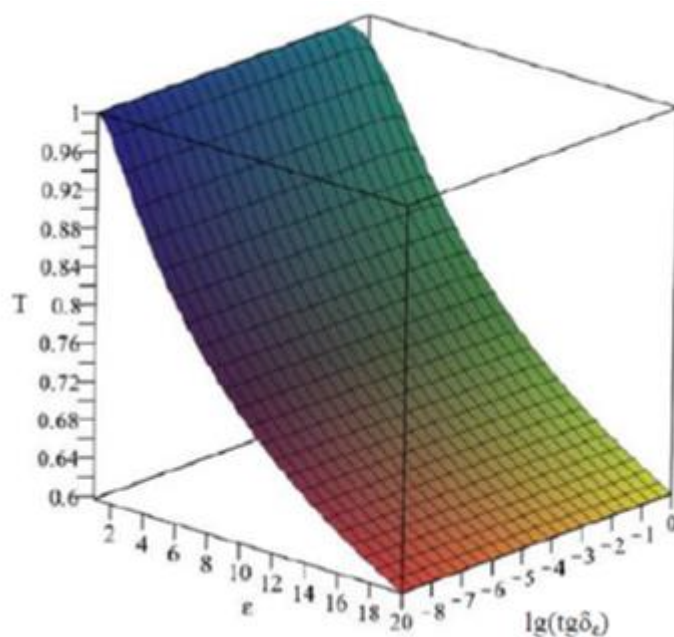


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнту переломлення  $T$  від відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат  $\lg(\operatorname{tg}\delta_\epsilon)$  ВР

Рис. 3.4 та рис. 3.5 було навмисно побудовано для з'ясування впливу зміни в широкому діапазоні величини тангенсу кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta_\epsilon$

в ВМ на величини коефіцієнту відбиття  $R$  та коефіцієнту переломлення  $T$ . Видно, що в діапазоні  $\text{tg}\delta_\varepsilon = 10^{-9} \div 1$  зміна тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\varepsilon$  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.

На рис. 3.6 приведено залежність коефіцієнту відбиття  $R_\perp$  електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння  $\theta_0$  та відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) ВР, розраховану за формулою (3.15) [21].

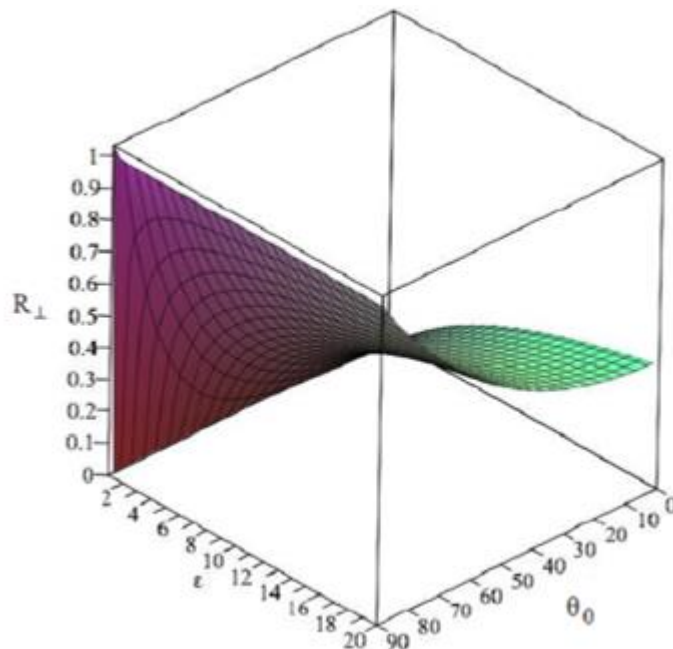


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнту відбиття  $R_\perp$  електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння  $\theta_0$  та відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  ВР

На рис. 3.7 приведено залежність коефіцієнту відбиття  $R_{||}$  електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння  $\theta_0$  та відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  (в діапазоні  $1 \div 20$ ) ВР, розраховану за формулою (3.16).

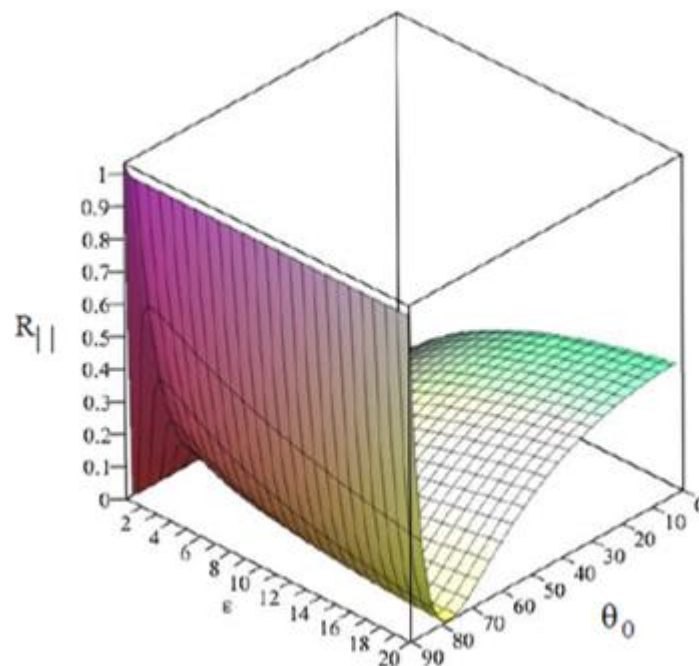


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнту відбиття  $R_{||}$  електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння  $\theta_0$  та відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  ВР

Таблиця 3.1. – Діелектричні властивості деяких ВР

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

З рис. 3.6 та рис. 3.7 видно, що залежності коефіцієнту відбиття  $R_{\perp}$  електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння та коефіцієнту відбиття  $R_{||}$  електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння  $\theta_0$  суттєво відрізняються при всіх кутах падіння  $\theta_0$ . В усьому діапазоні зміни кута падіння  $\theta_0$  крім  $\theta_0 = 0$  та  $\theta_0 = \pi/2$

,  $R_{\perp} > R_{\parallel}$ . Коефіцієнт відбиття  $R_{\perp}$  монотонно зростає при збільшенні кута падіння  $\theta_0$  в усьому діапазоні змін  $\varepsilon$ . Коефіцієнт відбиття  $R_{\parallel}$  при збільшенні  $\theta_0$ , спочатку зменшується від 1 до 0 (при  $\theta_0 = \arctg\sqrt{\varepsilon}$ ), а потім починає монотонно зростати.

Слід відмітити, що залежності, приведені на рис. 3.6 та рис. 3.7, побудовано у припущенні дійсності величини відносної діелектричної проникності  $\dot{\varepsilon}$  ВР (тобто  $\text{tg}\delta_{\varepsilon} = 0$  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 (3.15) та (3.16)) 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.

Таким чином, побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі, з поверхнею 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 вибухонебезпечного предмету. 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 електромагнітного 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.

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 ( $\text{tg}\sigma_{\epsilon} < 0,1$ ) 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.

### 3.2. Математична модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах

Припустимо, що електромагнітна хвиля НВЧ-діапазону падає з повітря перпендикулярно площині ВНП, що лежить на поверхні землі (рис. 3.8).

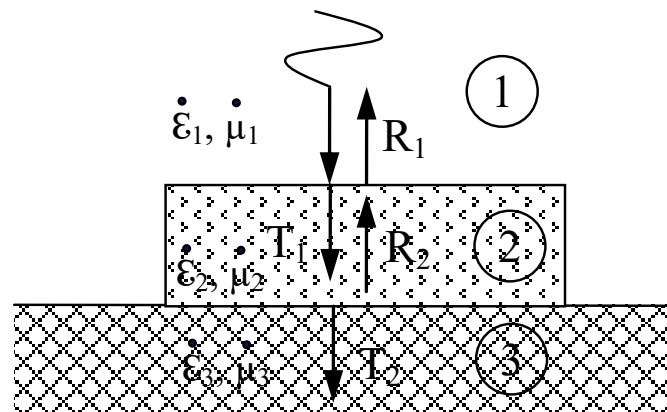


Рис. 3.8. Падіння електромагнітної хвилі на ВМ, що лежить на поверхні землі

Розрахуємо яка частка потужності падаючої електромагнітної хвилі може буде поглинена (локалізована всередині) ВМ. При проведенні розрахунків спираємось на базові джерела [112].

Повітря вважаємо ідеальним діелектриком, який характеризується, відповідно, абсолютними комплексними діелектричної проникністю та магнітної проникністю:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_1 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\varepsilon_1}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0], \quad \dot{\mu}_1 = \mu_1 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\mu_1}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0], \quad (3.18)$$

де (тут та далі,  $j = 1, 2, 3$ )

$\varepsilon_j$  - абсолютна діелектрична проникність середовища (матеріалу),

$\operatorname{tg} \delta_{\varepsilon_j}$  - тангенс кута діелектричних втрат середовища (матеріалу),

$\mu_j$  - абсолютна магнітна проникність середовища (матеріалу),

$\operatorname{tg} \delta_{\mu_j}$  - тангенс кута магнітних втрат середовища (матеріалу).

ВМ вважаємо діелектриком з втратами, що характеризується, відповідно, абсолютними комплексними діелектричної проникністю та магнітної проникністю:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\varepsilon_2}], \quad \dot{\mu}_2 = \mu_2 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\mu_2}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0]. \quad (3.19)$$

Поверхню землі вважаємо діелектриком з втратами, що характеризується, відповідно, абсолютними комплексними діелектричної проникністю та магнітної проникністю:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_3 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\varepsilon_3}], \quad \dot{\mu}_3 = \mu_3 \cdot [1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta_{\mu_3}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0]. \quad (3.20)$$

Фактично електромагнітна хвиля послідовно проходить дві границі розділу середовищ 1-2 та 2-3. Для першої границі для електромагнітної хвилі позначимо коефіцієнт відбиття за потужністю –  $R_1$  та коефіцієнт проходження за потужністю –  $T_1$ . Для другої границі для електромагнітної хвилі позначимо коефіцієнт відбиття за потужністю  $R_2$  та коефіцієнт проходження за потужністю –  $T_2$ . Частку потужності електромагнітної хвилі, що буде поглинена ВМ, можна оцінити за формулою  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$ .

Проаналізуємо падіння електромагнітної хвилі з однорідного середовища з параметрами  $\dot{\epsilon}_1 = \epsilon_1 \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_{\epsilon_1}]$ ,  $\dot{\mu}_1 = \mu_1 \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_{\mu_1}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0]$  в однорідне середовище з параметрами  $\dot{\epsilon}_2 = \epsilon_2 \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_{\epsilon_2}]$ ,  $\dot{\mu}_2 = \mu_2 \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_{\mu_2}] = 1 \cdot [1 - i \cdot 0]$  (рис. 3.9). Вважаємо, що довжина  $\lambda$  електромагнітної хвилі є меншою у порівнянні з розмірами ВМ, на який ця електромагнітна хвиля падає (електромагнітна хвиля є плоскою).

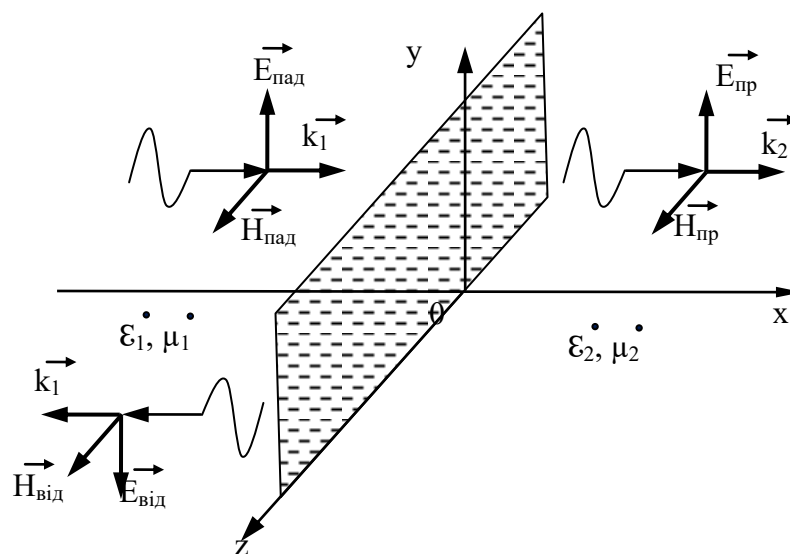


Рис. 3.9. Падіння електромагнітної хвилі на границю розділу двох середовищ ( $\vec{k}_1$ ,  $\vec{k}_2$ ,  $\vec{k}_3$  - хвильові вектори)

Припускаємо, що електромагнітна хвиля розповсюджується у позитивному напрямку осі  $0x$ . Припустимо, що у падаючій електромагнітній хвилі поляризація така, що вектор напруженості електричного поля спрямований вздовж осі  $0y$ , й, відповідно, вектор напруженості магнітного поля спрямований вздовж осі  $0z$ . Запишемо вирази для комплексних амплітуд напруженості електричного та магнітного полів відповідно (припускаємо, що початкова фаза дорівнює нулю):

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{пад}} &= \dot{E}_{\text{пад}}^a \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot x} \\ \dot{H}_{\text{пад}} &= \frac{\dot{E}_{\text{пад}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot x}\end{aligned}\quad (3.21)$$

де  $\dot{E}_{\text{пад}}^a$  - амплітуда падаючої хвилі,

$$k_1 = |\dot{k}_1| = \left| \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}_1 \cdot \dot{\mu}_1} \right| - \text{хвильове число падаючої хвилі,}$$

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_1}{\dot{\epsilon}_1}} - \text{хвильовий опір першого середовища.}$$

Електромагнітна хвиля відбивається від границі розділу середовищ. В першому середовищі відбита хвиля має електричну та магнітну складові:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{\text{від}} &= \dot{E}_{\text{від}}^a \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot x} \\ \dot{H}_{\text{від}} &= \frac{\dot{E}_{\text{від}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot x},\end{aligned}\quad (3.22)$$

де  $\dot{E}_{\text{від}}^a$  - амплітуда відбитої хвилі,

Тоді електрична та магнітна складові сумарної електромагнітної хвилі у першому середовищі мають вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{E}_1 &= \dot{E}_{\text{пад}} + \dot{E}_{\text{від}} = \dot{E}_{\text{пад}}^a \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot x} + \dot{E}_{\text{від}}^a \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot x} \\ \dot{H}_1 &= \dot{H}_{\text{пад}} - \dot{H}_{\text{від}} = \frac{\dot{E}_{\text{пад}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot x} - \frac{\dot{E}_{\text{від}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot x},\end{aligned}\quad (3.23)$$

Електрична та магнітна складові електромагнітної хвилі, що пройшла у друге середовище, мають вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= \dot{E}_{\text{пр}}^a \cdot e^{i \cdot k_2 \cdot x} \\ \dot{H}_2 &= \frac{\dot{E}_{\text{пр}}^a}{\dot{Z}_2} \cdot e^{i \cdot k_2 \cdot x},\end{aligned}\quad (3.24)$$

де  $\dot{E}_{\text{пр}}^a$  - амплітуда хвилі, що пройшла у друге середовище,

$$k_2 = |\dot{k}_2| = \left| \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}_2 \cdot \dot{\mu}_2} \right| - \text{хвильове число хвилі, що пройшла у друге}$$

середовище,

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\dot{\mu}_2}{\dot{\epsilon}_2}} - \text{хвильовий опір другого середовища.}$$

Визначимо коефіцієнт відбиття за амплітудою  $\dot{\rho} = \frac{\dot{E}_{\text{від}}^a}{\dot{E}_{\text{пад}}^a}$  та коефіцієнт

проходження за амплітудою  $\dot{\tau} = \frac{\dot{E}_{\text{пр}}^a}{\dot{E}_{\text{пад}}^a}$ . Для цього використовуємо умови

безперервності тангенціальних компонент електричного та магнітного полів на границі розділу середовищ [34]:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{E}_2 \big|_{x=0} \\ \dot{H}_1 = \dot{H}_2 \big|_{x=0} \end{cases} \quad (3.25)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_{\text{пад}}^a \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot 0} + \dot{E}_{\text{від}}^a \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot 0} = \dot{E}_{\text{пр}}^a \cdot e^{i \cdot k_2 \cdot 0} \\ \frac{\dot{E}_{\text{пад}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{i \cdot k_1 \cdot 0} - \frac{\dot{E}_{\text{від}}^a}{\dot{Z}_1} \cdot e^{-i \cdot k_1 \cdot 0} = \frac{\dot{E}_{\text{пр}}^a}{\dot{Z}_2} \cdot e^{i \cdot k_2 \cdot 0}, \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\begin{cases} \dot{E}_{\text{пад}}^a + \dot{E}_{\text{від}}^a = \dot{E}_{\text{пр}}^a \\ \frac{\dot{E}_{\text{пад}}^a}{\dot{Z}_1} - \frac{\dot{E}_{\text{від}}^a}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{E}_{\text{пр}}^a}{\dot{Z}_2} \end{cases} \quad (3.27)$$

Ділимо леву та праву частини рівнянь системи (3.27) на амплітуду падаючої хвилі та отримуємо

$$\begin{cases} 1 + \dot{\rho} = \dot{\tau} \\ \frac{1}{\dot{Z}_1} - \frac{\dot{\rho}}{\dot{Z}_1} = \frac{\dot{\tau}}{\dot{Z}_2} \end{cases} \quad (3.28)$$

Остаточно коефіцієнти відбиття та проходження за амплітудою мають вид:

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_1} \quad (3.29)$$

$$\dot{\tau} = \frac{2 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_1} \quad (3.30)$$

Визначимо коефіцієнт відбиття  $R$  за потужністю та коефіцієнт проходження  $T$  за потужністю:

$$R = \frac{|\dot{S}_{\text{від}}|^2}{|\dot{S}_{\text{пад}}|^2} \quad (3.31)$$

$$T = \frac{|\dot{S}_{\text{пр}}|^2}{|\dot{S}_{\text{пад}}|^2}, \quad (3.32)$$

де  $\dot{S}_{\text{пад}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\dot{E}_{\text{пад}}^a|^2}{\dot{Z}_1}$ ,  $\dot{S}_{\text{від}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{E}_{\text{пад}}^a \cdot |\dot{\rho}|^2}{\dot{Z}_1}$ ,  $\dot{S}_{\text{пр}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\dot{E}_{\text{пад}}^a|^2 \cdot |\dot{\tau}|^2}{\dot{Z}_2}$  - середні потоки

потужності (вектора Пойнтинга (у загальному випадку  $\dot{S} = \frac{1}{2} [\dot{E} \cdot \dot{H}]$ )), що

переносяться падаючою, відбитою та такою, що пройшла електромагнітними хвилями відповідно. Згідно закону збереження енергії  $\dot{S}_{\text{пад}} = \dot{S}_{\text{від}} + \dot{S}_{\text{пр}}$  та  $R + T = 1$ .

Після підстави отримуємо:

$$R = |\rho|^2, \quad (3.33)$$

$$T = |\tau|^2 \cdot \left| \frac{\dot{Z}_1}{\dot{Z}_2} \right|. \quad (3.34)$$

Остаточно отримуємо для зроблених раніше припущень:

$$R = \frac{\left| \sqrt{\frac{\dot{\mu}_2}{\dot{\epsilon}_2}} - \sqrt{\frac{\dot{\mu}_1}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2}{\left| \sqrt{\frac{\dot{\mu}_2}{\dot{\epsilon}_2}} + \sqrt{\frac{\dot{\mu}_1}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2} = \frac{\left| 1 - \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2}{\left| 1 + \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2}, \quad (3.35)$$

$$T = 1 - R. \quad (3.36)$$

Тоді:

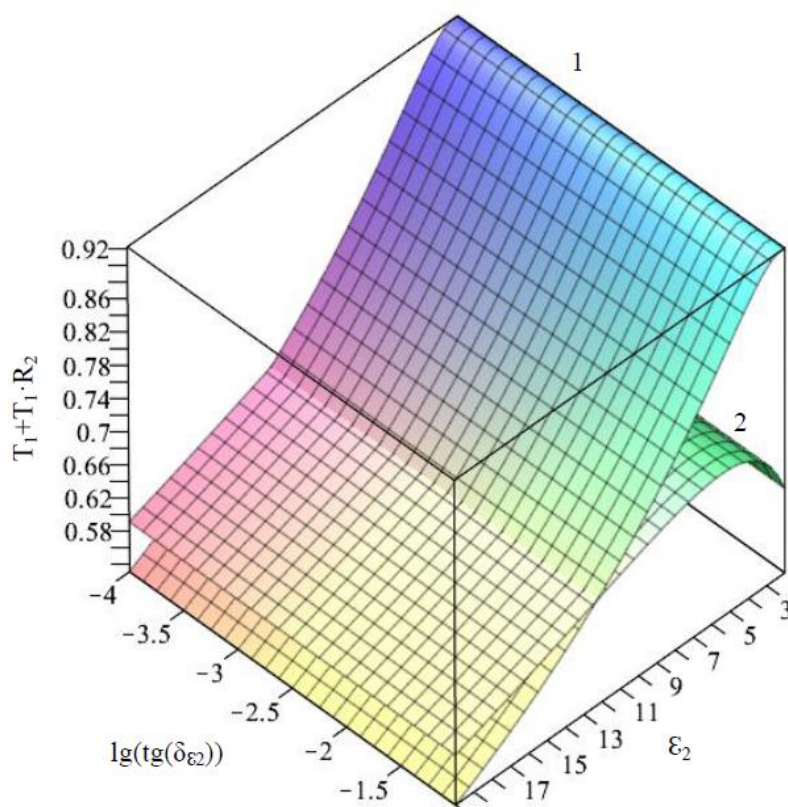
$$R_1 = \frac{\left| 1 - \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2}{\left| 1 + \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2}{\dot{\epsilon}_1}} \right|^2}, \quad T_1 = 1 - R_1, \quad R_2 = \frac{\left| 1 - \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_2}} \right|^2}{\left| 1 + \sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_3}{\dot{\epsilon}_2}} \right|^2}. \quad (3.37)$$

На рис. 3.10 приведено розраховану з використанням формул (3.37) залежність частки потужності  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  електромагнітної хвилі, що буде поглинена ВМ, від зміни величини абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_2$  та десятичного логарифму тангенса кута діелектричних втрат  $\lg(\text{tg}\delta_{\epsilon_2})$  ВМ в діапазоні  $\epsilon_2 = 2 \div 20$  та  $\lg(\text{tg}\delta_{\epsilon_2}) = 10^{-4} \div 10^{-1}$  для ВМ, що лежить на поверхні

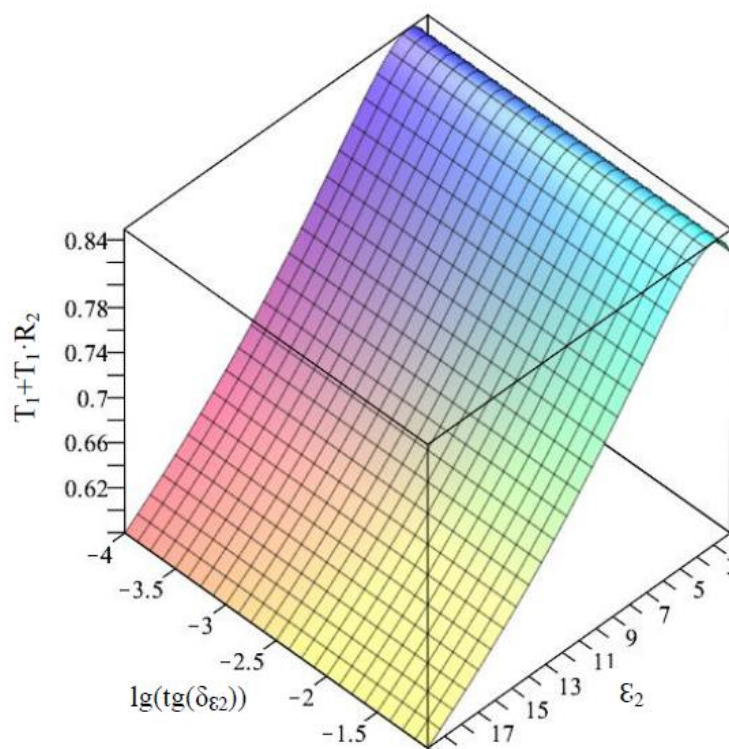
сухого піску, вологої деревини та глинозему (абсолютна комплексна діелектрична проникність  $\dot{\epsilon}_3 = 5,0 \cdot [1 - i \cdot 0,01]$  ,  $\dot{\epsilon}_3 = 30,0 \cdot [1 - i \cdot 0,01]$  та  $\dot{\epsilon}_3 = 10,0 \cdot [1 - i \cdot 0,001]$  відповідно).

З рис. 3.10 видно, що при збільшенні величини абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_2$  фіксованому значенні  $\lg$  тангенсу кута діелектричних втрат  $\lg(\operatorname{tg} \delta_{\epsilon_2})$  ВМ в діапазоні  $\epsilon_2 = 2 \div 5$  спостерігається екстремум частки потужності  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  електромагнітної хвилі, що поглинена ВМ, що знаходиться на поверхні вологої деревини та глинозему. з подальшим плавним зменшенням до значення, близького до 0,5 при  $\epsilon_2 = 20$  . З фізичної точки зору можна зробити висновок, про наявність резонансу  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  при малих  $\epsilon_2$  . Для ВМ, що знаходиться на поверхні сухого піску резонанс відсутній в усьому діапазоні зміни  $\epsilon_2$  . При зменшенні абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_2$  резонанс зсувається в напрямку менших  $\epsilon_2$  . Також видно, що чим менше величина  $\epsilon_2$  , тим більше величина  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  в діапазоні  $\epsilon_2 \approx 2 \div 10$  , що свідчить про суттєве відбиття електромагнітної хвилі від поверхні, на якій знаходиться ВМ. Залежність  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  від  $\lg(\operatorname{tg} \delta_{\epsilon_2})$  є лінійною та змінюється незначно в усьому діапазоні дослідження зміни  $\epsilon_2$  (від 2 до 20).

На рис. 3.11 приведено розраховану з використанням формул (3.37) залежність частки потужності  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  електромагнітної хвилі, що буде поглинена ВМ, від зміни величини абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_3$  та десятичного логарифму тангенса кута діелектричних втрат  $\lg(\operatorname{tg} \delta_{\epsilon_3})$  в діапазоні  $\epsilon_3 = 1 \div 12$  та  $\lg(\operatorname{tg} \delta_{\epsilon_3}) = 10^{-4} \div 0,5$  поверхні землі, на якій лежить ВМ TNT, PET та нітрат амонію (абсолютна комплексна діелектрична проникність  $\dot{\epsilon}_2 = 2,7 \cdot [1 - i \cdot 0,01]$  ,  $\dot{\epsilon}_2 = 3,0 \cdot [1 - i \cdot 0,001]$  та  $\dot{\epsilon}_2 = 30,0 \cdot [1 - i \cdot 0,01]$  відповідно).



а)



б)

Рис. 3.10 Залежність частки потужності ( $T_1 + T_1 \cdot R_2$ ) електромагнітної хвилі, що буде поглинена ВМ, від величини  $\epsilon_2$  та  $\lg(\text{tg}\delta_{\epsilon_2})$  для ВМ, що лежить на поверхні сухого піску (рис 3.10,а, залежність 1), вологої деревини (рис. 3.10,а, залежність 2) та глинозему(рис. 3.10,б)

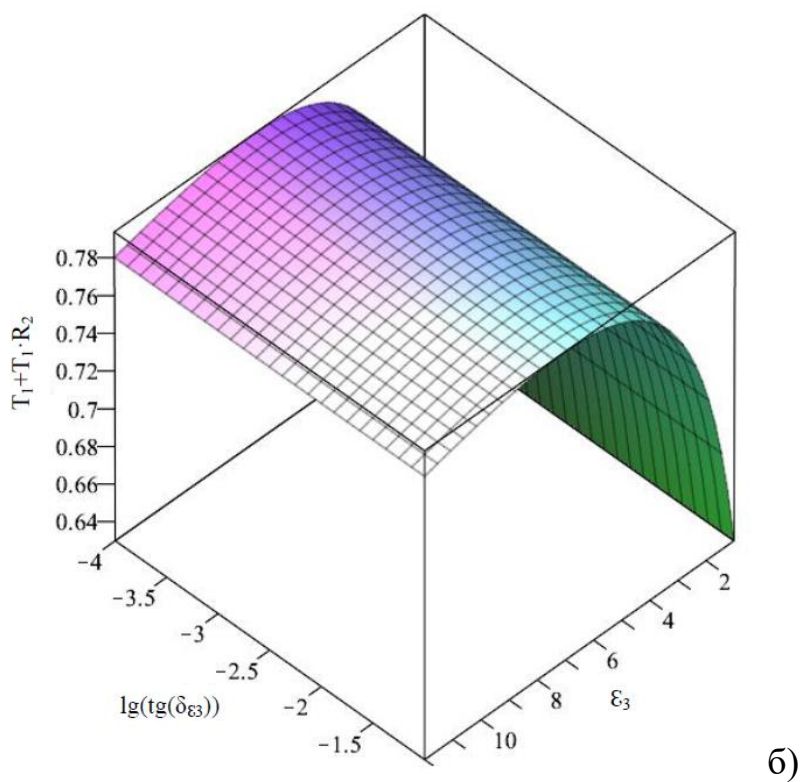
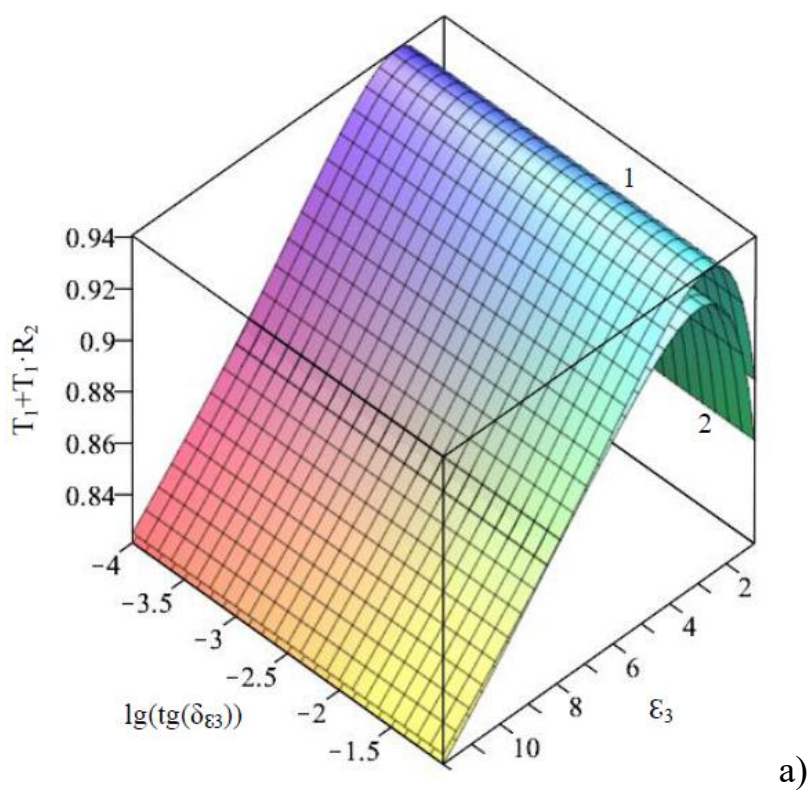


Рис. 3.11. Залежність частки потужності ( $T_1 + T_1 \cdot R_2$ ) електромагнітної хвилі, що поглинена ВМ, від величини  $\epsilon_3$  та  $\lg(\operatorname{tg} \delta_{\epsilon_3})$  поверхні землі, на який лежить ВМ TNT (рис 3.11,а, залежність 1), РЕТ (рис 3.11,а, залежність 2) та нітрат амонію (рис 3.11,б)

З рис. 3.11 видно, що при збільшенні величини абсолютної діелектричної проникності  $\varepsilon_3$  при фіксованому значенні  $\lg$  тангенсу кута діелектричних втрат  $\lg(\operatorname{tg}\delta_{\varepsilon_3})$  поверхні, на який знаходиться ВМ, в діапазоні  $\varepsilon_3 = 2 \div 4$  спостерігається екстремум частки потужності  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  електромагнітної хвилі, що локалізована всередині ВМ TNT та PET. З фізичної точки зору можна зробити висновок, про наявність резонансу  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  в діапазоні малих  $\varepsilon_3$ . Для ВМ нітрат амонію резонанс не спостерігається.

При зменшенні абсолютної діелектричної проникності  $\varepsilon_3$  резонанс зсовується в напрямку менших  $\varepsilon_3$ . Також видно, що чим менше величина  $\varepsilon_3$ , тим більше величина  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  в діапазоні  $\varepsilon_2 \approx 2 \div 10$ , що свідчить про локалізацію електромагнітної хвилі всередині ВМ. Залежність  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  від  $\lg(\operatorname{tg}\delta_{\varepsilon_3})$  є лінійною та змінюється незначно в усьому діапазоні дослідження зміни  $\varepsilon_3$  (від 2 до 20).

Чисельно розраховано частку потужності  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  електромагнітної хвилі, що буде локалізована всередині визначених марок ВМ (TNT, PET, нітрат амонію), які знаходяться на визначених поверхнях (сухий пісок, глинозем, волога деревина). Нижче приведено результати розрахунку, ранжирувані в напрямку зменшення величини показнику  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$ :

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,919$  для ВМ TNT, що знаходиться на поверхні сухого піску,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,913$  для ВМ PET, що знаходиться на поверхні сухого піску,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,849$  для ВМ PET, що знаходиться на поверхні глинозему,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,847$  для ВМ TNT, що знаходиться на поверхні глинозему,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,788$  для ВМ нітрат амонію, що знаходиться на поверхні сухого піску,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,788$  для ВМ нітрат амонію, що знаходиться на поверхні глинозему,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,699$  для ВМ нітрат амонію, що лежить на поверхні вологої деревини,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,678$  для ВМ PET, що знаходиться на поверхні вологої деревини,

$(T_1 + T_1 \cdot R_2) \approx 0,668$  для ВМ TNT, що знаходиться на поверхні вологої деревини.

Найбільше поглинання енергії електромагнітної хвилі всередині ВМ спостерігається для TNT та PET, що знаходяться на поверхні сухого піску, найменше – для TNT та PET, що знаходяться на поверхні вологої деревини. Для нітрату амонію величина показнику  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  не залежить суттєво від матеріалу поверхні землі, на якій знаходиться цей ВМ. Це свідчить про суттєвий вплив матеріалу поверхні землі на локалізацію електромагнітної енергії всередині ВМ з меншими  $\varepsilon_2$  (TNT та PET у випадку, що досліджується).

При відомих  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  з певною ймовірністю можна визначити який ВМ на якій поверхні знаходиться.

Таким чином, розроблено математичну модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на поверхнях розділу повітря-вибухова речовина та вибухова речовина-підкладка. Отримані математичні вирази для визначення кількості потужності електромагнітної хвилі, яка поглинається матеріалом вибухової речовини в залежності від електромагнітних властивосте вибухової речовини та підкладки на якій вона

знаходиться. Розрахунковим шляхом отримана частка поглиненої енергії найбільш розповсюдженими вибуховими речовинами: TNT, PET та нітрату амонія, що знаходяться на поверхні таких матеріалів підкладки, як пісок, глинозем та деревина. Результати чисельного моделювання показали, що найбільшу частку енергії електромагнітного випромінювання поглинає TNT, що знаходиться на поверхні піску  $\sim 92\%$ , тоді як найменшу долю поглинає той же вибуховий матеріал TNT на поверхні вологої деревини  $\sim 67\%$ . Встановлено, що показник поглинання  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  для TNT та PET має яркий оптимум в діапазоні  $\epsilon_3 = 2 \div 4$ , що відповідає основним сухим ґрунтам. Отримані результати дозволяють прогнозувати ефективність дистанційних методів виявлення та знешкодження вибухових речовин під впливом потужних імпульсів електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону.

### 3.3. Математична модель впливу на вибухонебезпечні предмети електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону при довільному куті їх падіння

Вище в роботі для плоскої електромагнітної хвилі, що падає з повітря під довільним кутом на ВР (рис. 3.1), було отримано співвідношення 3.8 [19]:

Звичайно розглядаються дві поляризації електромагнітної хвилі: горизонтальна (ТЕ-поляризація, електричне поле  $\vec{E}_0$  перпендикулярне площині падіння  $xz$  (рис. 3.1) та вертикальна (ТМ-поляризація, електричне поле  $\vec{E}_0$  лежить у площині падіння  $xz$ ) [113].

В роботі [20] побудовано залежність коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$  електромагнітної хвилі з ТЕ-поляризацією та залежність коефіцієнту відбиття  $R_{TM}$  електромагнітної хвилі з ТМ-поляризацією від довільного кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі та відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  ідеальної ВР (при  $\text{tg}\delta_\epsilon=0$ ).

Не дослідженим залишився випадок падіння плоскої електромагнітної хвилі під довільним кутом на поверхню реальної ВР (ВР, у якої  $\text{tg}\delta_\epsilon \neq 0$ ). У цьому випадку в формулі (3.38)  $\sin\theta_0$  є дійсною величиною (плоска електромагнітна хвиля падає з повітря), а  $\sin\theta_2$  буде комплексною величиною:

$$(\sin\theta_2) = \frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\epsilon \cdot [1 - i \cdot \text{tg}\delta_\epsilon]}}. \quad (3.38)$$

Виконуємо математичні перетворення:

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

Перейдемо від алгебраїчної форми комплексного числа до тригонометричної:

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

Застосовуємо формулу Муавра:

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

Отримуємо:

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

$$\dot{\theta}_2 = \text{Re}[\arcsin(\theta_2)] + i \cdot \text{Im}[\arcsin(\theta_2)], \quad (3.39)$$

Для горизонтальної поляризації (ТЕ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття  $\dot{\rho}_{\text{TE}}$  та переломлення  $\dot{\tau}_{\text{TE}}$  [18]):

$$\dot{\rho}_{\text{TE}} = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}, \quad (3.40)$$

$$\dot{\tau}_{\text{TE}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}. \quad (3.41)$$

Для вертикальної поляризації (ТМ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття  $\dot{\rho}_{\text{TM}}$  та переломлення  $\dot{\tau}_{\text{TM}}$  [20]):

$$\dot{\rho}_{\text{TM}} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 - \cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}, \quad (3.42)$$

$$\dot{\tau}_{\text{TM}} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_2}. \quad (3.43)$$

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:

$$R = |\dot{\rho}|^2. \quad (3.44)$$

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:

$$\dot{T} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{t}|^2. \quad (3.45)$$

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

$$R_{TE} = |\dot{\rho}_{TE}|^2, \quad (3.46)$$

$$\dot{T}_{TE} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{t}_{TE}|^2. \quad (3.47)$$

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

$$R_{TM} = |\dot{\rho}_{TM}|^2, \quad (3.48)$$

$$\dot{T}_{TM} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\epsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{t}_{TM}|^2. \quad (3.49)$$

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  $\dot{T}_{TM} = 0$ .

Таким чином, 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.

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  $\theta_0$  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.

### 3.4. Математична модель дифракції електромагнітних хвиль на багат шаровій структурі вибухонебезпечного предмету

#### 3.4.1. Математична модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь багат шарову структуру

Будь-яка електродинамічна задача полягає в розв'язанні рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Розглянемо розповсюдження електромагнітної хвилі з вектором Пойнтинга  $\Pi$  крізь ВНП, який має оболонку різної товщини  $d_1$  та  $d_3$ , яка вироблена із різних речовин з хвильовими опорами  $Z_{c2}$  та  $Z_{c4}$  відповідно (рис. 3.12).

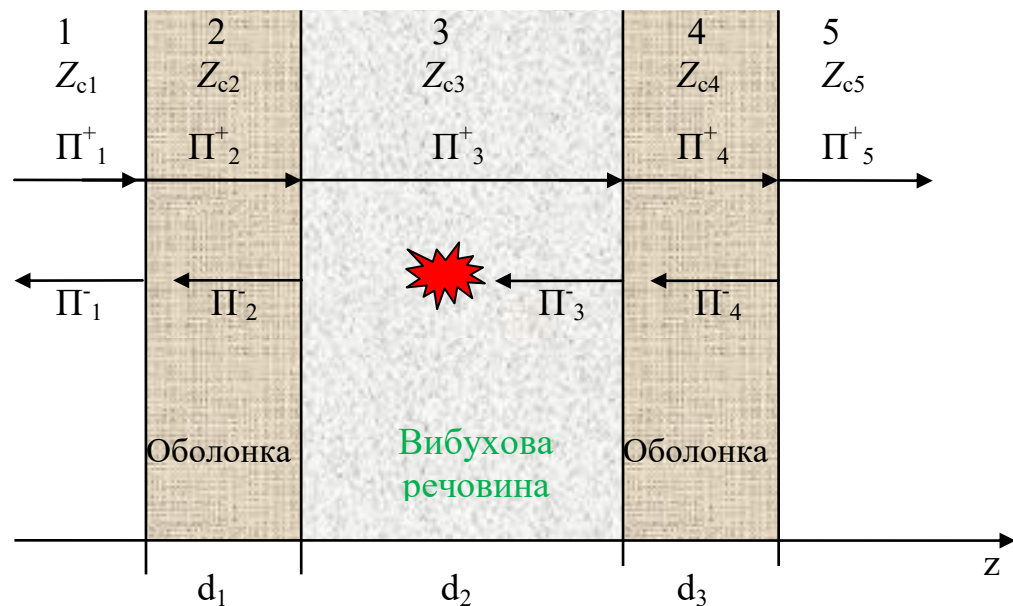


Рис. 3.12. Модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь ВНП

Між оболонками знаходиться вибухова речовина товщиною  $d_2$  з хвильовим опором  $Z_{c3}$ , який і є основним об'єктом дослідження. Граничними шарами з хвильовими опорами  $Z_{c1}$  та  $Z_{c5}$  є повітря в якому знаходиться ВНП. Ці граничні шари можна прийняти напівнескінченими. Виходячи з того, що оболонка ВНП виконана із однієї речовини із сталою товщиною та цей предмет знаходиться у повітрі із рівномірними параметрами, то:

$$d_1 = d_2, Z_{c2} = Z_{c4}, Z_{c1} = Z_{c5}. \quad (3.50)$$

Вектор густини потоку енергії електромагнітної хвилі (вектор Пойнтинга) у комплексному вигляді  $\dot{\Pi}$  розраховується через вектора (комплексні числа) напруженості електричного  $\dot{E}$  та магнітного  $\dot{H}$  полів за формулою [114]:

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2} \cdot [\dot{E} \times \dot{H}^*], \quad (3.51)$$

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{E}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{H}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \quad (3.52)$$

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

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \sqrt{\dot{\epsilon} \cdot \epsilon_0 \cdot \mu \cdot \mu_0} = k - i \cdot \alpha, \quad (3.53)$$

де  $\omega$  – кутова частота електромагнітної хвилі;  $\dot{\epsilon}$  – комплексна діелектрична проникність речовини;  $\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму;  $\mu$  – магнітна проникність середовища;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму;  $k$  – фазова постійна розповсюдження (хвильове число), що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані;  $\alpha$  – коефіцієнт затухання хвилі.  $k$  та  $\alpha$  визначаються як:

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\varepsilon} + 1)}, \\
 \alpha &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_\varepsilon} - 1)},
 \end{aligned}
 \tag{3.54}$$

де  $\operatorname{tg} \delta_\varepsilon$  – тангенс кута діелектричних втрат (вважаємо тангенс кута магнітних втрат  $\operatorname{tg} \delta_\mu = 0$ ).

Дійсна частина  $\operatorname{Re}(\dot{\Pi})$  дорівнює середньому потоку активної потужності, уявна частина  $\operatorname{Im}(\dot{\Pi})$  дорівнює амплітуді реактивної потужності.

Хвильовий опір  $\dot{Z}_C$  можна представити у комплексному вигляді як:

$$\dot{Z}_C = \frac{\dot{E}^+}{\dot{H}^+} = \frac{\dot{E}^-}{\dot{H}^-} = \frac{\dot{\gamma}}{\omega \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0}{\dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0}}.
 \tag{3.55}$$

Для переходу від комплексних значень до миттєвих діючих значень рівняння (3.52) з урахуванням (3.53) помножимо на  $e^{i\omega t}$ , візьмемо діюче значення й отримуємо для електричного поля:

$$\begin{aligned}
 E &= \operatorname{Re}(\dot{E} \cdot e^{i\omega t}) = \\
 &= E_m^+ \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_0^+) + E_m^- \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos(\omega t + kz + \varphi_0^-),
 \end{aligned}
 \tag{3.56}$$

де  $\varphi_0^+$  та  $\varphi_0^-$  – початкові фази, що залежать від початку координат чи часу спостереження.

Проаналізуємо параметри хвилі для трьох середовищ, представлених на рис. 3.12, а саме повітря (ділянки 1, 5), пластикова оболонка (ділянки 2, 4), вибухова речовина (ділянка 3).

1. *Повітря.* Для шару повітря до 100 м (саме такі умови передбачає застосування методу дистанційного знешкодження ВВП) в якості електромагнітних властивостей можна взяти властивості вакууму із достатньою точністю припущення ( $\epsilon = 1, \mu = 1; \operatorname{tg}\delta = 0$ ). Відповідно з (3.54) маємо, що при таких умовах затухання електромагнітної хвилі відсутнє ( $\alpha = 0$ ), при цьому хвиля розповсюджується зі швидкістю світла  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$

та має довжину хвилі  $\lambda_0 = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f}$  (де  $f$  – циклічна частота електромагнітної хвилі). Хвильовий опір для таких умов повітря також

можна прийняти як  $Z_{c1} = Z_{c5} = Z_{c0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$  Ом, при цьому вектори

електричного та магнітного полів змінюються синфазне.

2. *Оболонка.* Як розглядалось вище оболонка протипіхотних мін виконана із діелектричного пластика для зменшення чутливості при виявленні індукційними приладами розмінування. Тобто такі речовини за своїми властивостями максимально наближені до ідеальних діелектриків, для яких виконуються умови:  $\epsilon > 1, \mu = 1; \operatorname{tg}\delta_\epsilon = \operatorname{tg}\delta_\mu = 0$ . Відповідно, відмінністю від повітря, яке розглянуто вище, є те, що в оболонці швидкість розповсюдження хвилі (відповідно,  $c_2$  та  $c_4$ ), довжина хвилі (відповідно,  $\lambda_2$  та  $\lambda_4$ ) та хвильовий опір (відповідно,  $Z_{c2}$  та  $Z_{c4}$ ) зменшуються в  $\sqrt{\epsilon}$  разів:

$$c_2 = c_4 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}, \lambda_2 = \lambda_4 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}, Z_{c2} = Z_{c4} = \frac{Z_{c0}}{\sqrt{\epsilon}}. \quad (3.57)$$

3. *Вибухова речовина.* Як розглядалось в роботі [19] всі вибухові речовини відносяться до діелектриків двох різних класів. Такі речовини як 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, тобто їх можна віднести до ідеальних діелектриків, властивості яких розглянуті вище. Однак такі вибухові речовини, як 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 потрібно розглядати як діелектрики з малими втратами ( $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ,  $0 < \text{tg}\delta_\epsilon \ll 1$ ,  $\text{tg}\delta_\mu = 0$ ). Для таких умов відповідно до (3.54) для  $k$  можна нехтувати  $\text{tg}^2\delta_\epsilon$ , тобто швидкість та довжина хвилі залишаються таким ж як і в ідеальному діелектрику. Однак для таких речовин вже є суттєвим хвильове затухання ( $\alpha \neq 0$ ). Якщо використати наближення:

$$\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta_\epsilon} \approx 1 + \text{tg}^2\frac{\delta_\epsilon}{2},$$

то отримуємо:

$$\alpha = \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\epsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + \text{tg}^2\delta_\epsilon} - 1)} \approx \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot \text{tg}\delta_\epsilon = \frac{\omega}{2c_3} \cdot \text{tg}\delta_\epsilon = \frac{\pi}{\lambda_3} \cdot \text{tg}\delta_\epsilon = \sigma \cdot Z_{c3},$$

(3.58)

де  $\sigma$  – питома електрична провідність середовища.

З (3.58) видно, що коефіцієнт затухання прямо пропорційний питомої електричній провідності вибухової речовини.

### **3.4.2. Встановлення ступеня ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні вибухонебезпечного предмету**

З електродинамічної точки зору ступень ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні через неметалевий предмет можна оцінити за допомогою показників «коефіцієнт проходження

електромагнітної хвилі» та «коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі» [115].

Якщо розглядати процес проходження електромагнітної хвилі крізь декілька шарів, як показано на рис. 1, то видно, що крізь шари 1-4 розповсюджується і пряма хвиля й відбита, тоді як в шарі 5 – лише пряма. Тому з (3.52) з урахуванням (3.55) можна отримати наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}\dot{E}_{1-4} &= \dot{E}_{1-4}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z_{1-4}} + \dot{E}_{1-4}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z_{1-4}}, \\ \dot{H}_{1-4} &= (\dot{E}_{1-4}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z_{1-4}} + \dot{E}_{1-4}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z_{1-4}}) / \dot{Z}_{c1-4}, \\ \dot{E}_5 &= \dot{E}_5^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z_5}, \\ \dot{H}_5 &= \dot{E}_5^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z_5} / \dot{Z}_{c5},\end{aligned}\tag{3.59}$$

Використовуючи модель, в якій різні середовища з хвильовими опорами  $\dot{Z}_{cn}$  моделюються відрізками довгих ліній з опорами  $\dot{Z}_{0n}$  (дорівнює відношенню комплексних амплітуд напруги та струму для хвиль однакового напрямку), правило трансформації опорів довгих ліній [114], рівняння (3.55), (3.59) та приймаючи, що  $d = z_n - z_{n-1}$  ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ),  $d_1 = d_3$  отримуємо вирази для еквівалентного опору багат шарової структури, приведеної на рис. 3.12:

$$\begin{aligned}\dot{Z}'_{05} &= \dot{Z}_{04} \frac{Z_{05} + i \cdot \dot{Z}_{04} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_4 \cdot d_1)}{\dot{Z}_{04} + i \cdot Z_{05} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_4 \cdot d_1)}, \\ \dot{Z}''_{05} &= \dot{Z}_{03} \frac{\dot{Z}_{04} + i \cdot \dot{Z}_{03} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}{\dot{Z}_{03} + i \cdot \dot{Z}_{04} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}, \\ \dot{Z}'''_{05} &= \dot{Z}_{02} \frac{\dot{Z}_{03} + i \cdot \dot{Z}_{02} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_2 \cdot d_1)}{\dot{Z}_{02} + i \cdot \dot{Z}_{03} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_2 \cdot d_1)}.\end{aligned}\tag{3.60}$$

Виходячи з цього коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі від багатошарової структури (рис. 3.12) розраховується за виразом:

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{Z}_{05}''' - Z_{01}}{\dot{Z}_{05}''' + Z_{01}}. \quad (3.61)$$

Коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль крізь багатошарову структуру (рис. 3.12) розраховується за формулою:

$$\dot{\tau} = \frac{2 \cdot \dot{Z}_{05}'''}{\dot{Z}_{05}''' + Z_{01}}. \quad (3.62)$$

Для забезпечення виділення достатньої кількості енергії необхідно застосовувати електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль, порівнюваних з розміром ВВП. При цих умовах довжина хвилі  $\lambda > 1$  см (НВЧ діапазон). Вважаючи, що товщина стінок оболонки є незначною ( $d_1=d_3 \sim 0,1$  см) у порівнянні з довжиною вибухової речовини, еквівалентним опором на ділянках 2 та 4 нехтуємо. Відповідно, рівняння (3.60) перетворюються у рівняння

$$\dot{Z}'_{05} = \dot{Z}'_{03} \frac{Z_{05} + i \cdot \dot{Z}'_{03} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}{\dot{Z}'_{03} + i \cdot Z_{05} \cdot \text{tg}(\dot{\gamma}_3 \cdot d_2)}. \quad (3.63)$$

На рис. 3.13 та 3.14 представлено графічний вигляд залежності модулю коефіцієнту відбивання  $|\rho|$  та фази  $\varphi_\rho$  відповідно до рівняння  $\dot{\rho} = |\rho| \cdot e^{i \cdot \varphi_\rho}$  для електромагнітної хвилі частотою  $f=1$  ГГц від діелектричної проникності  $\varepsilon$  в діапазоні від 1 до 20 вибухової речовини товщиною  $d$  від 3 см до 10 см при  $\mu=1$ ,  $\text{tg}\delta_\varepsilon=0$ ,  $\text{tg}\delta_\mu=0$ .

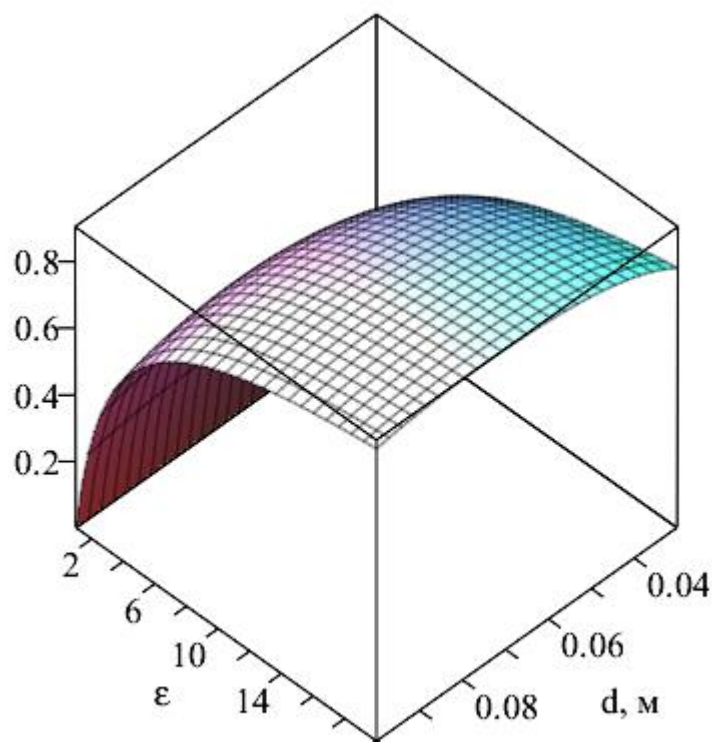


Рис. 3.13. Залежність модулю коефіцієнта відбивання  $|\rho|$  від діелектричної проникності  $\epsilon$  та товщини вибухової речовини  $d$

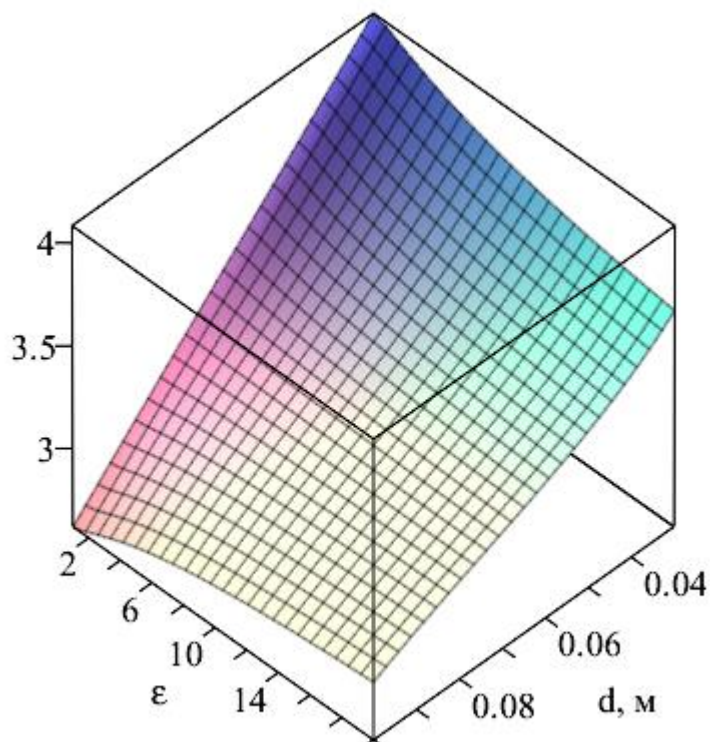


Рис. 3.14. Залежність фази  $\varphi_\rho$  коефіцієнта відбивання від діелектричної проникності  $\epsilon$  та товщини  $d$  вибухової речовини

Аналіз залежності модулю  $|\rho|$  коефіцієнту відбивання  $\rho$  електромагнітного випромінювання від ВНП без металевих конструкційних елементів від діелектричної проникності  $\epsilon$  вибухової речовини та товщини  $d$  вибухової речовини (рис. 3.13) показує, що  $|\rho|$  збільшується з ростом  $\epsilon$  за законом, близьким до логарифмічного, та наближається до 1 приблизно при  $\epsilon > 20$ . Враховуючі, що модуль коефіцієнту відбивання характеризує зміну амплітуди хвилі при відбиванні, можна зробити висновок, що при діелектричній проникності більше 10 більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається від ВНП, що може бути використано, наприклад, для встановлення місця знаходження цього ВНП на поверхні землі. Збільшення товщини  $d$  вибухової речовини приводить до зменшення  $|\rho|$  (більший за розміром ВНП відбиває меншу частину електромагнітної енергії).

Збільшення діелектричної проникності  $\epsilon$  вибухової речовини призводить до збільшення фази  $\varphi_\rho$  коефіцієнта відбивання (рис. 3.14). Подібною є залежність  $\varphi_\rho$  й від товщини вибухової речовини  $d$ . З фізичної точки зору фаза коефіцієнту відбивання показує величину запізнення відбитої хвилі відносно падаючої.

Графічні залежності модулю  $|\tau|$  та фази  $\varphi_\tau$  коефіцієнту проходження відповідно до рівняння  $\hat{\tau} = |\tau| \cdot e^{i\varphi_\tau}$  при тих же параметрах електромагнітної хвилі представлено на рис. 3.15 та 3.16.

Модуль  $|\tau|$  коефіцієнту проходження  $\tau$  електромагнітного випромінювання через ВНП без металевих конструкційних елементів зменшується за законом, близьким до гіперболічного (рис. 3.15). З цього можна зробити припущення, що при збільшенні величини діелектричної проникності вибухонебезпечної речовини збільшується кількість енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини.

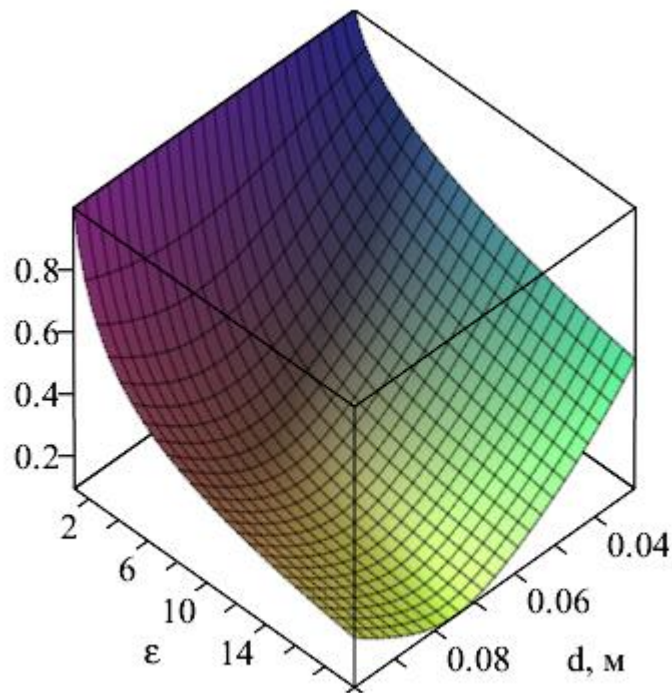


Рис. 3.15. Залежність модулю  $|\tau|$  коефіцієнта проходження від діелектричної проникності  $\epsilon$  та товщини  $d$  вибухової речовини.

З рис. 3.15 видно, що при  $\epsilon > 10$   $|\tau|$  має виражений мінімум при зміні товщині вибухонебезпечної речовини.  $|\tau|$  є мінімальним при  $\epsilon = 20$  та товщині вибухонебезпечної речовини біля 0,07 м, що також свідчить про збільшення енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини.

З рис. 3.16 видно, що фаза  $\varphi_\tau$  коефіцієнта проходження суттєво залежить від діелектричної проникності  $\epsilon$  та товщини  $d$  вибухової речовини. На відміну від фази  $\varphi_p$  фаза  $\varphi_\tau$  змінює свій знак, що може свідчити про зміну поляризації електромагнітної хвилі. З фізичної точки зору фаза коефіцієнту проходження показує величину запізнення хвилі, що пройшла ВНП, відносно падаючої.

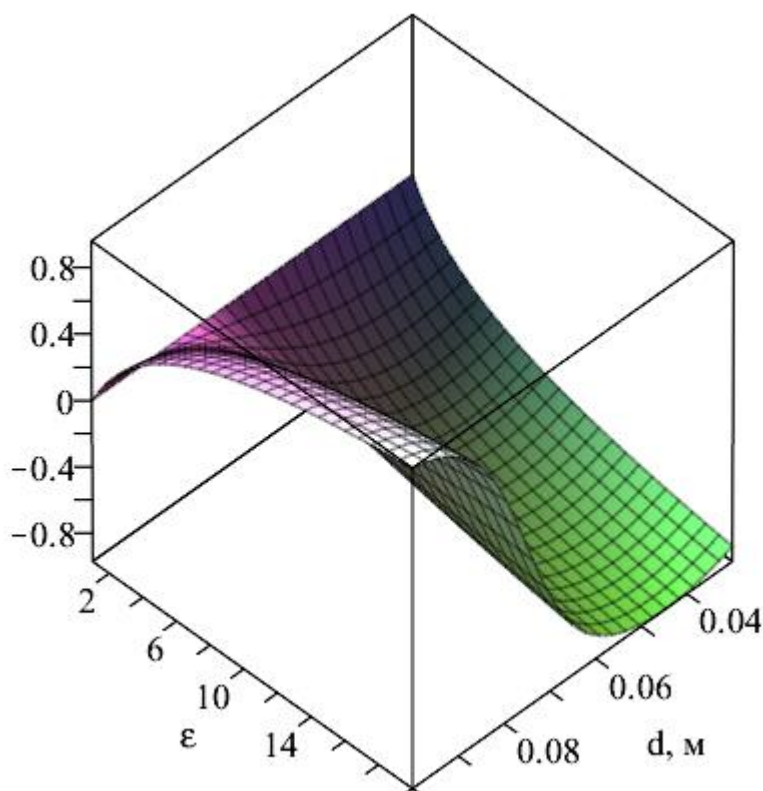


Рис. 3.16. Залежність фази  $\varphi_{\tau}$  коефіцієнта проходження від діелектричної проникності  $\epsilon$  та товщини  $d$  вибухової речовини

Розраховані коефіцієнти відбиття та проходження електромагнітного випромінювання крізь ВНП без наявності металевих конструкційних елементів (рис. 3.13–3.16) показали, що такі предмети мають низький коефіцієнт відбиття та високий коефіцієнт проходження. Це пов'язано з тим, що ВНП виконані із діелектричних матеріалів. Це є негативним фактором для їх виявлення, так як низький рівень відбитого випромінювання важко ідентифікувати та відокремити від «шуму» на фоні відбиття від інших предметів ландшафту. Однак це є позитивним фактором для дистанційного підриву таких ВНП за рахунок опромінення електромагнітним полем. Висока діелектрична проникність оболонки таких ВНП не перешкоджає проникненню енергії випромінювання до вибухової речовини. При цьому також треба звернути увагу на електромагнітні властивості вибухових речовин. Для таких речовин, як гексоген ( $C_3H_6N_6O_6$ ), пентаеритриттетранітрат

( $C_5H_8(ONO_2)_4$ ), та фульмінат ртуті ( $Hg(ONC)_2$ ) з нульовим дипольним моментом та діелектричною проникністю  $\epsilon \approx 1$  коефіцієнт проходження суттєво більший. Це призводить до того, що кількість енергії, що поглинається ВНП буде мінімальною. Відповідно використання методу дистанційного підриву за рахунок електромагнітного випромінювання для таких ВНП недоцільний. Однак такі вибухові матеріали, як 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, це призводить до суттєвого зниження коефіцієнту проходження (рис. 3.15). При цьому значення модулю  $\tau$  корелює із дипольним моментом цих речовин та їх діелектричною проникністю. Відповідно ВНП з такими речовинами у якості вибухових схильні до поглинання енергії електромагнітного випромінювання та їх підрив може бути ініційований НВЧ випромінюванням дистанційно. Однак слід звернути увагу, що для таких речовин на 30-40% збільшується й коефіцієнт відбиття  $\rho$  у порівнянні з неполярними речовинами. Хоча це й полегшує виявлення таких ВНП за рахунок моніторингу відбитого випромінювання, однак це й зменшує кількість енергії яка поглинається масою вибухової речовини. Однак представлені на рис. 3.13-3.16 результати дозволяють лише якісно оцінити кількість поглиненої тілом ВНП енергії випромінювання. Тому у подальшому доцільно використати отримане в цій роботі теоретичне підґрунтя для розробки моделі поглинання НВЧ випромінювання вибуховими речовинами.

Таким чином, побудована електродинамічна модель дифракції електромагнітних хвиль при проходження крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Запропоновано розглядати процес опромінення електромагнітним випромінюванням вибухонебезпечних предметів, що знаходяться на поверхні землі, як поетапний процес проходження, поглинання та відбивання від поверхонь розділу шарів

оболонки та вибухової речовини. Це дозволяє застосовувати однакові електродинамічні моделі для всіх шарів з відповідними параметрами хвильового опору  $Z_c$ , товщини  $d$ , діелектричної проникності  $\epsilon$ , магнітної проникності середовища  $\mu$  та тангенсу кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$ . Проаналізовані ці параметри для речовин, з яких вироблені протипіхотні фугасні міни ПМН-2, ПФМ-1 та протипіхотні міни осколкової дії МОН-90 та ПОМ-3. Встановлено, що речовини, з яких вироблено їх корпуси, мають  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 0$ , а вибухові речовини поділяються на два класи:  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 0$  та  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ , відповідно.

Встановлено ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини за допомогою визначення коефіцієнтів відбивання та проходження електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону крізь вибухонебезпечний предмет. Отримано рівняння для визначення еквівалентного хвильового опору вибухонебезпечного предмету. Аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів відбивання та проходження показав, що модуль та фазове число коефіцієнту проходження суттєво залежать від дипольного моменту вибухової речовини та можуть змінюватись в 5–8 разів в залежності від хімічного складу вибухової речовини. Коефіцієнт відбивання для вибухонебезпечних предметів з такими дипольними вибуховими речовинами як тринітротолуол ( $C_7H_5N_3O_6$ ), тетрил ( $C_7H_5N_5O_8$ ), тринітрорезорцинату свинцю ( $C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$ ) та азид свинцю ( $Pb(N_3)_2$ ) також на 30–40 % більший у порівнянні з гексогеном ( $C_3H_6N_6O_6$ ), пентаеритриттетранітратом ( $C_5H_8(ONO_2)_4$ ) та фульмінатом ртуті ( $Hg(ONC)_2$ ). Отримані результати дозволяють оцінити кількість поглиненої енергії та, відповідно, оцінити можливість дистанційного впливу електромагнітним випромінюванням на вибухонебезпечні предмети.

### 3.5. Перевірка працездатності розроблених моделей взаємодії електромагнітних полів та хвиль на вибухонебезпечні предмети різного конструктивного виконання

З метою перевірки працездатності отриманих вище математичних моделей проведено їх порівняльний та розрахунково-аналітичний аналіз. Діелектричні властивості ВР приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. – Діелектричні властивості деяких ВР

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

На рис. 3.17 побудовано залежність дійсної частини кута переломлення  $\theta_2$  ( $\text{Re}\theta_2$ ) від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі на ВР пентаеритрітетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4). На рис. 3.18 побудовано аналогічну залежність уявної частини кута переломлення  $\theta_2$  ( $\text{Im}\theta_2$ ) від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі на ВР. Для розрахунків використовувалися формули (3.38), (3.39).

З рис. 2.17 видно, що для фіксованого значення кута падіння  $\theta_0$  зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  відбувається зменшення величини дійсної частини кута переломлення  $\text{Re}\theta_2$ . Тобто пласка електромагнітна хвиля розповсюджується у ВР ближче до нормалі.

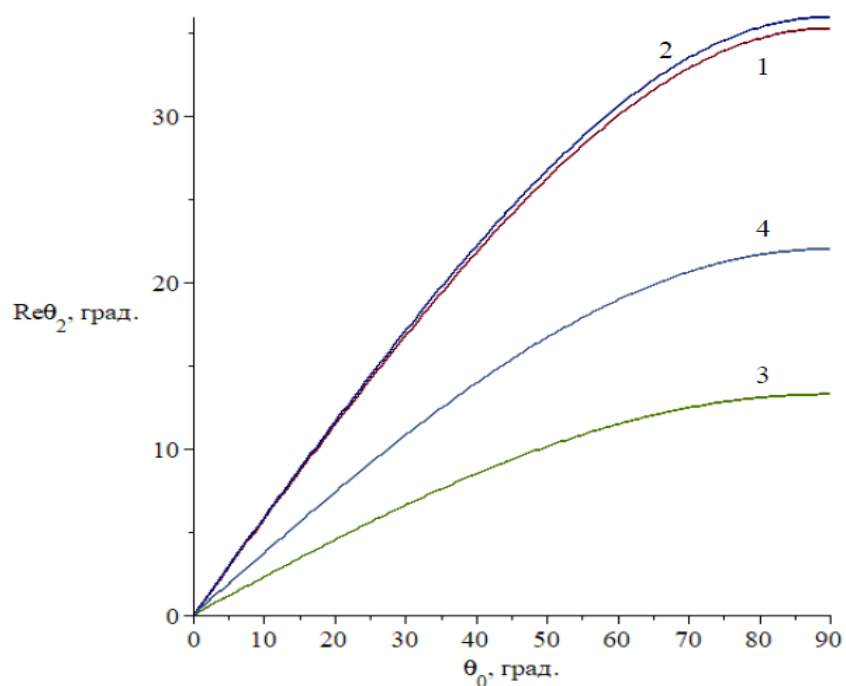


Рис. 3.17. Залежність  $\text{Re}\theta_2$  від кута падіння  $\theta_0$  електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

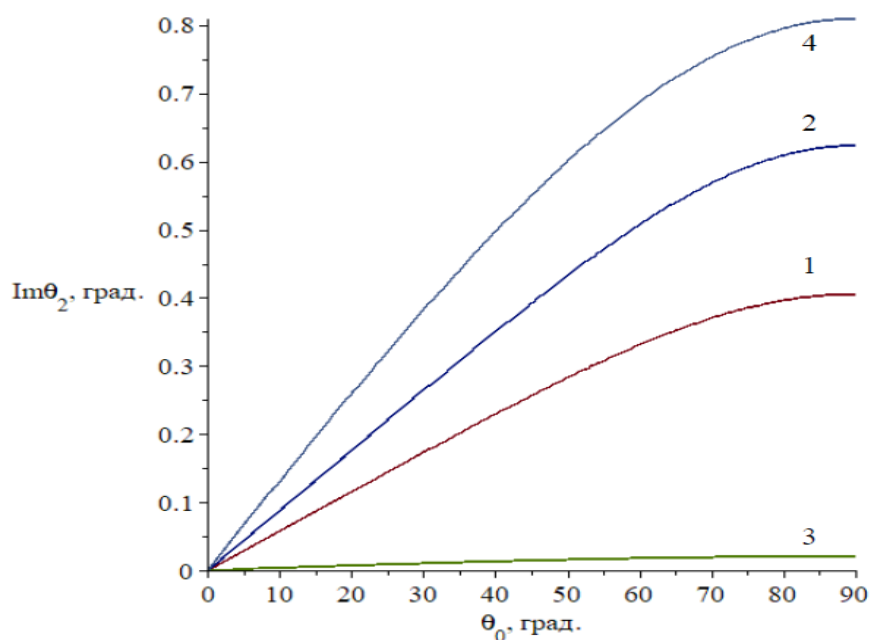


Рис. 3.18. Залежність  $\text{Im}\theta_2$  від кута падіння  $\theta_0$  електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

Уявна частина кута переломлення  $\dot{\theta}_2$  ( $\text{Im}\dot{\theta}_2$ ) для досліджених ВР (рис. 3.18) є незначною величиною (не перебільшує одного градуса в усьому діапазоні зміни кута падіння  $\theta_0$ ). 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.

На рис. 3.19 по формулам (3.38), (3.40), (3.46) побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$  від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4).

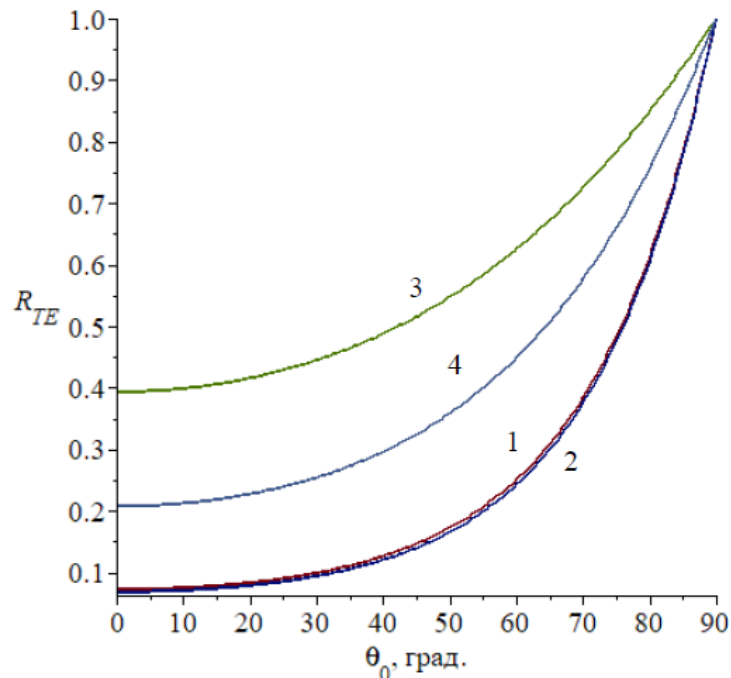


Рис. 3.19 Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$  від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4).

На рис. 3.20 по формулам (3.38), (3.42), (3.48) побудовано аналогічну залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$  від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією на ВР [40].

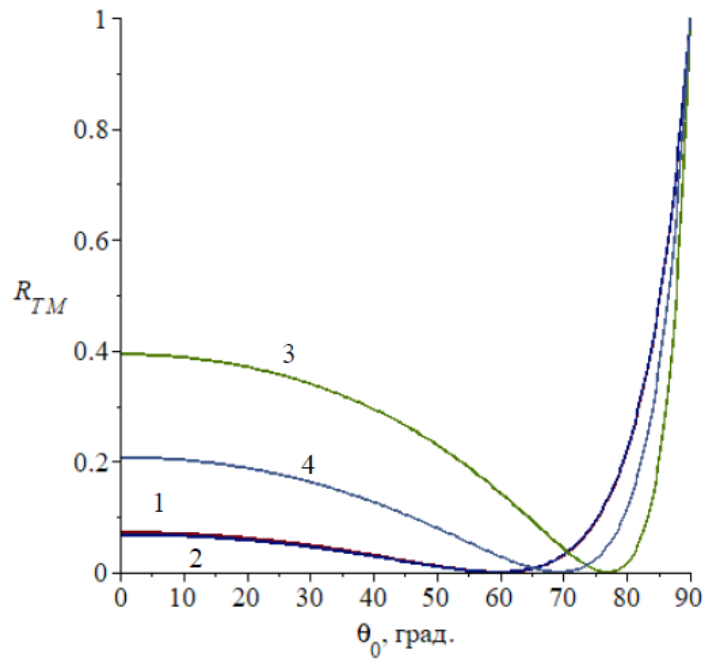


Рис. 3.20 Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TM}$  від кута падіння  $\theta_0$  плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерин (крива 3) та нітрат амонію (крива 4).

Аналіз формул (3.46) та (3.48) 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. 3.19, 3.20 видно, що поляризація електромагнітної хвилі суттєво впливає на характер залежності обох енергетичних коефіцієнтів відбиття від кута падіння  $\theta_0$  електромагнітної хвилі.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття  $R_{TE}$  плавно збільшується зі збільшенням кута падіння  $\theta_0$  хвилі (рис. 3.19) 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 відсотків 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  $\theta_0$  від 60 до 75 градусів для досліджених ВР (рис.3.20). 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 (3.47) та (3.49) 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  $\theta_0$  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. 3.20). Для  $\text{Re}\dot{\Gamma}_{\text{TE}}$  це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення  $\dot{\Gamma}_{\text{TE}}$ .

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією дійсна частина  $\text{Re}\dot{\Gamma}_{\text{TM}}$  енергетичного коефіцієнту переломлення  $\dot{\Gamma}_{\text{TM}}$  плавно зменшується за збільшенням кута падіння  $\theta_0$ . Максимальне значення  $\text{Re}\dot{\Gamma}_{\text{TM}}$  має при куті падіння  $\theta_0=0$  (при нормальному падінні електромагнітної хвилі на поверхню ВР). Вище подібна ситуація спостерігалася для енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{\text{TE}}$  плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією (рис. 3.19) 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  $\text{Re}\dot{\Gamma}_{\text{TM}}$  це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення  $\dot{\Gamma}_{\text{TM}}$ .

На рис. 3.21 побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{\text{TE}}$  плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією від дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\varepsilon$  ВР при різних кутах падіння  $\theta_0$  (залежність 1 –  $\theta_0=0^\circ$ ; залежність 2 –  $\theta_0=30^\circ$ ; залежність 3 –  $\theta_0=60^\circ$ ; залежність 4 –  $\theta_0=90^\circ$ ).

На рис. 3.22 побудовано аналогічну залежність для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією при різних кутах падіння  $\theta_0$  (залежність 1 –  $\theta_0=0^\circ$ ; залежність 2 –  $\theta_0=30^\circ$ ; залежність 3 –  $\theta_0=60^\circ$ ; залежність 4 –  $\theta_0=80^\circ$ ).

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

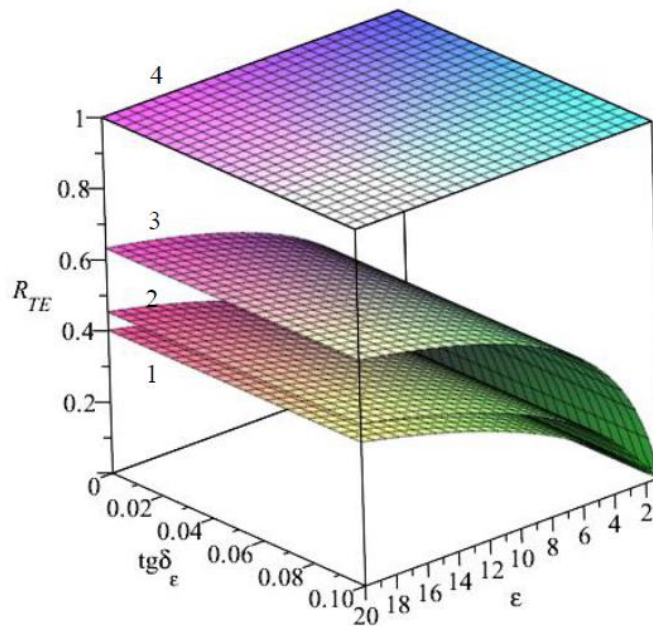


Рис. 3.21. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$  від  $\epsilon$  та  $\text{tg}\delta_\epsilon$  при різних кута падіння  $\theta_0$  (залежність 1 –  $\theta_0=0^\circ$ ; залежність 2 –  $\theta_0=30^\circ$ ; залежність 3 –  $\theta_0=60^\circ$ ; залежність 4 –  $\theta_0=90^\circ$ ) плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття  $R_{TE}$  для досліджених кутів падіння  $\theta_0$  зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  збільшується за законом, близьким до логарифмічного. 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  $\epsilon$  та тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta_\epsilon$  ВР (з фізичною точки зору, плоска електромагнітна хвиля розповсюджується над ВР). Чим більшим є величина дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$ , тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TE}$ . Тобто ВР з великими значеннями  $\epsilon$  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  $\epsilon$  та куті падіння  $\theta_0$  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 (див. таблицю 3.2).

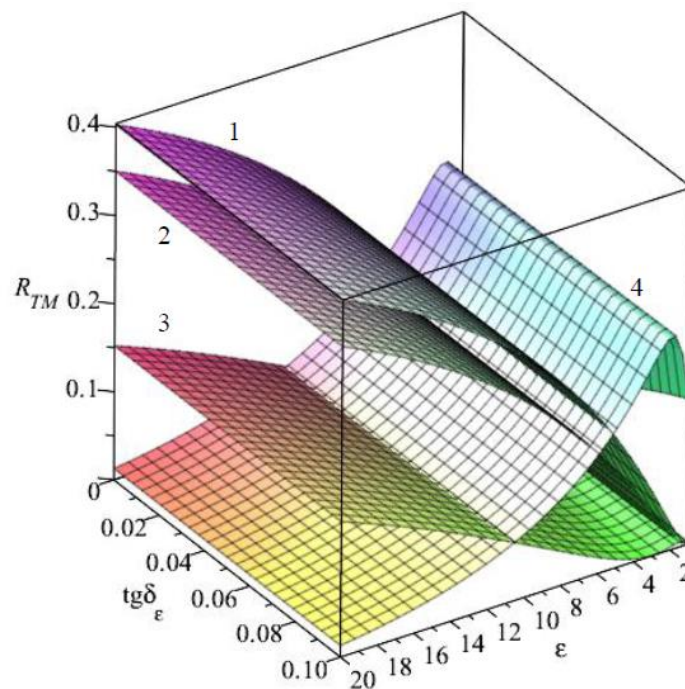


Рис. 3.22. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TM}$  від  $\epsilon$  та  $\text{tg}\delta_\epsilon$  при різних кута падіння  $\theta_0$  (залежність 1 –  $\theta_0=0^\circ$ ; залежність 2 –  $\theta_0=30^\circ$ ; залежність 3 –  $\theta_0=60^\circ$ ; залежність 4 –  $\theta_0=80^\circ$ ) плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття  $R_{TM}$  зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  збільшується за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння  $\theta_0$  менших за 60 градусів. 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  $\varepsilon$ , тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TM}$ . Тобто ВР з великими значеннями  $\varepsilon$  відбивають більшу частину енергії електромагнітних хвиль, що може бути використано для їх виявлення. При кутах падіння  $\theta_0$  більших 60 градусів виникає екстремум залежності  $R_{TM}$  від величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  (подібно залежності, приведеній на рис. 3.б). Величина енергетичного коефіцієнту відбиття  $R_{TM}$  (як й для  $R_{TE}$ ) незначно залежить від зміни величини тангенса кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta_\varepsilon$  ВР при фіксованих значеннях величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\varepsilon$  та куті падіння  $\theta_0$  в дослідженому діапазоні його зміни (від 0 до 0,1). Проведений аналіз дозволяє моделювати процеси взаємодії електромагнітних хвиль для широкого кола реальних умов.

### Висновки до розділу 3.

1. Розроблено електродинамічну модель взаємодії електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону з поверхнею безоболонкової вибухонебезпечної речовини шляхом розв'язання рівнянь Максвела з граничними умовами. Модель дозволяє розраховувати коефіцієнти відбиття та переломлення енергії хвиль залежно від кута падіння, діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат речовини. Встановлено, що вибухові речовини з високою діелектричною проникністю, як-от нітрогліцерин ( $\varepsilon=19$ ), краще відбивають хвилі, що спрощує їх дистанційне виявлення. Речовини з низькою проникністю (ТНТ,  $\varepsilon\approx 3$ ) поглинають до 96% енергії хвилі, що створює ризик дистанційного підриву. Отримано аналітичні формули для оцінки ефективності виявлення та критичних кутів повного відбиття.

2. Розроблено математичну модель дифракції електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону на незаглиблених вибухонебезпечних предметах. Розрахунковим шляхом отримана частка поглиненої енергії найбільш розповсюдженими вибуховими речовинами: TNT, РЕТ та нітрату амонію, що знаходяться на поверхні таких матеріалів підкладки, як пісок, глинозем та деревина. Результати чисельного моделювання показали, що найбільшу частку енергії електромагнітного випромінювання поглинає TNT, що знаходиться на поверхні піску  $\sim 92\%$ , тоді як найменшу долю поглинає той же вибуховий матеріал TNT на поверхні вологої деревини  $\sim 67\%$ . Встановлено, що показник поглинання  $(T_1 + T_1 \cdot R_2)$  для TNT та РЕТ має яркий оптимум в діапазоні  $\varepsilon_3 = 2 \div 4$ , що відповідає основним сухим ґрунтам.

3. 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. Встановлено, що для вибухонебезпечних речовин з малими діелектричними втратами вплив тангенсу кута діелектричних втрат на уявну частину кута переломлення буде незначним. 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  $\theta_0$  менших за 60 градусів.

4. Побудована електродинамічна модель дифракції електромагнітних хвиль при проходженні крізь багат шарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв'язання рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами. Проаналізовані діелектричної проникності  $\varepsilon$ , магнітної

проникності середовища  $\mu$  та тангенсу кута діелектричних втрат  $\operatorname{tg} \delta$  для речовин, з яких вироблені протипіхотні фугасні міни ПМН-2, ПФМ-1 та протипіхотні міни осколкової дії МОН-90 та ПОМ-3. Встановлено, що речовини, з яких вироблено їх корпуси, мають  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 0$ , а вибухові речовини поділяються на два класи:  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta = 0$  та  $\epsilon > 1$ ,  $\mu = 1$ ;  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ , відповідно. Отримано рівняння для визначення еквівалентного хвильового опору вибухонебезпечного предмету. Аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів відбивання та проходження показав, що модуль та фазове число коефіцієнту проходження суттєво залежать від дипольного моменту вибухової речовини та можуть змінюватись в 5–8 разів в залежності від хімічного складу вибухової речовини.

5. Проведено розрахунково-аналітичну оцінку достовірності та працездатності отриманих математичних моделей взаємодії електромагнітних полів та хвиль НВЧ-діапазону з вибухонебезпечними предметами різного конструктивного виконання. Перевірка отриманих математичних моделей дала задовільні результати. Підтверджено, що для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття  $R_{TE}$  для досліджених кутів падіння  $\theta_0$  зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності  $\epsilon$  збільшується за законом, близьким до логарифмічного.

## **РОЗДІЛ 4.**

### **РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ РІЗНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ВИКОНАННЯ**

У даному розділі, використовуючи математичний апарат отриманий у попередньому розділі, розроблено спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону. Розроблено алгоритм та процедура реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Проведена оцінка ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Проведена експериментальна перевірка працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Розроблено функціональна схема електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів. Розроблено практичні рекомендації щодо використання методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.

Основні результати розділу викладені у публікаціях [32, 35, 36, 38, 39].

#### **4.1. Спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону**

Більшість систем електромагнітного зондування предметів на землі працюють у діапазоні довжин хвиль, порівнянному з їхніми розмірами, що відрізняє їх від класичних радіолокаційних систем. Антена може перебувати близько до поверхні відбиття (ближнє поле, індукційна передача) або працювати в далекому полі. Основні технічні проблеми – високий рівень перешкод на малих відстанях і низьке співвідношення сигнал/шум, що ускладнює проєктування таких систем [116, 117].

Радіолокаційні системи ближнього зондування поверхні землі діляться на два типи: ті, що працюють у тимчасовій області (передають імпульси й аналізують відбитий сигнал) і в частотній області (сканують окремі частоти). Ручні електромагнітні сканери використовують переносні антени, що переміщуються за заданим маршрутом, створюючи радіолокаційні зображення або звукові попередження про ціль. Транспортні та повітряні системи застосовують великі антени і рух платформи для збору даних, оброблюваних методами SAR [118].

Через значні втрати на шляху поширення електромагнітних хвиль у ґрунті довжина хвилі випромінювання, що випускається, перевищуватиме або матиме той самий порядок величини, що й розмір міни. У той час як звичайні радіолокаційні системи працюють на довжинах хвиль, де розмір цілі зазвичай набагато більший за довжину хвилі падаючого випромінювання, радары для сканування поверхні землі працюють в діапазоні від Релея до Мі (або резонансу). Сумарні втрати на кількох довжинах хвиль можуть сягати 100 дБ для деяких матеріалів, а сумарне петлеве посилення таких радарів не перевищує 120 дБ, тому перед розробниками стоїть завдання виявлення ознак наземних предметів за дуже короткий час, зазвичай у межах 20 наносекунд [119]. Відбиття електромагнітної енергії від наземних предметів зумовлене відмінностями в імпедансі наземних мін порівняно із земними матеріалами. Земля містить значну кількість радіолокаційних розсіювачів, таких як каміння, нори тварин і штучне сміття, що призводить до того, що радар стикається з дуже високими рівнями перешкод на коротких відстанях. Подолання цієї проблеми і досягнення адекватного співвідношення сигнал/шум є серйозним технічним завданням. Автор роботи [120] надає більш детальну інформацію про проблеми проектування, пов'язані з виявленням наземних дрібних предметів.

Зображення що формує наземна система електромагнітного сканування відрізняється від оптичного через порівнянну з об'єктом сканування довжину хвиль, що знижує чіткість і залежить від властивостей ґрунту. Широка

діаграма спрямованості, рефракція та анізотропія погіршують роздільну здатність, але її можна поліпшити за допомогою синтезованої апертури. Віддзеркалення виникає через різницю імпедансу цілі та ґрунту; більшість ґрунтів мають діелектричну проникність 2-25, тоді як прісна вода ( $\epsilon \approx 80$ ) дає змогу виявляти об'єкти, на відміну від солоної води [121]. Ґрунт часто неоднорідний, створюючи перешкоди, які важливо враховувати для ефективності радара.

Необроблені радарні зображення містять «яскраві плями» через внутрішні віддзеркалення та спотворення пропорцій через варіації швидкості. Симетричні об'єкти, наприклад сфери, створюють гіперболічні відображення [122]. Обробка даних компенсує ці ефекти, зазвичай в автономному режимі. Георадар може використовувати поляризоване випромінювання для точного виявлення цілей. В роботі [123] розглядаються обмеження радіолокації для пошуку мін і три режими роботи антени: проксимальний (близько до землі), середній (на кілька довжин хвиль) і дистанційний (на значній відстані).

У реактивному ближньому полі енергія залишається в електромагнітних полях біля джерела, не випромінюючись. Натомість відбувається обмін енергією, і якщо ціль її поглинає, сигнал уловлюється антеною. Точні вимірювання ближнього поля георадарних антен розглянуто в роботі [124]

Радіолокаційні системи вільного простору повинні враховувати лише явища поширення через атмосферу [125, 126]. В роботі показано, що електромагнітні хвилі послаблюються в природних середовищах через втрати в електричному і магнітному полях. У більшості випадків магнітний відгук ґрунту незначний, але в ґрунтах із високим вмістом заліза або вулканічних породах його враховувати необхідно.

Вище проведено моделювання процесу розповсюдження електромагнітної хвилі у ґрунті із вибухонебезпечним предметом [35]. При цьому враховано процеси відбиття та поглинання хвиль багат шаровими

поверхнями ВВП [36] при довільному куті їх падіння. Окрему увагу приділено визначенню діелектричних властивостей матеріалів ВВП [38], що дозволяє підвищити точність детектування та відсортувати хибні сигнали. Отримані моделі успішно пройшли перевірку на працездатність та дозволяють вирішувати поставлені задачі, однак без експериментальної перевірки їх адекватності та достовірності результатів моделювання їх використання суттєво обмежується в практичній галузі. Окрім цього потребує експериментальної перевірки сам метод ідентифікації ВВП з різними характеристиками в реальних умовах.

Спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону відноситься до області піротехнічної служби розмінування території [40]. Відомий спосіб дистанційного детектування та розмінування за рахунок розповсюдження по поверхні ґрунту поверхневих хвиль Релея від сейсмічного джерела, розташованого у свердловині з метою ініціювання вибуху протипіхотних мін на відстані до 100 метрів від джерела [127]. Недоліком такого способу є необхідність попереднього визначення місць розташування мін, достатньо довготривалого створення свердловин в зонах концентрації вибухонебезпечних предметів, проведення процедури закладання вибухової речовини в свердловини та ініціювання вибуху, що створює додаткову небезпеку для служб з розмінування території та направленість лише на міни, що знаходяться безпосередньо у шарі землі.

Відомий спосіб дистанційного розмінування за рахунок дистанційного впливу на вибухонебезпечні предмети звуковими хвилями, який складається із генератора хвиль стискання та антени для фокусування хвиль стискання для створення звукового тиску в точці знаходження вибухонебезпечного предмету [128].

Недоліком цього способу є значне затухання потужності хвиль стиснення в повітрі та суттєвий вплив перешкод на ефективність фокусування хвиль стиснення, що в цілому знижує потужність хвиль

стискання для створення відповідного звукового тиску в точці знаходження вибухонебезпечного предмету, що в цілому призводить до обмеження зони дистанційного небезпечного розмінування. Крім того додатковим недоліком даного способу є необхідність застосування потужних генераторів хвиль стискання та складних антени для їх фокусування.

Найбільш близьким до запропонованого є спосіб дистанційного детектування за рахунок зниження ефективності вибухонебезпечного предмету, який включає виявлення ВВП на основі виявлення нелінійного електронного компонента ВВП, шляхом опромінення ВВП першим сигналом, що містить першу множину частот і має порівняно широкий промінь, отримання зворотного багато частотного сигналу, який включає щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, що обумовлюються взаємодією першого сигналу з одним або декількома нелінійними компонентами ВВП, визначення місця розташування ВВП, випромінювання потужного електромагнітного імпульсу в напрямку на визначене місце розташування ВВП з метою зниження його ефективності [129].

Недоліком даного способу є можливість дистанційного розмінування за рахунок зниження ефективності ВВП, що містять нелінійні електронні компоненти та встановлюються на поверхні землі. Це не дозволяє використовувати даний спосіб для дистанційного розмінування за рахунок зниження ефективності ВВП, що містять нелінійні електронні компоненти, та встановлюються на глибині в ґрунті. Оскільки встановлення ВВП в ґрунті буде суттєве знижуватиме достовірність виявлення таких ВВП, а в деяких випадках до їх не виявлення. Це має місце внаслідок невідомих та різних за типом електродинамічних властивостей ґрунту, які суттєво впливають на поляризаційні параметри першого сигналу в ґрунті, що використовується для опромінювання та виявлення ВВП, згідно даного способу. Крім того надійність виявлення ВВП в ґрунті на основі зворотного сигналу залежить

від відповідності невідомої поляризації першого сигналу в ґрунті до просторової орієнтації нелінійних електронних компонентів ВНП в ґрунті.

В основу корисної моделі покладене завдання створення способу дистанційного розмінування за рахунок зниження ефективності ВНП, що містять нелінійні електронні компоненти, та встановлюються на глибині, тобто способу дистанційного розмінування ВНП, що містять нелінійні електронні компоненти та встановлюють на глибині в ґрунті в умовах невідомих електродинамічних параметрів ґрунту, які суттєво впливають на поляризаційні параметри першого сигналу, що використовується для опромінювання СВП, згідно даного способу, в умовах вільної просторової орієнтації нелінійних електронних компонентів ВНП, що встановлюються на глибині в ґрунті.

Поставлене завдання вирішується за рахунок того, що опромінення ВНП першим сигналом, що містить першу множину частот і має порівняно широкий промінь, на відміну від прототипу, здійснюють одночасно за допомогою антен з вертикальною та горизонтальною поляризацією. Це дозволяє забезпечувати занурення першого сигналу вертикальної і горизонтальної поляризації на відповідну глибину та виявлення ВНП на глибині, шляхом прийому зворотних багато частотних сигналів вертикальної і горизонтальної поляризації, що включають щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, які обумовлюються взаємодією першого сигналу вертикальної поляризації та першого сигналу горизонтальної поляризації з одним або декількома нелійними компонентами ВНП, що мають вільну просторову орієнтацію в ґрунті, визначення суми зворотних сигналів вертикальної і горизонтальної поляризації, виявлення на основі визначеного сумарного сигналу ВНП на глибині в ґрунті та випромінювання потужного електромагнітного імпульсу в напрямку виявленого ВНП одночасно ти між антенами з вертикальною та горизонтальною поляризацією з метою дистанційного розмінування за рахунок зниження ефективності ВНП, що встановлені на глибині в ґрунті.

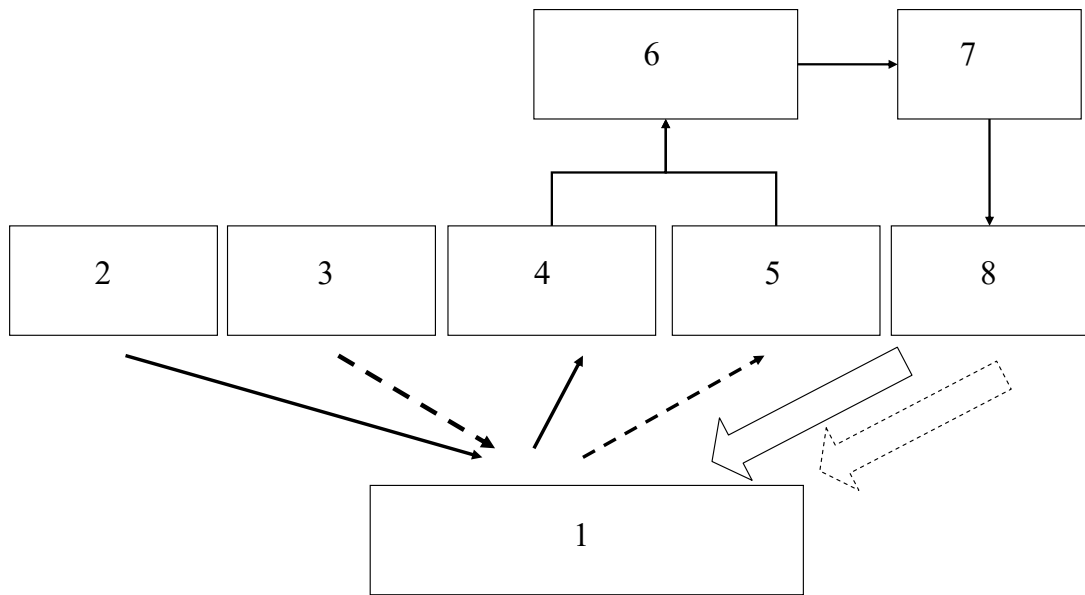


Рис. 4.1. Блок-схема запропонованого способу дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону, де: 1 – область можливого встановлення ВВП у ґрунті; 2 – опромінення першим сигналом вертикальної поляризації що має порівняно широкий промінь; 3 – опромінення першим сигналом горизонтальної поляризації що має порівняно широкий промінь; 4 – прийом зворотного багато частотного сигналу вертикальної поляризації; 5 – прийом зворотного багато частотного сигналу горизонтальної поляризації; 6 – визначення суми зворотних сигналів вертикальної і горизонтальної поляризації; виявлення та визначення місця розташування ВВП у ґрунті 7 на основі сумарного зворотного сигналу 6; випромінювання потужного електромагнітного імпульсу 8 вертикальної і горизонтальної поляризації в напрямку виявленого ВВП з метою дистанційного його розмінування шляхом зниження його ефективності.

Спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону реалізується наступним чином. Опромінення області можливого встановлення ВВП 1 (Рис. 4.1.) першим сигналом, що містить першу множину частот, шляхом одночасного

опромінення першого сигналу через антени вертикальної 2 (Рис. 4.1.) та горизонтальної 3 (Рис. 4.1.) поляризації, що мають порівняно широкий промінь. Прийманням антенами вертикальної 4 (Рис. 4.1.) та горизонтальної 5 (Рис. 4.1.) поляризації зворотних багато частотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації, які включають щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, що обумовлені взаємодією першого сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації, які опромінені кожною з відповідних антен, з одним або декількома нелінійними компонентами ВНП, що мають вільну просторову орієнтацію в ґрунті. Визначення суми зворотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації 6. Використання сумарного зворотного сигналу 6 (Рис. 4.1.) щодо виявлення та визначення місця розташування ВНП у ґрунті 7 (Рис. 4.1.) і випромінювання потужного електромагнітного імпульсу 8 (Рис. 4.1.) вертикальної та горизонтальної поляризації в напрямку виявленого ВНП з метою дистанційного його розмінування. за рахунок зниження ефективності ВНП, що встановлюються на глибині в ґрунті.

Опромінення області можливого встановлення ВНП першим сигналом, що містить першу множину частот, шляхом одночасного опромінення першого сигналу через антени вертикальної та горизонтальної поляризації, що мають порівняно широкий промінь, дозволяє забезпечувати максимальне щодо поточних електродинамічних параметрів середовища занурення поляризаційних складових першого сигналу до ґрунту для вільного куту нахилу напрямку опромінення відносно поверхні.

Приймання зворотних багато частотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації, що включають щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, які обумовлені взаємодією першого сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації з одним або декількома нелінійними компонентами ВНП дозволяють враховувати рівень зворотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації та використовувати їх суму для надійного виявлення та визначення місця розташування ВНП щодо

їх вільної просторової орієнтації у ґрунті. Це обумовлює можливість випромінювання потужного електромагнітного імпульсного сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації в напрямку виявленого ВНП з метою дистанційного розмінування за рахунок зниження ефективності ВНП, що встановлюються на вільній глибині в ґрунті.

Таким чином, використання запропонованого способу дистанційного детектування ВНП за рахунок зниження його ефективності на вільній глибині в ґрунті дозволяє підвищити безпеку та ефективність розмінування ВНП за рахунок виключення контакту людини при пошуку ВНП та їх розмінуванні та одночасним опроміненням області можливого встановлення ВНП першим сигналом вертикальної та горизонтальної поляризації, що містять першу множину частот, прийманням зворотних багато частотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації, що включають щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, обумовлених взаємодією першого сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації з одним або декількома нелінійними компонентами ВНП та випромінювання потужного електромагнітного імпульсного сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації в напрямку виявленого ВНП на вільній глибині в ґрунті.

#### **4.2. Алгоритм та процедура реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання**

Процес гуманітарного розмінування проходить кілька основних етапів. Спочатку здійснюється планування та оцінка ризиків, під час яких збирається інформація про потенційно небезпечні території. Далі проводиться нетехнічне обстеження, що включає опитування місцевих жителів, аналіз карт і звітів для визначення місць можливого мінування [130]. Після цього виконується технічне обстеження із застосуванням спеціального обладнання

для виявлення небезпечних об'єктів. Наступним етапом є очищення територій, яке передбачає знешкодження або знищення мін і вибухонебезпечних залишків. Після завершення робіт проводиться контроль якості, щоб упевнитися в повній безпечності ділянок. Завершальний етап — передача очищених територій у безпечне користування з оформленням відповідної документації [131].

Для попереднього обстеження територій активно застосовуються дрони, які допомагають ефективно виявляти небезпечні зони [132]. Механічні системи розмінування, такі як роботи, дозволяють проводити роботи дистанційно, мінімізуючи ризики для людей. Але зазвичай роботизовані системи виконують роль лише носія детекторів. Однак виходячи з того що гуманітарне розмінування вимагає високої якості очищення території від вибухонебезпечних предметів необхідним є контроль якості очищення людиною. В таких випадках обов'язковим є використання захисного спорядження, включаючи спеціальні костюми та шоломи, які забезпечують безпеку працівників піротехнічних підрозділів [133]. Для пошуку вибухонебезпечних предметів використовують різноманітне обладнання, зокрема металодетектори для виявлення металевих об'єктів у ґрунті [134]. Такий спосіб допомагає визначати місцезнаходження мін і вибухонебезпечних предметів, але має низку обмежень пов'язаних із матеріалом предмету що визначається та обмеженою дистанцією детектування.

Усунути недоліки магнітного методу дозволяє метод сканування земної поверхні електромагнітними хвилями [135]. Такий метод не має принципових обмежень по матеріалу предмету який визначається та може проводити детектування на значній відстані від вибухонебезпечного предмету. Такі системи добре себе зарекомендували в інженерних роботах при будівництві, де вони використовуються в якості георадарів. Однак такий метод має ряд обмежень які необхідно враховувати при його використанні для цілей гуманітарного розмінування. Значні втрати під час поширення

електромагнітних хвиль у ґрунті призводять до того, що довжина хвилі виявляється більшою або співмірною з розмірами наземної міни [136]. Це суттєво відрізняє георадар від звичайних радіолокаційних систем, що працюють у діапазонах, де розміри цілей значно перевищують довжину хвилі (наприклад, в оптичному діапазоні). UWB-радары функціонують у діапазоні від області Релея до резонансної області (Мі), де довжини хвиль і розміри цілей близькі за масштабом [137].

Сумарні втрати енергії в ґрунті можуть сягати 100 дБ у межах кількох довжин хвиль, залежно від матеріалу. Оскільки загальний коефіцієнт підсилення георадарів зазвичай не перевищує 120 дБ, це вимагає виявлення наземних мін у дуже короткі часові інтервали, зазвичай близько 20 нс. Георадар може ефективно працювати лише на відстані кількох довжин хвиль від антени, особливо у випадках ґрунтів із високими втратами [2].

Особливістю георадарів є те, що вони часто працюють у ближньому полі, де передача енергії відбувається переважно індукційним способом, або в дальньому полі, із традиційним поширенням хвиль. Через це пристрої стикаються з високим рівнем завад і низьким співвідношенням сигнал/шум, що є основною технічною проблемою. Усі ці фактори створюють значні труднощі при розробці ефективних георадарів для виявлення наземних мін.

В попередніх роботах нами проведення моделювання процесу розповсюдження електромагнітної хвилі у ґрунті із вибухонебезпечним предметом [26]. При цьому враховано процеси відбиття та поглинання хвиль багат шаровими поверхнями ВНП при довільному куті їх падіння. Окрему увагу приділено визначенню діелектричних властивостей матеріалів ВНП [29], що дозволяє підвищити точність детектування та відсортувати хибні сигнали. Однак невирішеною частиною проблеми залишається визначення технічних меж використання електромагнітного методу виявлення вибухонебезпечних матеріалів та оцінка його ефективності.

Основною складністю в роботі електромагнітних систем детектування є наявність перешкод всередині і на поверхні матеріалу. Окрему область

перешкод становлять бічні та задні пелюстки антени [138]. Інтерференція визначається як небажані джерела відбиття, які виникають в межах ефективної смуги пропускання і пошукового вікна детектора і представлені у вигляді просторово когерентних відбивачів. Прикладами об'єктів, що заважають, є нори тварин, тріщини в землі, каміння. Ретельна ідентифікація і розуміння цих об'єктів має вирішальне значення для вибору і експлуатації найкращих систем і алгоритмів обробки. Завади можуть повністю приховувати заглиблені цілі. Важливою проблемою є вплив на систему детектування нерівностей місцевості. Це призводить до зміни кута опромінення поверхні землі та, відповідно, кута відбиття. Методи обробки радіолокаційного сигналу, які «згладжують» радіолокаційний сигнал шляхом регулювання часу затримки відносно поверхні землі, не завжди дають гарний результат. Це пов'язано з тим, що неможливо передбачити ці зміни та неконтрольоване корегування сигналу лише збільшує похибки. Різкі розриви також можуть спричиняти багаторазові відбиття, які потім накладаються на вхідну відбиту енергію.

Виходячи із отриманих вище результатів в роботі запропоновано алгоритм реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів (рис. 4.2).

#### 1. Аналіз завдання та планування

Керівник робіт з розмінування:

- Ознайомлюється з отриманим завданням і супровідною інформаційною довідкою.
- Визначає межі території, що підлягає очищенню від ВВП.
- Приймає рішення про порядок виконання робіт, з урахуванням ризиків і особливостей місцевості.

#### 2. Облаштування безпечної смуги

Перед початком робіт:

- Облаштовується безпечна смуга перед краєм визначеної небезпечної території.

- Безпечна смуга слугує стартовою позицією для пошукових груп.

*Примітка:* При використанні електромагнітного сканування, безпечна смуга може бути зміщена на певну відстань від офіційної межі, щоб виявити ВВП за її межами.

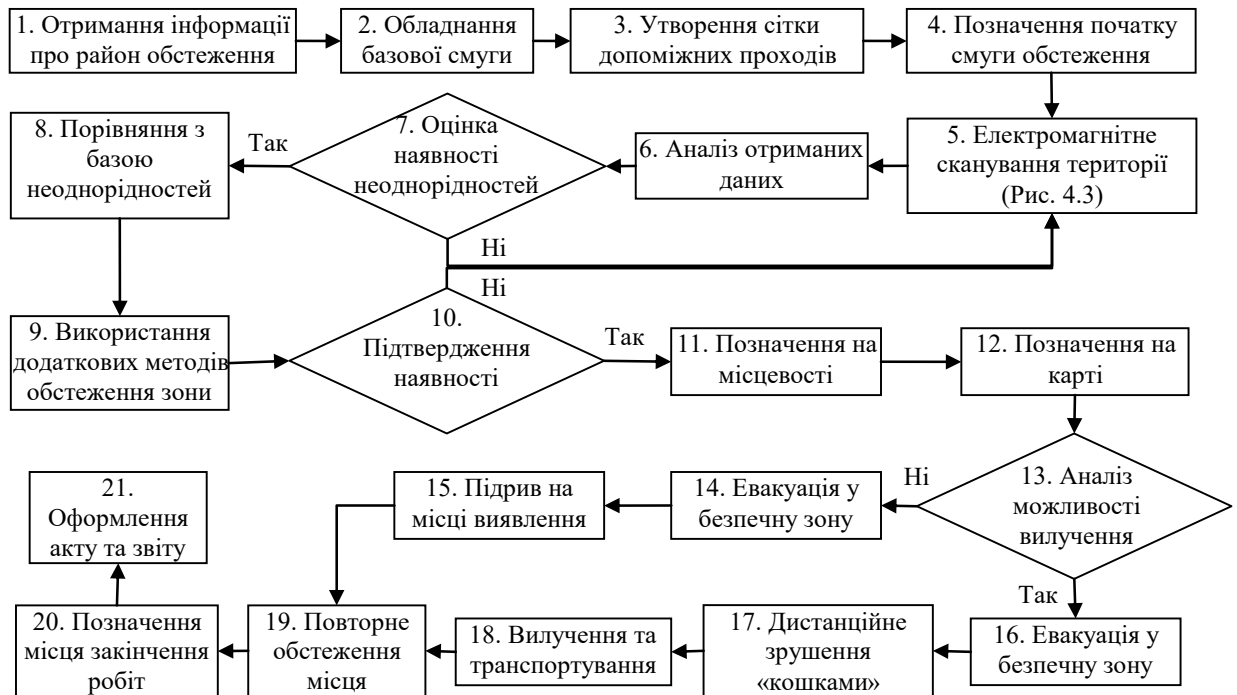


Рис. 4.2. Алгоритм реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.

### 3. Створення мережі допоміжних проходів

На території робіт утворюється сітка допоміжних проходів:

- Вони очищуються від ВВП.
- Проходи маркуються відповідним чином для забезпечення безпеки та орієнтування персоналу.

### 4. Початок пошуку ВВП

Пошук розпочинається від безпечної смуги у напрямку вглиб небезпечної території.

Роботи виконуються згідно з методикою, що застосовується:

- Наприклад, метод електромагнітного сканування ґрунту.

## 5. Коригування меж робіт (у разі потреби)

У випадках виявлення ВНП:

- Площа обстеження розширюється, якщо предмети знайдено на межі території.
- Також площа збільшується при виявленні прямих доказів наявності ВНП поблизу.

*Важливо:* Очистка обов'язково проводиться в радіусі не менше ніж 25 м від знайденого ВНП або прямих ознак його присутності.

## 6. Початок роботи операторів з детекторами

Роботи розпочинаються за командою керівника:

- Першим починає рух оператор першого детектора (лівий фланг).
- Наступні оператори розпочинають рух по своїх смугах лише після того, як буде забезпечено інтервал не менше 5 метрів з попереднім оператором.
- Це необхідно для уникнення інтерференції між детекторами.

## 7. Попередня оцінка маршруту при використанні безпілотних детекторів

Перед запуском безпілотних носіїв:

- Оператори здійснюють візуальну перевірку смуги обстеження.

Оцінюється:

- Наявність перешкод (ями, сміття, густі чагарники, інше захаращення).
- Можливість безпечного руху безпілотних платформ [39].

*Після проходження кожного етапу — результати фіксуються та погоджуються з керівником робіт.*

Електромагнітне сканування території реалізовується за алгоритмом рис. 4.3. Відбитий сигнал від вибухонебезпечного матеріалу отримує приймаюча антена, після чого цей сигнал підсилюється та відцифровується. Ключову роль у обробці сигналу відіграє цифровий процесор, який аналізує отриманий сигнал та переформатує його у візуалізований вигляд. Отриманні

данні можуть бути збережені у пам'яті та виведені на екран для аналізу оператором. З метою уточнення отриманих даних та зниження похибки необхідно проводити корегування частотно-амплітудних характеристик електромагнітного випромінювання. Це відбувається або автоматично за командою процесору або вручну за командою оператора.

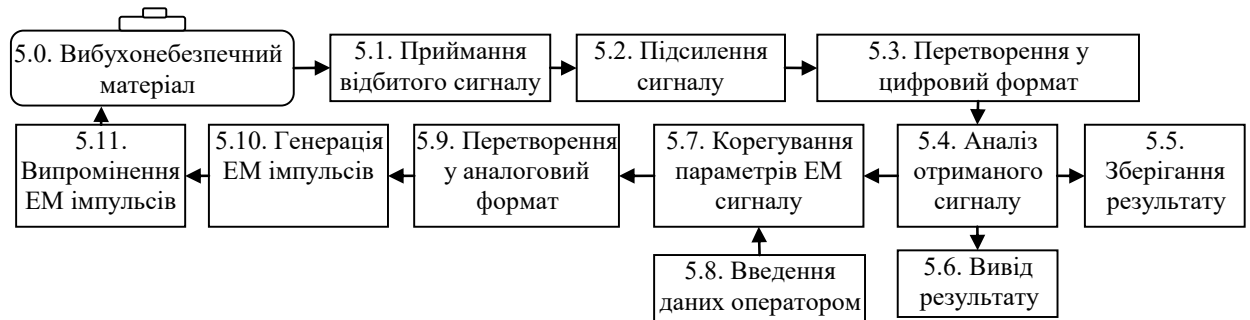


Рис. 4.3. Алгоритм роботи електромагнітного сканеру виявлення вибухонебезпечних матеріалів.

Відкоригований сигнал перетворюється у аналоговий формат та направляється до генератору електромагнітних імпульсів. Генератор імпульсів через випромінювальну антенну випромінює електромагнітні хвилі з відповідною сквапністю та довжиною імпульсу. Електромагнітне випромінювання потрапляє на поверхню поділу фаз, від якої воно відбивається. Відповідно алгоритм електромагнітного сканування є замкненим циклом.

Роздільна здатність визначається характеристиками антени і використовуваним методом обробки сигналу. Загалом, для досягнення прийнятної роздільної здатності електромагнітними системами детектування потрібні антени з високим коефіцієнтом підсилення. Це вимагає досить великої апертури на найнижчій частоті передачі. Тому для досягнення високого коефіцієнта підсилення при малому розмірі антени необхідно використовувати високу несучу частоту, яка може не проникати в матеріал на достатню глибину. При виборі обладнання для конкретного застосування необхідно знайти компроміс між планарною роздільною здатністю, розміром антени, можливостями обробки сигналу і проникненням в матеріал.

Роздільна здатність покращується зі збільшенням загасання, якщо є достатній сигнал для ідентифікації в загальному потоці перешкод. У середовищі з низьким рівнем загасання роздільна здатність, що досягається при горизонтальному скануванні, є гіршою, але тільки за цих умов площинну роздільну здатність можна покращити за допомогою методів синтезованої апертури.

Процедура дій оператора при виявленні сигналу від технічного засобу пошуку ВНП:

1. Реакція на сигнал

Після отримання сигналу від детектора оператор:

- Зупиняє рух.
- Здійснює візуальний огляд місця, де зафіксовано сигнал.

2. Аналіз результатів огляду

Якщо вибухонебезпечний предмет (ВНП) не виявлено:

- Роботи продовжуються у звичайному режимі.
- Місце сигналу не маркується.

Якщо є сумніви або потрібно уточнення:

- Застосовуються додаткові технічні засоби для перевірки сигналу.

3. Виявлення підозрілого об'єкта

У разі підтвердження наявності об'єкта, схожого на ВНП:

- Оператор оцінює можливість безпечного вилучення та транспортування ВНП.

4. Прийняття рішення щодо подальших дій

Якщо вилучення і транспортування можливі:

- ВНП вилучається з ґрунту (див. етап 6) і переноситься до безпечного місця або транспорту.

Якщо вилучення небезпечне:

- Приймається рішення про знищення ВНП на місці.

5. Підготовка до знищення ВНП на місці

Весь особовий склад, обладнання та інструменти відводяться на безпечну відстань.

На місці залишаються лише фахівці, залучені до підготовки підривних робіт.

Після знищення:

- Проводиться ретельний огляд території.
- Уламки та залишки ВВП видаляються.
- Утворені воронки та траншеї засипаються.

#### 6. Процедура вилучення ВВП

Перед безпосереднім вилученням:

- ВВП обережно зрушується з місця за допомогою «саперної кішки».

Після зрушення:

- ВВП обережно витягується з ґрунту.
- Переміщується до транспортного засобу або у спеціально визначене безпечне місце.

#### 7. Завершення робіт

Після виконання робіт керівник групи:

- Наносить результати на Робочу схему очищення території.
- Складає Акт виконання робіт з очищення місцевості від ВВП.
- Оформлює Щоденний звіт.

Таким чином, розроблено алгоритм реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів, який складається з 18 функціональних блоків та 3 логічних блоків та алгоритм роботи електромагнітного сканеру виявлення вибухонебезпечних матеріалів. Обидва алгоритми мають циклічну структуру. На основі цих алгоритмів проведено покроковий опис процедури реалізації запропонованого методу дистанційного електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.

### 4.3. Оцінка ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання

При формуванні сигналу електромагнітного випромінювання необхідно досягнути селективного відбиття від таких перешкод, як:

- дрібні шматки металу, осколки, гільзи (визначаються як дрібні, з площею поверхні не більше  $1,5 \text{ см}^2$ );
- зміни рельєфу місцевості, калюжі, нори тварин, тріщини та щілини в ґрунті
- пучки трави, скелі та каміння.

При оцінці потужності прийнятого сигналу необхідно враховувати коефіцієнти відбиття і проходження хвилі через діелектрик і досягнення цілі, а закон Снелла визначає відповідні кути падіння, відбиття, проходження і заломлення [35]. Для детектування на близьких відстанях ефективність процесу є високою. Детектування вибухонебезпечних матеріалів, схованих у товщі ґрунту є складною проблемою для виявлення радіолокаційними системами, а їх ефективність сильно залежить від умов місцевості. Для вертикально поляризованих хвиль при кутах падіння нижче кута Брюстера втрати на межі повітря-земля відносно невеликі, але швидко зростають при кутах падіння вище кута Брюстера. Оскільки діелектрична проникність і втрати на передачу залежать від кута падіння, цей кут не повинен перевищувати 85 градусів. Тому, щоб максимізувати робочий діапазон, радарі слід встановлювати якомога вище над землею. Отже, на заданій висоті ефективність радара залежить від діелектричної проникності ґрунту. На додаток до проблеми узгодження енергії з землею, ефективна площа поперечного перерізу всіх цілей зменшується в міру їх заглиблення.

Найпростіша модель для оцінки рівня сигналу виводиться з рівняння дальності дії радара дальнього радіуса дії, яке, однак, має обмеження щодо коректного відображення реальної роботи системи дуже короткого радіусу дії. Однак вона дозволяє оцінити очікувані рівні сигналу першого порядку.

Модель базується на рівнянні для напруги на приймачі як функції дальності  $r$  і поперечного перерізу радара цілі  $\sigma$ , яке має вигляд

$$V(r) = \frac{V_0}{\tau} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{A_e}{\sqrt{4\pi}} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \sqrt{\sigma} \cdot \tau_g \cdot \sigma_t \cdot m \cdot e^{-k2r}, \quad (4.1)$$

де  $V_0$  – пікова напруга випромінювання;

$\tau$  – тривалість імпульсу, с;

$c$  – швидкість світла,  $\text{мс}^{-1}$ ;

$A_e$  – ефективна апертура антени,  $\text{м}^2$ ;

$\sigma$  – цільовий переріз,  $\text{м}^2$ ;

$m$  – кількість усереднень;

$\tau_g$  – коефіцієнт передачі у ґрунті;

$\sigma_t$  – коефіцієнт відбиття від цілі;

$r$  – дальність, м;

$k = \alpha + j\beta$  – константи поширення.

За відсутності будь-яких перешкод на місцевості і за умови повного усунення відбиття від передньої поверхні можна розрахувати ймовірність виявлення вибухонебезпечного матеріалу під ґрунтом. Приймаючи відношення сигнал-шум електромагнітного приймача 15дБ та відносну проникність ґрунту  $\epsilon_r = 10$ , для вибухонебезпечного предмету з розмірами 0,2 м залежність ймовірності виявлення від глибини знаходження цілі представлена на рис. 4.4. Відстань від антени до поверхні землі становить 10 см.

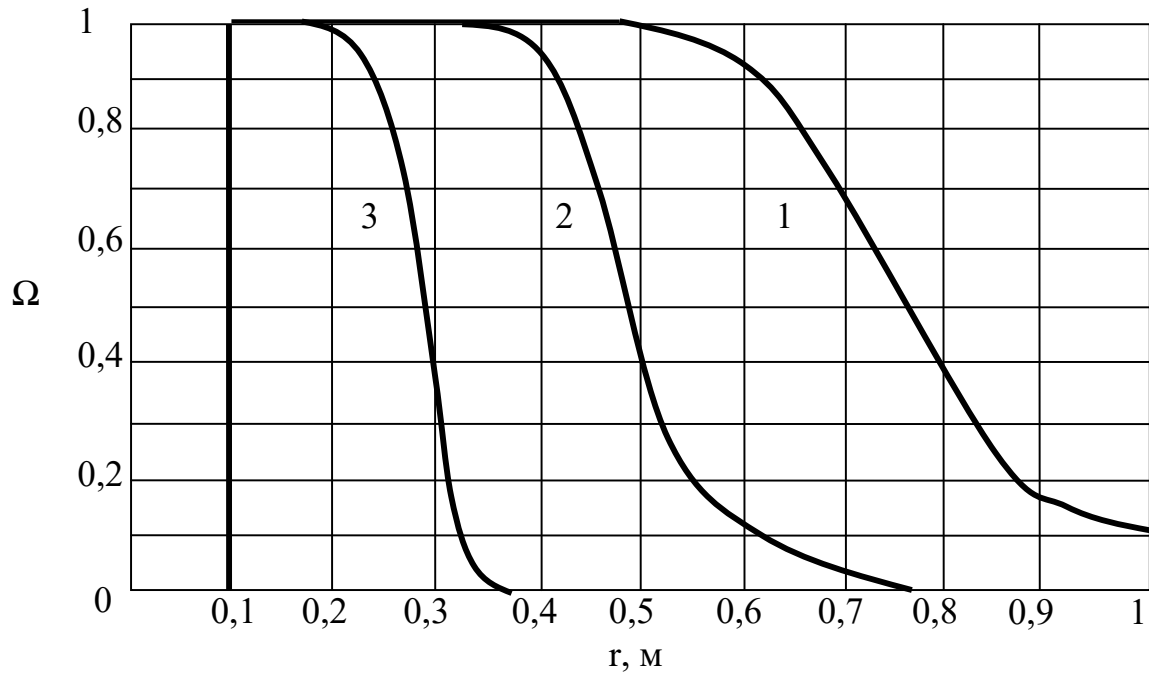


Рис. 4.4. Залежність ймовірності виявлення вибухонебезпечного матеріалу від глибини його занурення при різних частотах випромінення: 1 – 1 ГГц; 2 – 2 ГГц; 3 – 3 ГГц.

Рисунок 4.4 показує, що частота електромагнітного сигналу при скануванні суттєво впливає на ймовірність виявлення вибухонебезпечного предмету (ВНП). Якщо при сигналі з частотою 3 ГГц об'єкт розміром 10 см глибше за 25 см від поверхні землі знайти вже неможливо, то при частоті сканування 1 ГГц достовірну навіть на глибині більше 50 см можна отримати стійкий достовірний сигнал. Однак при зниженні частоти є суттєве обмеження у розподільній здатності, тобто завжди необхідно співвідносити частоту із розмірами об'єкту пошуку. При перевищенні довжини хвилі за розміри об'єкту сигнал зникає повністю за рахунок того що електромагнітне випромінення проходить крізь об'єкт без відбиття.

Суттєвим фактором при детектуванні вибухонебезпечних матеріалів у ґрунті є властивості самого ґрунту. Діелектрична проникність ґрунту варіюється в широкому діапазоні в залежності від геологічних особливостей та обводненості. Залежність ймовірності виявлення вибухонебезпечного

матеріалу з властивостями, що вказані вище при частоті випромінення 2 ГГц представлено на рис. 4.5.

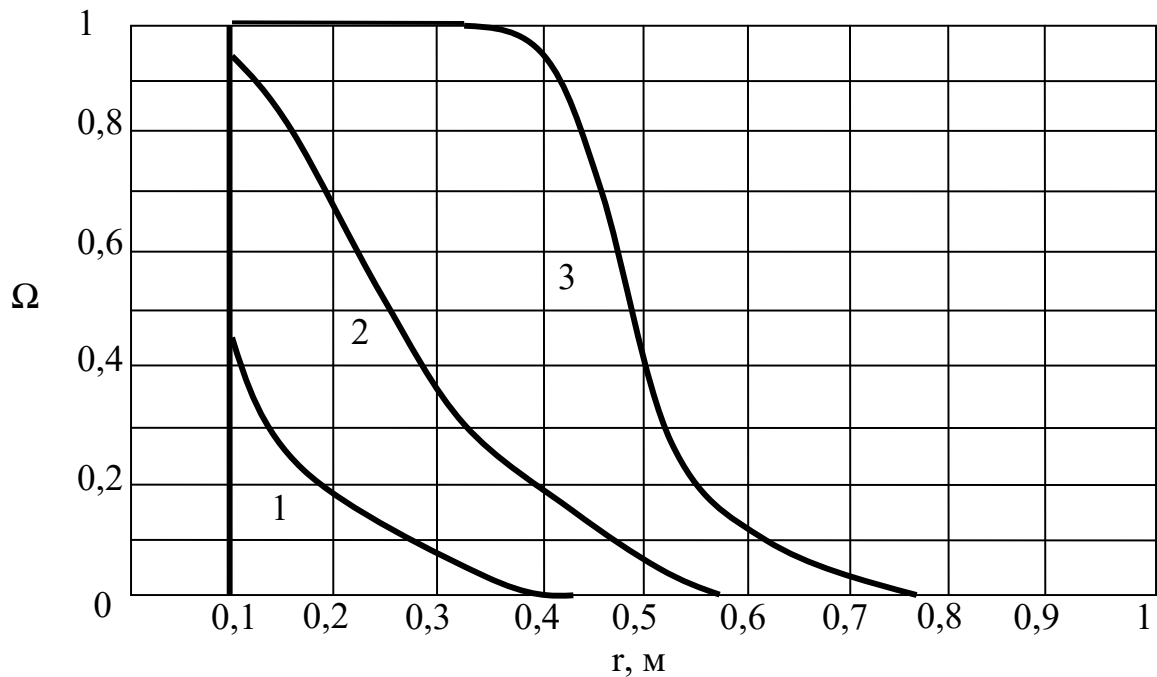


Рис. 4.5. Залежність ймовірності виявлення вибухонебезпечного матеріалу від глибини його занурення при різній діелектричній проникності ґрунту: 1 –  $\epsilon_r = 3$ ; 2 –  $\epsilon_r = 5$ ; 3 –  $\epsilon_r = 10$ .

Рис. 4.5 показує, що зниження показника діелектричної проникності ґрунту  $\epsilon_r$  до 3 призводить до суттєвого зниження достовірності визначення вибухонебезпечних матеріалів навіть біля поверхні землі та становить менше 45%. Тобто перед початком процесу детектування визначеної території необхідно з'ясувати геологічні особливості поверхневого слою. Важливим також оцінка обводненості ґрунту. Тобто доцільним є вибір часового періоду процесу детектування.

Звичайно, що розміри вибухонебезпечного матеріалу також впливають на ймовірність їх виявлення. При частоті випромінення 2 ГГц та діелектричній проникності ґрунту  $\epsilon_r = 5$  залежність ймовірності виявлення вибухонебезпечного матеріалу від його розмірів представлено на рис. 4.6.

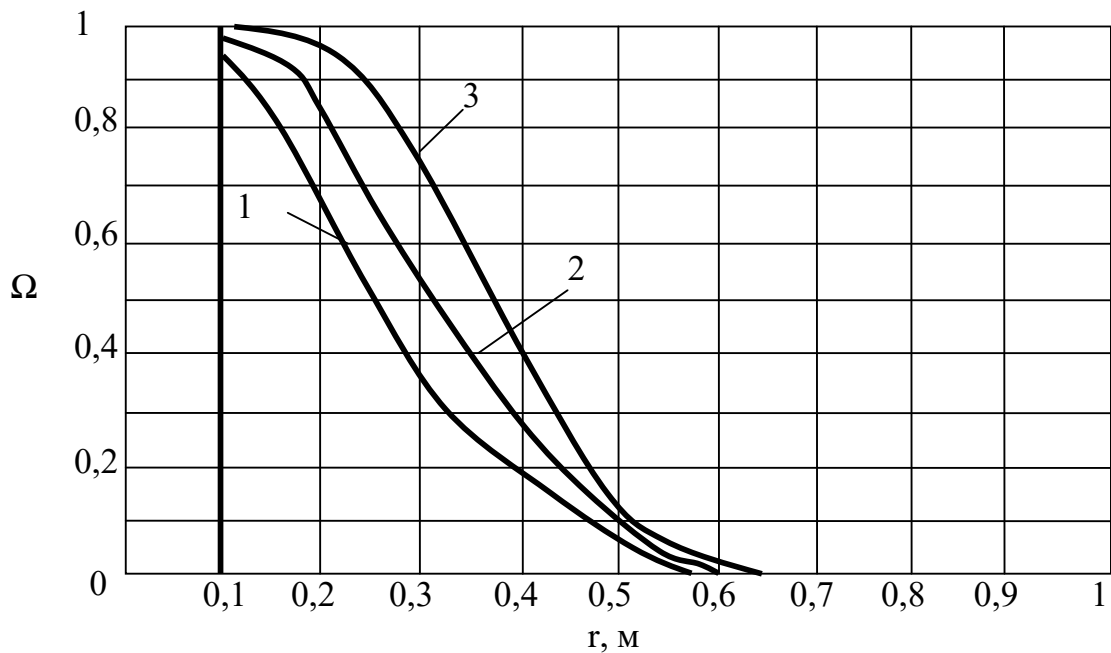


Рис. 4.6. Залежність ймовірності виявлення вибухонебезпечного матеріалу від глибини його занурення: 1 – 0,1 м; 2 – 0,25 м; 3 – 0,5 м.

З рис. 4.6 видно, що із всіх розглянутих параметрів розмір об'єкту сканування має найменший вплив. В діапазоні від 0,1 до 0,5 метрів, якому відповідають більшість існуючих штатних та саморобних ВВП, ймовірність виявлення змінюється на 15-25%. Це є позитивним результатом так як дозволяє проводити пошук ВВП у широкому діапазоні конструктивного виконання практично без корегування характеристик електромагнітного випромінювання.

Очікується, що в дуже сухих ґрунтах і на невеликій глибині залягання коефіцієнт розсіювання ВВП з металевою оболонкою зменшиться приблизно на 10 дБ. За тих же умов площа поперечного перерізу ВВП з пластиковою оболонкою зменшиться більшою мірою через зменшення діелектричного контрасту між матеріалом оболонки і навколишнім ґрунтом. Тому такі ВВП краще виявляються у вологих піщаних ґрунтах, ніж у сухих. Однак, за рахунок того, що ВВП із пластиковою оболонкою мають більші зазори на рух оболонки до підриву, їх знаходження у сипучих ґрунтах є більш безпечним.

Електромагнітні системи детектування вибухонебезпечних предметів повинні мати співвідношення сигнал/шум не менше 20 дБ, щоб виявляти заглиблені об'єкти за будь-яких погодних умов. Тому для виявлення заглиблених пластикових цілей із зазорами відповідне співвідношення сигнал/шум має становити щонайменше 12 дБ у сухих умовах і 18 дБ у вологих умовах. Вважається, що звичайні радіолокаційні системи здатні розділити дві ідентичні цілі з шириною імпульсу між ними 0,8. У галузі оптики Релеєм запропоновано, визначати роздільну здатність такою, щоб основна інтенсивність одного компонента збігалася з першим мінімумом інтенсивності іншого компонента.

Розсіювання електромагнітної енергії відбувається через різницю імпедансу вибухонебезпечних матеріалів. Найбільш поширені форми предметів (куб, шар, циліндр) мають добре вивчені властивості випромінювання, які можуть змінюватися залежно від показника діелектричної проникності ґрунту [139]. Вибухонебезпечні матеріали можуть мати декілька центрів розсіювання, кожен з яких має власну кутову діаграму спрямованості, а у випадку пластикових оболонок додаткові розсіювачі можуть генеруватися внутрішньою структурою предмету. Більшість вибухонебезпечних предметів із пластиковою оболонкою можна розглядати як багат шарові діелектричні циліндри, кожна межа розділу яких викликає відбиття. Часові характеристики останніх можна змодельовати за допомогою простої моделі лінії передачі, що представляє випадок, коли кут падіння і кут відбиття рівні (рис. 4.7).

Як видно з рис. 4.7 сигнатуру часової області сигналу при детектуванні вибухонебезпечних матеріалів у ґрунті можна розділити на окремі області. Кожній області відповідає своя поверхня розділу. На рис. 4.7 показано 3 області, але їх може бути і більше в залежності від конструкційних особливостей вибухонебезпечного предмету. Області 1, рис. 4.7 відповідає відбиття сигналу від поверхні землі. Область 2, рис. 4.7 демонструє відбиття від поверхні корпусу ВПП.

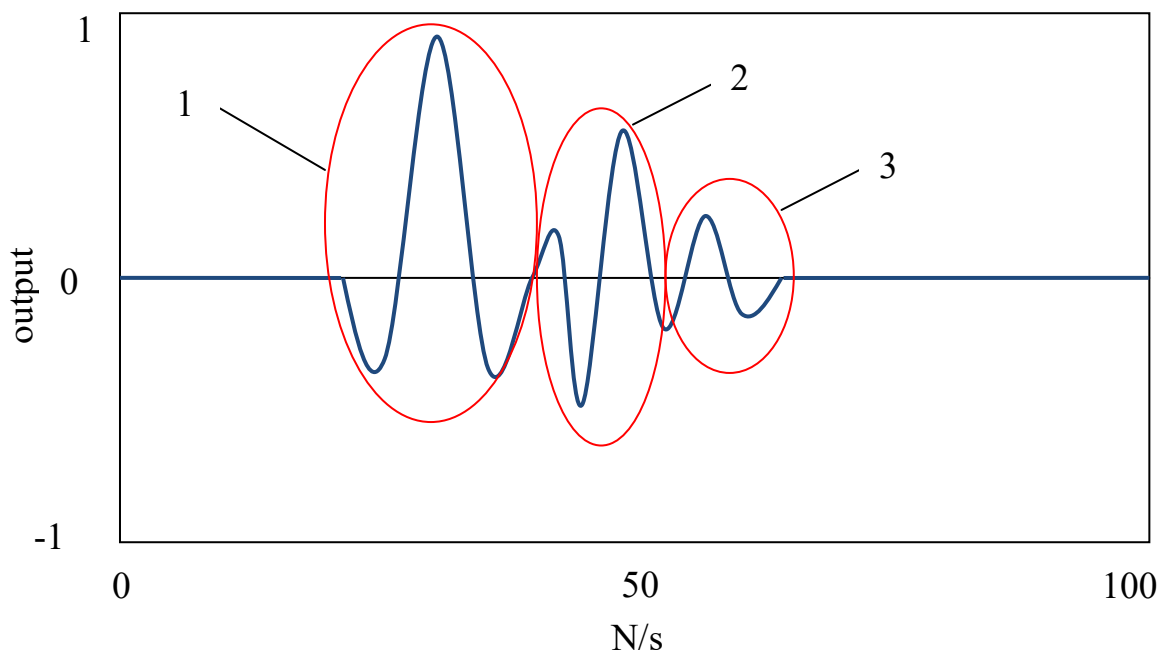


Рис. 4.7. Характерна сигнатура часової області симуляції вибухонебезпечних предметів.

По висоті піків області 2 можна розпізнати матеріал оболонки. При металевій оболонці піки будуть яскраво визначеними та суттєво вище ніж у випадку із пластиковою оболонкою. Пік 3 дозволяє ідентифікувати вид вибухонебезпечної речовини. Зазвичай 3 пік буде найслабшим за рахунок ослаблення сигналу при відбитті від поверхні землі та матеріалу оболонки. Але основною причиною слабого сигналу області 3 рис. 4.7 є невеликий показник діелектричної проникності більшості вибухонебезпечних матеріалів. Звичайно, що безпечні об'єкти (каміння, ущільнення, тощо) також дають сигнали відображення. Однак зазвичай такі предмети не мають багатошарової структури, відповідно кількість піків сигнатури буде меншим. Окрім цього напрацювання бази даних для характерних піків відповідних областей надасть можливість підвищити якість розпізнавання ВНП.

Таким чином, визначено граничні умови навколишнього середовища при яких використання запропонованого методу дасть мінімальну похибку. Моделювання ймовірності виявлення вибухонебезпечних предметів на різній

глибині у ґрунті показало, що найбільший вплив має частота сигналу сканування. Так при зниженні частоти сканування з 3 ГГц до 1 ГГц достовірність визначення предмету розмірами 0,1 м зростає з 0,2 м до 0,5 м відповідно. Але зниження частоти опромінення є обмеженим розподільною здатністю для предметів відповідного розміру. Показано, що при зниженні показника діелектричної проникності ґрунту від до 3 неможливо досягнути задовільної ймовірності визначення навіть у при поверхневому шарі ґрунту, тоді, як при  $\epsilon_r = 10$  задовільна ймовірність спостерігається навіть на глибині 0,3 м. Також встановлено, що у діапазонах розмірів реальних вибухонебезпечних предметів (0,1-0,5 м) ймовірність детектування знижується на 10-25%. Аналіз характерної сигнатури часової області симуляції вибухонебезпечних предметів показав, що напрацювання бази даних таких сигнатур дозволить зменшити кількість хибних сигналів.

#### **4.4. Експериментальна перевірка працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання**

##### **4.4.1. Розробка функціональної схеми електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів**

З метою експериментальної перевірки отриманих теоретичних моделей та визначення практичних можливостей електромагнітного методу детектування вибухонебезпечних предметів в роботі розроблена функціональна схема наземного детектору. Основними вимогами при побудові функціональної схеми було реалізація можливості трансформації отриманих аналогових сигналів у цифровий формат, порівняння фаз та амплітуд вихідного та вхідного сигналу та можливість формування візуалізаційної картини прийнятого сигналу та його збереження. Розроблена функціональна схема представлена на рис. 4.8 [35].

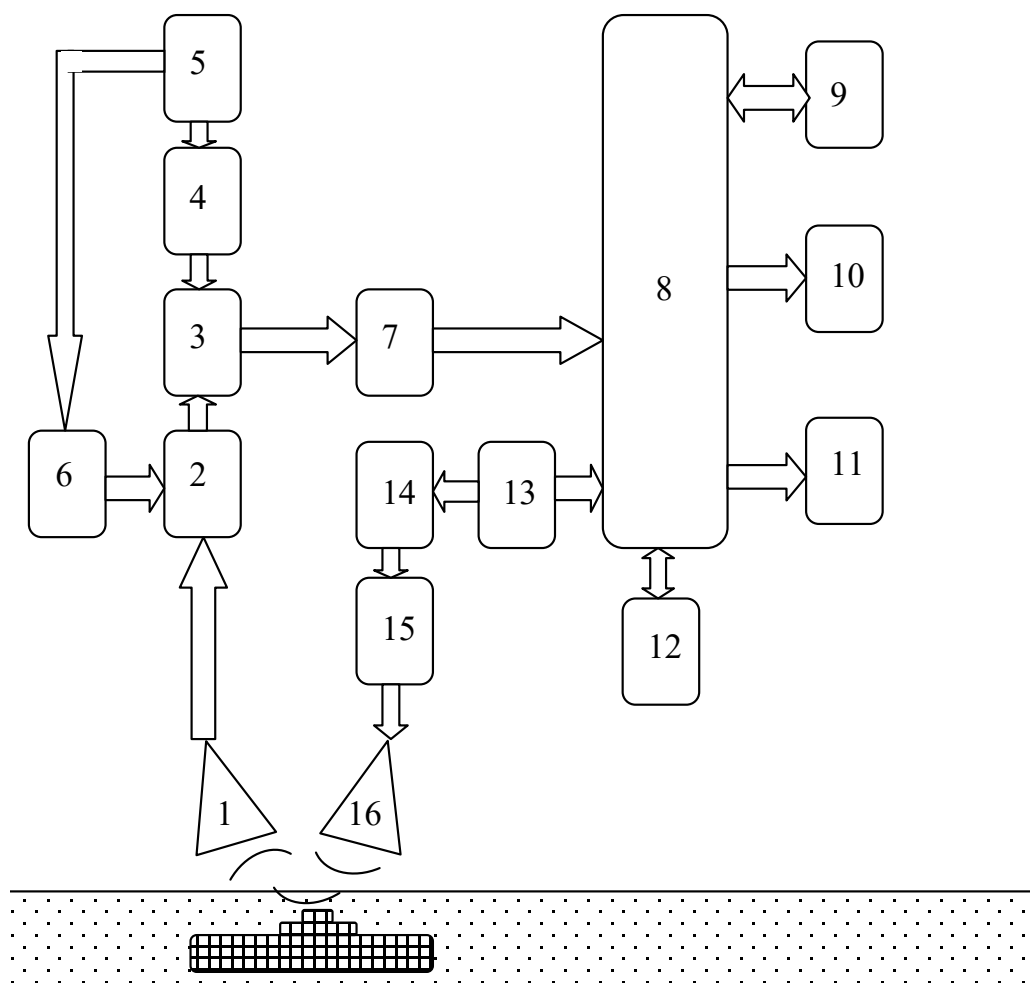


Рис. 4.8. Функціональна схема радіолокаційного модуля для електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів: 1 – приймаюча антена; 2 – підсилення сигналу, що змінюється у часі; 3 – відбір та затримка сигналу; 4 – блок таймінгів; 5, 6 – цифрово-аналоговий перетворювач; 7 – аналогово-цифровий перетворювач; 8 – цифровий процесор; 9 – інтерфейс керування; 10 – вивід аудіо сигналів; 11 – вивід візуалізованих даних; 12 – блок пам'яті; 13 – модуль синхронізації; 14 – цифровий вузол формування інтервалів затримки; 15 – генератор імпульсів електромагнітного випромінювання; 16 – передаюча антена.

На рис. 4.8 наведено функціональну схему радіолокаційного модуля, який складається з двох основних вузлів – радіочастотного і цифрового. Радіочастотний вузол класично представлений приймаючою (1, рис. 4.8) і

передаючою антенами (16, рис. 4.8), відповідно, фідерною системою і модулями приймаючого і передаючого підсилювачів.

Основою цифрового вузла виступає цифровий процесор (8, рис. 4.8). В роботі [129] показано, що в якості цифрового процесору можна використовувати процесори Blackfin від виробника Analog Devices. З процесором пов'язані оперативна пам'ять, двоспрямований інтерфейс керування та пристрої виведення аудіо- і цифрового потоків (10, 11 рис. 4.8).

Цифровий процесор через модуль синхронізації передає цифровий код, відповідний потрібному таймінгу (часовому інтервалу), у вузол формування таймінгів, який, у свою чергу, визначає час роботи генератора імпульсів. Сформований у такий спосіб пакет імпульсів через передавальний підсилювач (підсилювач потужності) і фідерну систему надходить на передавальну антену і випромінюється в простір.

У разі потрапляння переданого сигналу на неоднорідний предмет із чітко виділеною поверхнею розділу між різними матеріалами (міну), він відбивається від нього і приймається приймальною антеною. Сигнал з антени надходить на обробку в блок посилення сигналу (БПС), що змінюється в часі, який слугує для компенсації геометричної втрати діапазону на кожному кроку діапазону, і представляє за своєю суттю систему автоматичного регулювання посилення (АРП), керовану за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Необхідні для роботи блоку БПС параметри формуються процесором 8.

З блоку БПС сигнал надходить на блок вибірки і зберігання (затримки), інформація про прийнятий сигнал, з якого за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) перенаправляється в процесор для подальшої цифрової обробки згідно з алгоритмом розпізнавання.

Блок вибірки і зберігання (затримки), своєю чергою, керується і синхронізується за допомогою блоку таймінгів (4, рис. 4.8) сигналами, що надходять із трьох цифро-аналогових перетворювачів. Цифровий процесор,

за допомогою програмного забезпечення, формує необхідні для роботи сигнали.

Дискретизація здійснюється шляхом послідовного збільшення інтервалу повторення імпульсів дискретизації з кожним інтервалом повторення імпульсів аж до досягнення 512 відліків, після чого процес повторюється. Наприклад, крок дискретизації 50 пс додається до зразкового (обраного еталонного) інтервалу повторення імпульсів, що дає змогу запобігти дискретизації прийнятого сигналу через рівні проміжки часу. Використання для створення послідовності пакетів імпульсів повільного темпу, що генерується цифровим способом, і швидкого темпу, що генерується аналоговим способом, дає змогу формувати дискрети з інкрементною синхронізацією.

Як вже було зазначено, програмне забезпечення радару розробляється під відповідну архітектуру процесору і відповідає за збір даних з повною швидкістю передавання даних  $16 \text{ Мбіт/с}^{-1}$ , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і загальні адміністративні завдання. На додаток до цього процесор виконує алгоритми обробки сигналів, які перетворюють радіолокаційні дані в звук кожні 16 мс. Інші завдання включають в себе зв'язок з іншими пристроями, підключеними до плати радару. Радар споживає може споживати до 2,3 Вт і буде містити уся обробку, необхідну для забезпечення звукового попередження про мінну ціль, як показано на рис. 4.8.

Додаткове використання часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів. Можливість використання цих підходів для вирішення подібних задач продемонстровано в роботах [140].

#### 4.4.2. Результати експериментальної перевірки працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів

Експериментальна перевірка працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів проводилось за наступною методикою. У ґрунті розміщували вибухонебезпечний предмет та проводили проїзд електромагнітним детектором над місцем розміщення ВВП. Для підтвердження отриманих результатів при однакових умовах проводилось три проїзди та знімалась зображення радіолокаційної карти (Рис 4.9).



Рис. 4.9. Експериментальна перевірка працездатності методу електромагнітного детектування

Під час експерименту у якості ВНП використовували три види мін: ПФМ-1 ("Пелюстка") – фугасна міна, із невеликими розмірами та незначним вмістом металевих конструкційних елементів; ПМН-2 – фугасна міна натискної дії із пластиковим корпусом (Рис 4.10); ТМ-62 – велика протитранспортна міна із металевим корпусом.

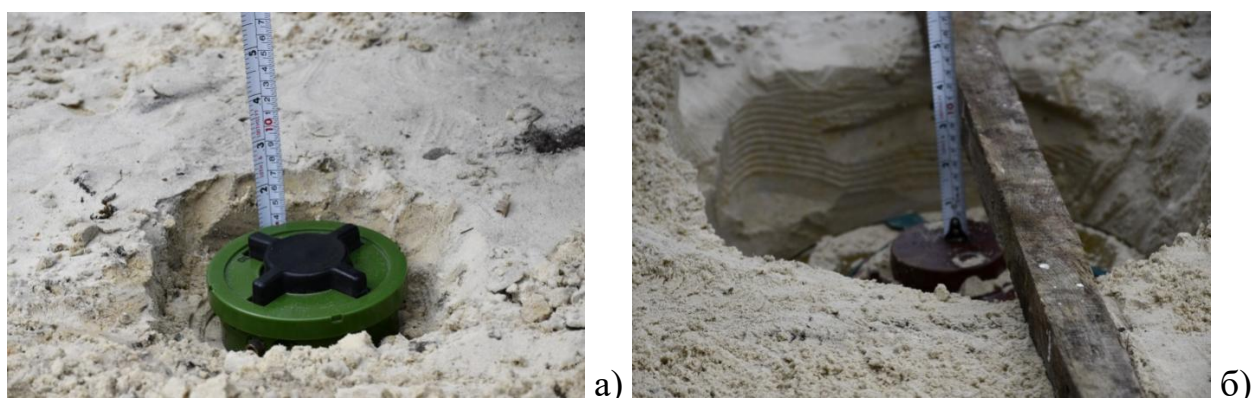
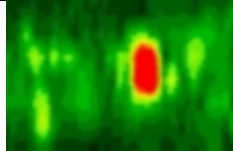
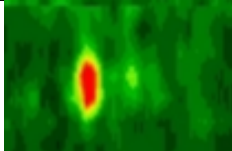
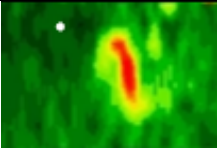
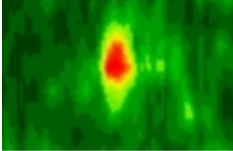
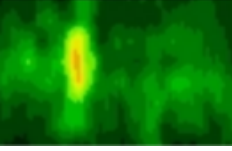
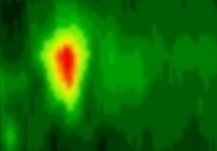


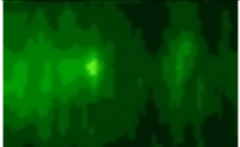

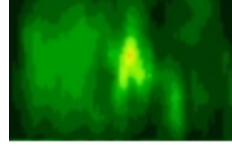
Рис. 4.10. Розміщення фугасної міни натискної дії із пластиковим корпусом ПМН-2 під час проведення експериментів (а) та велика протитранспортна міна із металевим корпусом ТМ-62 (б)

Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 4.1, 4.2, 4.3.

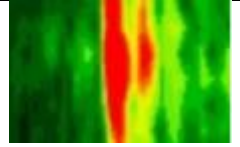
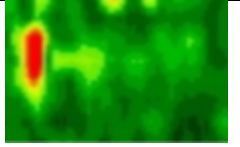
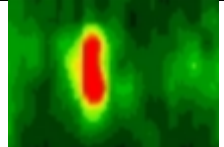
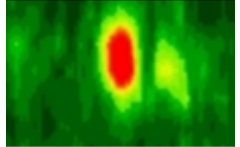
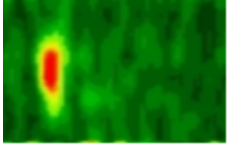
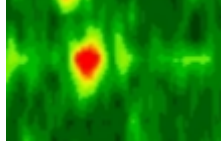
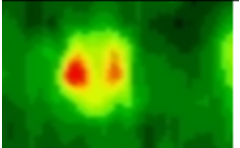
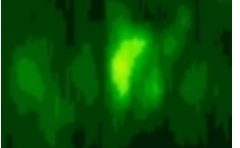
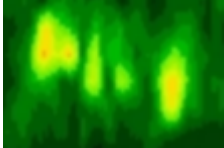
Таблиця 4.1. – Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПФМ-1

Глибина\ Ґрунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
1	2	3	4
5 см			
20 см			

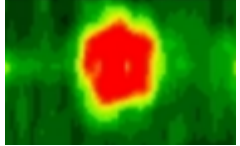
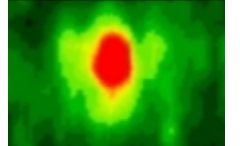
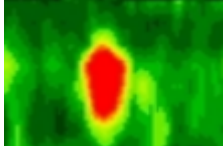
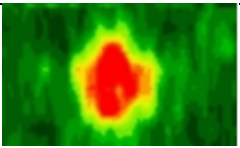
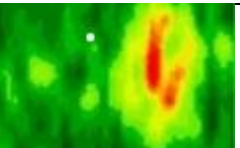
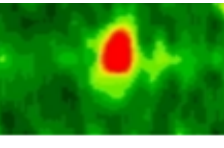
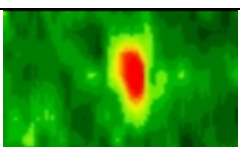
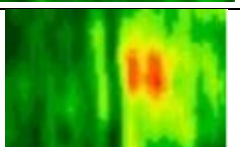
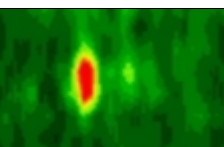
## Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
50 см			

Таблиця 4.2. – Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПМН-2

Глибина\ Ґрунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Таблиця 4.3. – Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ТМ-62

Глибина\ Ґрунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Вибухонебезпечні предмети розміщувались на глибинах – 5 см, 20 см, 50 см. Більшу глибину розглядати недоцільно так, як на більшій глибині при гуманітарному розмінуванні такі міни практично не зустрічаються. Окрім цього із глибиною потужність відбитого сигналу падає настільки, що такі невеликі міни без металевої оболонки, як ПФМ-1 та ПМН-2 детектувати за допомогою електромагнітного методу технічно практично неможливо.

Також при експериментальному дослідженні розглядалось три види ґрунту – сухий пісок, мокрий пісок та суглинок. Ці види ґрунтів є найбільш розповсюдженими.

Аналіз радіолокаційних карт електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів (табл. 4.1-4.3) показує, що для усіх типів мін у мокрому піску спостерігається найгірша якість детектування. Це пояснюється високим коефіцієнтом поглинання електромагнітних хвиль вологовмісних середовищ. Гірша якість детектування для суглинків у порівнянні з сухим піском також пояснюється наявністю більшого вмісту вологи саме у суглинках.

Як і очікувалось найбільш чітку радіолокаційну карту має міна ТМ-62 (табл. 4.3). За рахунок своїх великих розмірів та металевої оболонки такі міни можна детектувати на глибинах до 50 см, а на глибині до 20 см «плями» відбиття мають чіткі контури навіть без застосування додаткових фільтрів.

Радіолокаційні карти для мін ПФМ-1 (табл. 4.1) показали, що їх стійке детектування можливо лише на глибинах до 20 см для всіх видів ґрунтів. Також як видно з табл. 4.1 для детектування на таких глибинах для ґрунтів із великим вмістом вологи вже необхідним є використання спеціальних фільтрів та алгоритмів обробки сигналу. Представлені радіолокаційні карти для глибин 20 см ще можна обробити в умовах полігону, коли заздалегідь відомі місця розміщення мін. В реальних умовах результати детектування будуть гіршими. Видно, що для таких протипіхотних мін навіть для умов полігону на глибинах більше 50 см практично не вдалось отримати стійкого сигналу відбиття та отримані результати можна віднести до «шумів».

Протипіхотна міна ПМН-2 (табл. 4.2) має більш якісні карти електромагнітного детектування у порівнянні з ПФМ-1 (табл. 4.1). Виходячи з того, що вміст металевих компонент у цих двох мінах приблизно однаковий, це чітко вказує на вплив саме розміру об'єкту детектування. І для таких мін вже можна отримати чітку радіолокаційну карту навіть для глибини 20 см.

Таким чином, аналіз радіолокаційних карт для найбільш розповсюджених видів вибухонебезпечних предметів показав, що проти транспортна міна ТМ-62 якісно детектується електромагнітним методом на достатньо великих глибинах (до 50 см) для всіх найбільш поширених видів ґрунтів. Детектування протипіхотних мін із малим вмістом металевих конструкційних елементів (ПМН-2, ПФМ-1) запропонованим електромагнітним методом має обмеження по глибині та якісний стійкий сигнал спостерігається на глибинах до 20 см. Але протипіхотні міни мають найбільшу руйнівну силу коли вони розташовані на поверхні землі або приховані лише рослинним покривом. Тому виходячи із специфіки застосування цих мін можна зробити висновок про низьку вірогідність їх розташування на глибинах більше 20 см. Враховуючи складність використання інших методів детектування таких мін із незначним вмістом металевих компонентів, ці показники суттєво перевищують аналогічні методи.

Додатково підвищити якість детектування дозволить розробка програмного забезпечення для обробки та фільтрації отриманих електромагнітних сигналів. Це дозволить відсікати хибні сигнали та підвищувати контрастність корисних сигналів. Основою для побудови такого програмного комплексу можуть слугувати математичні моделі розсіювання електромагнітного випромінювання де враховані конструкційні особливості вибухонебезпечних предметів та характеристики ґрунтів. Саме на це доцільно спрямувати зусилля майбутніх досліджень

Таким чином, розроблено функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів на основі цифрового процесору можна Blackfin. Апаратна частина детектору включає випромінюючу та приймаючу антени, блок посилення сигналу, систему автоматичного регулювання посилення, цифро-аналоговий перетворювачі та блок таймінгів. Така функціональна схема дозволяє організовувати збір даних з повною швидкістю передавання даних  $16 \text{ Мбіт/с}^{-1}$ , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і проводити паралельні загальні адміністративні завдання на процесорі.

На основі розробленого детектору проведено експериментальну перевірку працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Результати експерименту повністю підтвердили вплив обводненості ґрунтів, розміру об'єкту детектування та конструкційних особливостей вибухонебезпечних предметів. Результати аналізу радіолокаційних карт електромагнітного детектування мін ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62 продемонстрували практичну спроможність використання запропонованого методу для виявлення заглиблених мін. Достатня якість детекції для мін ТМ-62 забезпечується на глибинах до 50 см, а для ПМН-2, ПФМ-1 до 20 см. Ці показники повністю відповідають специфіки використання проти транспортних та протипіхотних мін та показують більшу якість у порівнянні з аналогічними методами. Використання відповідних математичних моделей, методів часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів.

#### **4.5. Розробка практичних рекомендацій щодо використання методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів**

На підставі отриманого завдання та інформаційної довідки керівник проведення робіт з розмінування визначає територію, яка підлягає очищенню від вибухонебезпечних матеріалів. Перед початком проведення робіт з очищення території від вибухонебезпечних предметів (ВНП) перед краєм небезпечної території облаштовується безпечна смуга. На небезпечній території утворюється сітка допоміжних проходів, які повинні бути очищені від ВНП та відмарковані.

Першочергову увагу треба приділити броне захисту особового складу. Зона ведення гуманітарного розмінування (ЗВГР) характеризується підвищеним рівнем небезпеки у разі загрози вибуху, потрапляння під обстріли ворожої артилерії, реактивної системи залпового вогню, авіа бомбардування, радіоактивного зараження та отруєння небезпечними хімічними речовинами.

Найбільш ймовірна небезпека в ЗВГР, для цивільних та для підрозділів ОРС ЦЗ під час виконання завдань за призначенням, є ураження осколками від вибухонебезпечних предметів (ВНП) та уламками конструктивних елементів, які утворюються під час вибухового руйнування будівель та споруд.

З початку широкомасштабного воєнного вторгнення росії на територію України, від ураження осколками під час ворожих обстрілів загинуло більше 150 працівників ОРС ЦЗ під час виконання дій за призначенням в ЗВГР.

Використання засобів індивідуального бронезахисту до початку широкомасштабного вторгнення росії на території України регламентувалося відповідно до Наказу ДСНС [141], позиції 4 та 5 Норми-17. Табельної належності оснащення та засобів відділення піротехнічних робіт:

бронезжилет - клас захисту 6 або IV рівень захисту, бронешолом (шоломи захисту від куль) - клас захисту 1А або III-А рівень захисту

захисний фартух - клас захисту 2 або рівень балістичного захисту V50 - не менше ніж 450 м/с (STANAG 2920) у комплекті з візором (захисна маска) із рівнем захисту не меншим, ніж той, який забезпечує необроблений полікарбонат товщиною 5 мм і повністю закриває лице та горло.

Але дана норма застосовується виключно для комплектування піротехнічних підрозділів, які залучаються до виконання робіт щодо очищення (розмінування) територій, забруднених вибухонебезпечними предметами, ручним способом [142] у прифронтових територіях.

Пошук ВВП розпочинаються від безпечної смуги. Під час проведення робіт методом електромагнітного сканування ґрунту безпечна смуга може знаходитися на певній відстані від визначеної межі небезпечної території, що дозволяє виявити ВВП поза межами визначеної небезпечної території. Площа території, де проводяться роботи з пошуку вибухонебезпечних матеріалів, може бути збільшена у разі їх виявлення по краях визначеної небезпечної території або додаткового виявлення прямих доказів наявності ВВП. Проведення очищення території обов'язково проводиться у радіусі не менше ніж 25 м від ВВП або прямих доказів щодо їх наявності, виявлених поблизу краю визначеної небезпечної території.

За командою керівника робіт оператор першого детектору, який знаходиться на лівому фланзі, починає рух по своїй робочій смузі. Наступний оператор розпочинає рух по своїй робочій смузі тільки після того, коли відстань між ним та попереднім оператором складає не менше ніж 5 метрів, для максимального виключення взаємної інтерференції детекторів.

Під час використання безпілотних носіїв електромагнітних детекторів, оператори попередньо візуально оцінюють смугу обстеження на предмет можливості руху безпілотних детекторів (наявність ям, сміття, захаращення тощо).

У разі отримання сигналу від детектора оператором проводиться візуальний огляд місця виникнення сигналу. У разі відсутності на місці виявлення сигналу будь-якого ВВП на поверхні ґрунту оператор продовжує

проведення робіт, при цьому маркування місця виявлення сигналу не проводиться. Також для перевірки отриманого сигналу можуть використовуватись інші технічні способи виявлення вибухонебезпечних матеріалів.

Характерні ознаки замаскованих вибухонебезпечних предметів:

- предмет знаходиться в людному місці чи у транспорті без нагляду, ящик, коробка, рюкзак, валіза, сумка, тощо;
- схожа будова на ВНП чи саморобний вибуховий пристрій;
- присутність на виробі мотузок, дротів, ниток, що тягнуться від предмету;
- наявність антен, годинникових або електронних таймерів, акумуляторів чи батарейок;
- присутність не характерних, підозрілих звуків, наприклад цокання годинника, періодичних сигналів);
- підозрілий запах (хімічних речовин чи пального, газу, тощо);
- присутність не характерних деталей, що не призначені для даного предмету;

Для маркування місця, де було виявлено предмет схожий на вибухонебезпечний можна використати наступні підручні засоби:

- купка каміння;
- пакети;
- пляшки;
- тканинні стрічки;
- встромлені палиці;
- інші знаки, перешкоди.

При підтвердженні наявності ВНП оператор проводить оцінку можливості безпечного вилучення ВНП та його транспортування у безпечне місце. У разі прийняття рішення щодо знищення вибухонебезпечного предмета на місці виявлення весь особовий склад з обладнанням та інструментом відводиться на безпечну відстань, за винятком осіб, задіяних

для підготовки підричних робіт. Після проведення знищення ВНП на місці виявлення проводиться пошук і видалення його залишків та осколків, а утворені воронки та траншеї повинні бути засипані.

Перед вилученням виявленого ВНП проводиться його зрушення з місця за допомогою «саперної кішки». Далі проводиться вилучення виявленого ВНП з ґрунту та його перенесення до транспортного засобу або у спеціально визначене місце.

Після закінчення робіт керівник робіт наносить результат проведених робіт на Робочу схему проведення очищення території та складає Акт виконання робіт з очищення місцевості від вибухонебезпечних предметів та Щоденний звіт.

Таким чином розроблені практичні рекомендації при проведенні гуманітарного розмінування території із використання розробленого методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів із забезпеченням належного рівня безпеки особового складу та якості виконання робіт по розмінуванню території.

#### **Висновки до розділу 4.**

1. Розроблено спосіб дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону. Використання запропонованого способу дозволяє підвищити безпеку та ефективність розмінування ВНП за рахунок виключення контакту людини при пошуку ВНП та їх розмінуванні та одночасним опроміненням області можливого встановлення ВНП першим сигналом вертикальної та горизонтальної поляризації, що містять першу множину частот, прийманням зворотних багато частотних сигналів вертикальної та горизонтальної поляризації, що включають щонайменше одну із суми або різниці частот або їх гармоніки, обумовлених взаємодією першого сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації з одним або декількома нелінійними компонентами ВНП та

випромінювання потужного електромагнітного імпульсного сигналу вертикальної та горизонтальної поляризації в напрямку виявленого ВВП на вільній глибині в ґрунті.

2. Розроблено алгоритм реалізації методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів, який складається з 18 функціональних блоків та 3 логічних блоків та алгоритм роботи електромагнітного сканеру виявлення вибухонебезпечних матеріалів. Обидва алгоритми мають циклічну структуру. На основі цих алгоритмів проведено покроковий опис процедури реалізації запропонованого методу дистанційного електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів.

3. Проведено оцінку ефективності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Визначено граничні умови навколишнього середовища при яких використання запропонованого методу дасть мінімальну похибку. Моделювання ймовірності виявлення вибухонебезпечних предметів на різній глибині у ґрунті показало, що при зниженні частоти сканування з 3 ГГц до 1 ГГц достовірна ймовірність визначення предмету розмірами 0,1 м зростає з 0,2 м до 0,5 м відповідно. Аналіз характерної сигнатури часової області симуляції вибухонебезпечних предметів показав, що напрацювання бази даних таких сигнатур дозволить зменшити кількість хибних сигналів.

4. Розроблено функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів на основі цифрового процесору можна Blackfin. Апаратна частина детектору включає випромінюючу та приймаючу антени, блок посилення сигналу, систему автоматичного регулювання посилення, цифро-аналоговий перетворювачі та блок таймінгів. На основі розробленого детектору проведено експериментальну перевірку працездатності методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів різного конструктивного виконання. Результати експерименту повністю підтвердили вплив обводненості ґрунтів, розміру об'єкту

детектування та конструкційних особливостей вибухонебезпечних предметів. Результати аналізу радіолокаційних карт електромагнітного детектування мін ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62 продемонстрували практичну спроможність використання запропонованого методу для виявлення заглиблених мін. Достатня якість детекції для мін ТМ-62 забезпечується на глибинах до 50 см, а для ПМН-2, ПФМ-1 до 20 см.

5. Розроблено практичні рекомендації при проведенні гуманітарного розмінування території із використання розробленого методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів із забезпеченням належного рівня безпеки особового складу та якості виконання робіт по розмінуванню території.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу у галузі цивільної безпеки, а саме: розроблено метод електромагнітного виявлення вибухонебезпечних предметів із низьким вмістом металевих конструкційних елементів в інтересах підвищення рівня цивільної безпеки на деокупованих територіях із значним вмістом вибухонебезпечних предметів різного класу (протитанкові, протипіхотні, саморобні) при проведенні оперативного та гуманітарного розмінування оперативно-рятувальними підрозділами та гуманітарними організаціями різного підпорядкування.

За підсумками виконаної наукової роботи зроблено наступні висновки:

1. Проаналізовано та класифіковано основні методи дистанційного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Кожен з методів відрізняється надійністю виявлення, часом аналізу, автономністю та матеріаловитратністю. Виходячи із порівняння цих характеристик найбільш оптимальними методами для використання оперативно-рятувальними підрозділами при очищенні великої площі місцевості від вибухонебезпечних приладів невідомої конструкції є електромагнітний метод. Показано, що такий метод може бути інтегрований у існуючу нормативно-правову базу та має потенціал до підвищення безпеки та якості проведення робіт із розмінування територій.

2. Встановлено, що найбільшу загрозу становлять капсулі-детонатори, а серед досліджених речовин – тетрил, гексоген, тринітротолуол, фульмінат ртуті, азид та тринітрорезорцинат свинцю. За фізико-хімічними властивостями вибухові матеріали поділяються на два класи: на основі вуглеводневої окислювальної складової та із вмістом важких металів, при цьому густина останніх у 2–4 рази вища, що зумовлює зворотне співвідношення питомих об'ємних параметрів вибуху. Розрахунки дипольних моментів показали, що найбільшу небезпеку при дії електромагнітних хвиль становить тетрил ( $\mu=6,34$  D), тоді як речовини з

симетричною молекулярною структурою (гексоген, ПЕТН, фульмінат ртуті) не проявляють активуючої чутливості ( $\mu=0$  D).

3. Розроблено комплекс електродинамічних та математичних моделей взаємодії електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону з вибухонебезпечними речовинами та предметами різного конструктивного виконання. Показано, що вибухові матеріали з високою діелектричною проникністю, зокрема нітрогліцерин ( $\epsilon=19$ ), ефективно відбивають хвилі, що спрощує їх дистанційне виявлення, тоді як TNT ( $\epsilon\approx 3$ ) поглинає до 96 % енергії, що створює ризик дистанційного підриву. Модель дифракції електромагнітних хвиль на незаглиблених об'єктах виявила залежність частки поглинутої енергії від типу підкладки: TNT на піску поглинає близько 92 %, тоді як на вологій деревині лише  $\sim 67$  %. Розроблена модель дифракції хвиль у багатошарових структурах, що моделюють корпуси мін ПМН-2, ПФМ-1, МОН-90 та ПОМ-3, для яких отримано рівняння еквівалентного хвильового опору та показано залежність коефіцієнтів проходження від дипольного моменту вибухових речовин (варіації у 5–8 разів). Розрахунково-аналітична оцінка підтвердила достовірність і працездатність моделей, зокрема виявлено логарифмічний характер зростання коефіцієнта відбиття з підвищенням діелектричної проникності.

4. Розроблено метод дистанційного детектування вибухонебезпечних предметів електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону, що підвищує безпеку та ефективність розмінування завдяки виключенню прямого контакту людини з ВНП. Метод базується на одночасному опроміненні зони можливого розташування ВНП сигналами вертикальної та горизонтальної поляризації з множиною частот, прийманні зворотних багаточастотних сигналів та аналізі їх спектральних складових, зумовлених взаємодією з нелінійними компонентами вибухонебезпечних предметів. Для реалізації запропонованого підходу створено алгоритм, що включає 18 функціональних і 3 логічні блоки, а також розроблено алгоритм роботи електромагнітного сканера, на основі яких описано покрокову процедуру дистанційного

виявлення ВВП. Проведено оцінку ефективності методу в різних умовах: показано, що зниження частоти сканування з 3 до 1 ГГц підвищує ймовірність достовірного визначення об'єкта розміром 0,1 м на глибині від 0,2 до 0,5 м. Експериментальна перевірка підтвердила вплив обводненості ґрунтів, розміру та конструкції ВВП на результативність методу. На основі отриманих результатів розроблено практичні рекомендації для гуманітарного розмінування з використанням запропонованого методу із забезпеченням належної безпеки особового складу та високої якості виконання робіт.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рудакевич І. Географічні аспекти забруднення території України вибухонебезпечними предметами. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія «Географія». 2023. Т. 55, № 2. С. 81—88. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.2.10>
2. Ragimov S., Sobyna V., Vambol S., Vambol V., Feshchenko A., Zakora A., Strejekurov E., Shalomov V. Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. Vol. 91, № 1. P. 27–33. DOI: 10.5604/01.3001.0012.9654
3. 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
4. Melnichenko A., Kustov M., Basmanov O., Karatieieva O., Shevchuk N. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 1 (10-115). P. 31–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.251675
5. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., Meleshchenko R., Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4/10 (106). P. 37–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210059
6. Prem M., Purroy M. E., Vargas J. F. Landmines: The Local Effects of Demining. TSE Working Paper. 2022. No. 22-1305. URL: <https://publications.ut->

capitole.fr/id/eprint/44388/

7. Dorn A. W. Eliminating Hidden Killers: How Can Technology Help Humanitarian Demining? *Stability: International Journal of Security and Development*. 2019. Vol. 8, № 1. P. 5. DOI: 10.5334/sta.743

8. Hutsa O., Yelchaninov D., Yanushkevych D., Tolkunov I., Ivanov L., Petrova R., Morozova A. Conceptualization of Intelligent Control System for Humanitarian Demining Robotic Complexes Based on Verbal Methods. *Science and Innovation*. 2024. No. 20(3). P. 82–95. DOI: 10.15407/scine20.03.082

9. Ustymenko V., Rohozian Y., Trehub O., Liashenko P., Zablodska D. Economic and Legal Dimension of Humanitarian Demining of Ukraine. *Amazonia Investiga*. 2023. № 12(65). P. 287–295. DOI: 10.34069/AI/2023.65.05.27

10. Невлюдов І. Ш., Янушкевич Д. В., Толкунов І. О., Попов І. І., Іванець Г. В. Обґрунтування необхідності створення робототехнічних комплексів для гуманітарного розмінування. Проблеми надзвичайних ситуацій. Серія «Civil Security». 2023. Вип. 2(38). Харків: НУЦЗУ. С. 5—12. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-38-2

11. Williams D. P., Myers V., Silvius M. S. Mine Classification With Imbalanced Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2009. Vol. 6, No. 3. P. 528–532. DOI: 10.1109/LGRS.2009.2021964

12. Armstrong R. W., Elban W. L. Materials science and technology aspects of energetic (explosive) materials. *Materials Science and Technology*. 2006. Vol. 22, No. 4. P. 381–395. DOI: 10.1179/174328406X84049.

13. Daniels D. J. An Assessment of the Fundamental Performance of GPR against Buried Landmines. In: *SPIE Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XII*, Paper 6553-16. SPIE, 2007. April 13, 2006, Orlando, Florida.

14. 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, No. 8. P. 2560–2572. DOI: 10.1109/TGRS.2007.900993

15. Mikulic D. Design of Demining Machines. London: Springer, 2013. P. 73–152. DOI: 10.1007/978-1-4471-4504-2\_5
16. 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
17. Кустов М., Карпов А. 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. Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 2 (38). С. 39–52. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-38-3
19. 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. 2024. № 1 (39). С. 81–95. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-6
20. Karpov A., Kustov M., Basmanov O., Kulakov O. Investigation of diffraction of electromagnetic microwaves on explosive materials. Advances in Science and Technology. International Scientific Applied Conference “Problems of Emergency Situations”. Vol. 156. Trans Tech Publications Ltd., 2024. P. 91–102. DOI: 10.4028/p-cg2mbv
21. Карпов А. А., Кустов М. В., Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 2 (40). С. 57–71. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-5
22. Карпов А. А., Кустов М. В., Корнієнко Р. В., Іваненко О. О., Шаріпова Д. С. Експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2025. № 1 (41). С. 50–61.
23. Kustov, M., Karpov, A., Zimin, S., Strelec, V. Development of an

Electromagnetic Detection Method for Explosive Materials. In *Advances in Science and Technology. International Scientific Applied Conference "Problems of Emergency Situations"*. Vol. 170. Trans Tech Publications Ltd, 2025. P. 153–162. <https://doi.org/10.4028/p-mbumyw>

24. Карпов А. А., Кустов М. В. Класифікація способів виявлення вибухонебезпечних предметів та речовин. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів: ЛДУ БЖД, 2022. С. 428–430.

25. Карпов А. А., Кустов М. В. Сучасні способи виявлення вибухонебезпечних предметів. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: матеріали круглого столу. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 40–41.

26. Карпов А. А., Кустов М. В. Аналіз існуючих технічних способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 269–271.

27. Кустов М., Карпов А. Перспективні засоби дистанційного розмінування : матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2022. С. 215–216.

28. Карпов А. А., Кустов М. В. Аналіз матеріалів вибухонебезпечних предметів : матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 178–179.

29. Карпов А. А., Кустов М. В., Männig D. Аналіз небезпеки вибухонебезпечних предметів. *Problems of Emergency Situations*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 233–234.

30. Карпов А. А. Технічні засоби дистанційного розмінування:

матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням». Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 137–138.

31. Karpov A., Kustov M. Modern explosive object detection technologies. Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference. Bordeaux, France, 2022. Pp. 402–404. URL: <https://eu-conf.com/ua/events/youth-education-and-science-through-today-s-challenges>

32. Kustov M., Buscham C., Karpov A. Methods of detection of explosive substances : матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 159–160.

33. Карпов А. А., Кустов М. В., Басманов О. Є., Кулаков О. В. Перспективні технології та методики пошуку вибухонебезпечних матеріалів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 183–184.

34. Карпов А. А., Кустов М. В. Використання надвисокочастотного випромінювання для підвищення ефективності розмінування. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 160.

35. Карпов А. А., Кустов М. В. Перспективна технологія розмінування : матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 406.

36. Карпов А. А., Кустов М. В. Підвищення ефективності відновлення земельного фонду замінованих територій України: Екологічна безпека в умовах війни: матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 136.

37. Карпов А. А., Кустов М. В. Роль піротехнічних технологій у забезпеченні безпеки та відновленні територій: Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах

сьогодення: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 187–188.

38. Кустов М. В., Карпов А. А., Яужева О. О. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних матеріалів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Черкаси: НУЦЗУ, 2025. С. 247–248.

39. Карпов А. А., Кустов М. В. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних речовин: матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: НУЦЗУ, 2025. С. 60–61.

40. Кустов М. В., Поспелов Б. Б., Карпов А. А., Веретеннікова Ю. А. Спосіб дистанційного розмінування: пат. 155245 Україна: F42D 5/04. — № и 2023 03960; заявл. 21.08.2023; опубл. 01.02.2024, Бюл. № 5.

41. Rohozian Yu. The impact of the cost of demining on the trajectory of socio-economic systems recovery in the post-conflict period. *Economics of System Development*. 2024. Vol. 6, No. 1. P. 54–59. DOI: 10.32782/2707-8019/2024-1-13.

42. Rohozian Y., Sieriebriak K., Akhromkin Y., Plietnov M., Vakhlakova V. International Determinants of Demining Territories in the Context of Sustainable Development: Economic Projection. *Problemy Ekorozwoju*. 2024. Vol. 19, No. 2. P. 203–214. DOI: 10.35784/preko.6202

43. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2/9 (86). P. 32–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96694

44. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S., Shcherbak S. Results of experimental research into correlations between hazardous factors of ignition of materials in premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6/10 (90). P. 50–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.117789

45. Lesko A., Kulakov O., Roianov O., Katunin A. Intensity of Neutralization of Dangerous Gases during Deposition with Small-Dispersion Water. *Advances in Science and Technology*. 2025. Vol. 170. P. 17–25. DOI: 10.4028/p-z8MsON. URL: <https://www.scientific.net/AST.170.17>

46. 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. Vol. 1 (163). P. 99–105. DOI: 10.29202/nvngu/2018-1/7

47. Kulakov O., Katunin A., Kustov M., Slepuzhnikov E., Rudakov S. Investigation of Reliability of Emergency Shutdown of Consumers in Electric Power Systems of Explosive Hazardous Zones. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 173–177.

48. Popov O., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Pomaza-Ponomarenko A. Emergencies at Potentially Dangerous Objects Causing Atmosphere Pollution: Peculiarities of Chemically Hazardous Substances Migration. In: Babak V., Isaienko V., Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 298. P. 151–163. 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-48583-2\_10

49. Rybalova O., Artemiev S., Sarapina M., Tsymbal B., Bakhareva A., Shestopalov O., Filenko O. Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2/10 (92). P. 4–17. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.127829

50. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Conceptual approaches for development of informational and analytical expert system for assessing the NPP impact on the environment. *Nuclear and Radiation Safety*. 2018. № 3 (79). C. 56–65. DOI: 10.32918/nrs.2018.3(79).09

51. Liu Z. Review and Prospect of Thermal Analysis Technology Applied to Study Thermal Properties of Energetic Materials. *FirePhysChem*. 2021. Vol. 1, No.

3. P. 129–138. DOI: 10.1016/j.fpc.2021.05.002

52. Xia W., Ma C., Liu J., Liu S., Chen F., Yang Z., Duan J. High-Resolution Remote Sensing Imagery Classification of Imbalanced Data Using Multistage Sampling Method and Deep Neural Networks. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, Article 2523. DOI: 10.3390/rs11212523

53. Palka N., Szala M., Czerwinska E. Characterization of prospective explosive materials using terahertz time-domain spectroscopy. *Applied Optics*. 2016. Vol. 55, No. 17. P. 4575–4583. DOI: 10.1364/AO.55.004575

54. Yilmaz C., Kahraman H.T., Söyler S. Passive mine detection and classification method based on hybrid model. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 47870–47888. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2866538

55. Janssen T.J. Explosive materials: Classification, composition and properties. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, Inc., 2011. 292 p.

56. 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, No. 9. P. 3175. DOI: 10.3390/s21093175

57. World Health Organization. Strategic toolkit for assessing risks: a comprehensive toolkit for all-hazards health emergency risk assessment. Geneva: World Health Organization, 2021. 71 p. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240036086>

58. Smoliło J., Chmiela A. The mine liquidation processes in SRK S.A. in a cost approach. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Organizacji i Zarządzanie*. 2021. Vol. 153. P. 429. DOI: 10.29119/1641-3466.2021.153.30

59. Ahmed I. Anti-personnel landmines (APLs): A socio-economic and humanitarian perspective. *International Journal of Physical and Social Sciences*. 2014. Vol. 4, No. 4. P. 99–112. URL: <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijpss&volume=4&issue=4&article=010>

60. Chiovelli G., Michalopoulos S., Papaianou E. Landmines and Spatial Development. *Econometrica*. 2025. Vol. 93. P. 1739–1778. DOI:

10.3982/ECTA17951

61. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian Demining for the Clearance of Landmine-Affected Areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 88. Article No. 101611. DOI: 10.1016/j.seps.2023.101611

62. Rubio M. D., Zeng S., Wang Q., Alvarado D., Moreno Rivera F., Heidari H., Fang F. RELand: Risk Estimation of Landmines via Interpretable Invariant Risk Minimization. *ACM Journal on Computing and Sustainable Societies*. 2024. Vol. 2, No. 2. Article 23. 29 p. DOI: 10.1145/3648437

63. Behera R., Biswal T., Panda R. Recent Progress in Explosives: A Brief Review. In: *Current Advances in Mechanical Engineering*. Singapore: Springer, 2021. P. 305–315. DOI: 10.1007/978-981-33-4795-3\_29

64. Zapata F., García-Ruiz C. Chemical classification of explosives. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2021. Vol. 51, No. 7. P. 656–673. DOI: 10.1080/10408347.2020.1760783

65. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26.04.2018 № 340 : станом на 10 лип. 2018 р. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України за № 801/32253. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/340-2018>

66. Заходи безпеки під час розмінування : СОП 10.10-40/ДСНС : Наказ ДСНС України від 26.06.2019 № 375 : станом на 04.12.2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1125-19>

67. Барбашин В. В., Назаров О. О., Рютін В. В. Основи організації піротехнічних робіт. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2010. 353 с. URL: <http://eprints.kname.edu.ua/46622/1/%D0%9D%D0%9F%D0%9E%D0%9E%D0%9F%D0%A0.pdf>

68. Іщенко А. В., Кобець М. В. Засоби і методи виявлення вибухових речовин та пристроїв у боротьбі з тероризмом. Київ: Національна академія внутрішніх справ України, 2005. 148 с.

URL: <http://elar.naiu.kiev.ua/bitstream/123456789/18996/1/Kobets%20M.V.%20Zasoby%20i%20metody%20vyaiyvlenaiy%20VP.pdf>

69. Hutsul T., Khobzei M., Tkach V., Krulikovskiy O., Moisiuk O., Ivashko V., Samila A. Review of Approaches to the Use of Unmanned Aerial Vehicles, Remote Sensing and Geographic Information Systems in Humanitarian Demining: Ukrainian Case. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 7. Article e29142. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29142

70. Buryakov I. Detection of explosives by ionmobility spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*. 2011. No. 66(8). DOI: 10.1134/S1061934811080077

71. Kagan A. Counterterrorist detection techniques of explosives by vapor sensors (handheld). In: *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives*. 2022. P. 235–251. DOI: 10.1016/B978-0-444-64104-5.00012-6

72. Clifford E. T., Ing H., McFee J. E., Cousins T. High rate counting electronics for a thermal neutron analysis land mine detector. In: *Penetrating Radiation Systems and Applications*. 1999. Vol. 3769. P. 155–166. DOI: 10.1117/12.363677

73. Gaft M., Nagli L. UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. *Optical Materials*. 2008. Vol. 30, No. 11. P. 1739–1746. DOI: 10.1016/j.optmat.2007.11.013

74. Sun W., Liu S., Wang M., Zhang X., Shang K., Liu Q. Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 860. Article 160511. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.160511

75. Horvath T. Emergency Cases at Countering Improvised Explosive Devices (C-IED), and their Potential Management. *Land Forces Academy Review*. 2019. Vol. 24, No. 2. P. 95–106. URL:

[https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2\\_2019/Horvath\\_RAFT\\_2\\_2019.pdf](https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2_2019/Horvath_RAFT_2_2019.pdf)

76. Kabessa Y., Eyal O., Bar-On O., Korouma V., Yagur-Kroll S., Belkin S., Agranat A. J. Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. *Biosensors and Bioelectronics*. 2016. Vol. 79. P. 784–788. DOI: 10.1016/j.bios.2016.01.011

77. Shimoi N., Takita Y. Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot RAT-1. In: *ICCAS 2010*. 2010. P. 622–626. DOI: 10.1109/ICCAS.2010.5669836

78. Wynn C. M., Palmacci S., Kunz R. R., Rothschild M. A novel method for remotely detecting trace explosives. *Lincoln Laboratory Journal*. 2008. Vol. 17, No. 2. P. 27–39. URL: <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/novel-method-remotely-detecting-trace-wynn-ja-14525.pdf>

79. Cardona L., Jiménez J., Vanegas N. Landmine detection technologies to face the demining problem in Antioquia. *Dyna*. 2014. Vol. 81, No. 183. P. 115–125. DOI: 10.15446/dyna.v81n183.37441

80. Sato M., Kikuta K., Chemyak I. Dual Sensor «ALIS» for Humanitarian Demining. In: *2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICGPR.2018.8441662

81. Schultz G. M., Keranen J., Miller J. S., Shubitidze F. Acquisition and processing of advanced sensor data for ERW and UXO detection and classification. In: *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIX*. 2014. Vol. 9072. P. 112–120. DOI: 10.1117/12.2050876

82. Yinon J. Field detection and monitoring of explosives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 21, No. 4. P. 292–301. DOI: 10.1016/S0165-9936(02)00408-9

83. Habib M. K. Humanitarian Demining: Reality and the Challenge of Technology – The State of the Arts. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. Vol. 4, No. 2. DOI: 10.5772/5699

84. Pakhnuts I., Khrustalova S., Khrustalev K. System for detection and

identification of potentially explosive objects in open area. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2022. Vol. 2, No. 20. P. 106–112. DOI: 10.30837/ITSSI.2022.20.106

85. Montes H., Mena L., Fernández R., Sarria J., Armada M. Inspection platform for applications in humanitarian demining. In: *ASSISTIVE ROBOTICS: Proceedings of the 18th International Conference on CLAWAR 2015*. 2016. P. 446–453. DOI: 10.1142/9789814725248\_0055

86. De Cubber G., Balta H., Lietart C. Teodor: A semi-autonomous search and rescue and demining robot. In: *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 658. P. 599–605. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.658.599

87. Akmalov A. E., Chistyakov A. A., Dubkova O. I., Kotkovskii G. E., Spitsyn E. M., Buzinov N. M. Laser desorption of explosives traces at ambient conditions. In: *Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence XII*. 2016. Vol. 9995. P. 110–116. DOI: 10.1117/12.2241813.

88. Danchenko Y., Andronov V., Barabash E., Obigenko T., Rybka E., Meleshchenko R., Romin A. Research of the intramolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, No. 12–90. P. 4–12. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.118565

89. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708. P. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

90. Shabanova G. N., Korohodska A. N., Kustov M. V., Ivashchenko M. Y., Taraduda D. V. Barium-containing cement and concrete for protection against electromagnetic radiation. *Functional Materials*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 323–326. DOI: 10.15407/fm28.02.323

91. Kustov M. V., Kalugin V. D., Deineka V. V., Slepuzhnikov E. D., Deyneka D. M. Radioprotective cement for long-term storage of nuclear waste. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2020. No. 2. P. 73–81. DOI:

10.32434/0321-4095-2020-129-2-73-81

92. 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.

93. Marsh L. A., Verre W. Combining electromagnetic spectroscopy and ground-penetrating radar for the detection of anti-personnel landmines. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 15. P. 3390. DOI: 10.3390/s19153390

94. Onodera T. *Biochemical Sensors*. 2013. P. 351. DOI: 10.1201/b15650-26.

95. Jain S., Jain S., Jain G. Traffic congestion modelling based on origin and destination. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 442–450. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.398

96. 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, No. 4. P. 269–277. DOI: 10.1016/j.scijus.2016.03.002

97. Hemapala M., Huseyin C. Robots operation in hazardous environment. In: *IntechOpen*. Croatia, 2017. P. 140. DOI: 10.5772/65992

98. 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, No. 1. P. 35. DOI: 10.1587/transele.E101.C.35

99. Ekenberg L., Fasth T., Larsson A. Hazards and quality control in humanitarian demining. *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2018. Vol. 35, No. 4. P. 897–913. DOI: 10.1108/IJQRM-01-2016-0012

100. 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, No. 11–12. P. 504–512. DOI: 10.1515/mt-2003-0004.

101. Ramezani M., Tafazoli S. Using artificial intelligence in mining

excavators: automating routine operational decisions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 6–11. DOI: 10.1109/MIE.2020.2964053

102. Daniels D. A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging*. 2006. Vol. 7, No. 3. P. 90–123. DOI: 10.1007/s11220-006-0024-5

103. Krivtsun V., Nanivska L. Factors affecting the demining process. *Social Development and Security*. 2023. Vol. 13, No. 5. P. 38–44. DOI: 10.33445/sds.2023.13.5.5

104. Zhao Y., Hao L., Zhang X., Tan S., Li H., Zheng J., Ji G. A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect. *Small Sci*. 2022. Vol. 2. Article 2100077. DOI: <https://doi.org/10.1002/smsc.202100077>

105. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of continuous media*. Translated by J. B. Sykes and J. S. Bell. Boston: Addison-Wesley, 1960. 496 p.

106. He M., Liu H., Fang Z., He B., Li B. High-temperature and thermal radiation affecting human thermal comfort and physiological responses: An experimental study. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 86. Article 108815. ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108815>

107. Akram E., Adnan A., Al Ani A., Yousif E. *Chemistry of Explosives: Explosive Materials, Mechanics, Testing Method and Identification Techniques*. *Journal of Chemistry Letters*. 2024. Vol. 5, No. 2. P. 120–127. ISSN 2821-0123. DOI: <https://doi.org/10.22034/jchemlett.2024.449675.1173>

108. Chatterjee S., Deb U., Datta S., Walther C., Gupta D. K. Common explosives (TNT, RDX, HMX) and their fate in the environment: Emphasizing bioremediation. *Chemosphere*. 2017. Vol. 184. P. 438–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.008>

109. Zhou Sh., Gao J., Luo Zh., Hu Sh., Wang L., Wang T. Role of ferromagnetic metal velvet and DC magnetic field on the explosion of a C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>/air mixture-effect on reaction mechanism. *Energy*. 2022. Vol. 239(C). Art. 122218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122218>

110. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Electrodynamics of continuous media*:

translated by Sykes J. B., Bell J. S., Kearsley M. J. Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt: Pergamon Press, 2013. 475 p.

111. Greiner W. *Classical Electrodynamics (Classical Theoretical Physics)*. Dordrecht: Springer, 1998. 566 p.

112. Okress E. C. (ed.). *Microwave power engineering*. 3 vol. New York; London: Academic Press, 1968.

113. Zhou Q., Yao X., Hu J. Study on the propagation characteristic of electromagnetic wave based on WUSN. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, Vol. 35, № 13, P. 1708–1718. DOI: 10.1080/09205071.2021.1915882

114. Rahmani-Andebili M. Problems: Transmission Line Model and Performance. In: *Power System Analysis*. Springer, Cham, 2022, P. 53–57. DOI: 10.1007/978-3-030-84767-8\_5.

115. Kolcunová I., Pavlík M., Beňa L., Čonka Z., Ilenin S., Kanálik M., ... Zbojovský J. Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material. *Acta Physica Polonica A*, 2017, Vol. 131(4), P. 1135–1137. DOI: 10.12693/APhysPolA.131.1135

116. Li S. Study on Ground-Penetrating Radar (GPR) Application in Pavement Deep Distress Detection. *Chengchao Guo Journal of Transportation Technologies*, 2019, Vol. 9(2), P. 18. DOI: 10.4236/jtts.2019.92015

117. Frank J. W. P., Anthony J. P., David W. A. GPR combined with a positioning system to detect anti-personnel landmines. 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2015, P. 1–4. DOI: 10.1109/IWAGPR.2015.7292660

118. Elsheakh D. M. Linear/circular polarizations slot antennas for millimeter wave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2017, Vol. 59(4), P. 976–983. DOI: 10.1002/mop.30435

119. Indelicato A. The Impact of Frequency in Surveying Engineering Slopes Using Ground Penetrating Radar. *International Journal of Geosciences*,

2017, Vol. 8(3), P. 296–304. DOI: 10.4236/ijg.2017.83014

120. Saranya S., Sudha G., Rithika B., Alagappan A., Sanjeev D. Ground Penetrating Radar For Identifying Mines In A Minefield. In 2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), IEEE, 2024, P. 1–5. DOI: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780419

121. Abufares L., Chen Y., Al-Qadi I. L. Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR. *Automation in Construction*, 2025, Vol. 174, Article 106158. DOI: 10.1016/j.autcon.2025.106158

122. Liu Y., Zhang Z., Yuan Y., Zhu Y., Wang K. Quantitative Evaluation of Internal Pavement Distresses Based on 3D Ground Penetrating Radar. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2025, Vol. 20, № 1, P. 45–69. DOI: 10.7250/bjrbe.2025-20.653

123. Cui L., Li L., Zhang W., Sun F., Fan D., Zhang H. Advances of deep learning application in qualitative and quantitative detection of road subsurface distress using ground penetrating radar: A review. *Measurement*. 2025. Vol. 247. Article 116760. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117007.

124. Wang W., Du W., Cheng S., Zhuo J. Numerical Simulation Study on the Impact of Blind Zones in Ground Penetrating Radar. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4. Article 1252. DOI: 10.3390/s25041252.

125. Lambot S., Wu K., Sluÿters A., Vanderdonckt J. The Full-Wave Radar Equation for Wave Propagation in Multilayered Media and Its Applications. *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*. 2024. P. 123–160. DOI: 10.1002/9781394284405.ch5.

126. Sainson S., Sainson L., Sainson S. *Electromagnetic seabed logging*. Springer International Publishing, 2017. Vol. 19. P. 1–536. DOI: 10.1007/978-3-319-45355-2.

127. Melvin A. Seismic surface wave process for the remote clearance of anti-personnel land mines: patent GB № 2 335 166, F41H 11/12 A / Alec Melvin (UK). – № 9805171.7; filed 12.03.1998; published 15.09.1999.

128. Henry M., O'Neill W. Apparatus for remotely applying sound pressure to a target: patent GB № 2 468 546, F41H 11/12 / Matthew Henry (UK), William O'Neill (UK). – № 0904452.0; filed 13.03.2009; published 15.09.2010.
129. Schultz E. M., Curry R. D., Nikseh R. A. Explosive device countermeasures: patent US № 7 987 068 B2, G01R 23/02 / Eugene M. Schultz (US), Randy D. Curry (US), Richard A. Nikseh (US); assignee The Boeing Company (US) and The University of Missouri (US). – № 12/411,025; filed 25.03.2009; published 26.07.2011.
130. Habib M. K. Humanitarian Demining: Difficulties, Needs and the Prospect of Technology: 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2008. – P. 213–218. DOI: 10.1109/ICMA.2008.4798754.
131. Dresner J., Labianco R. Humanitarian principles and humanitarian disarmament: An operator's perspective. *International Review of the Red Cross*. 2024. Vol. 106, № 925. P. 242–268. DOI: 10.1017/S1816383124000055.
132. Hassan M. I., Ahmat D., Ouya S. Technologies Behind the Humanitarian Demining: A Review. 2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking (SmartNets), Harrisonburg, VA, USA, 2024. P. 1–7.
133. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian Demining for the Clearance of Landmine-Affected Areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 88. Article No. 101611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>
134. Mahmood S., Scharoba S., Schorlemer J., Schulz C., Hübner M., Reichenbach M. Detecting improvised land-mines using deep neural networks on GPR image dataset targeting FPGAs. In: 2022 IEEE Nordic Circuits and Systems Conference (NorCAS). 2022. P. 1–7.
135. Gao X., Podd J. W., Daniels D. J., Peyton A. J. Combining Electromagnetic Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar for the Detection of Anti-Personnel Landmines. *Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 3390.

136. Machado Brito-da-Costa A., Martins D., Rodrigues D., Fernandes L., Moura R., Madureira-Carvalho Á. Ground penetrating radar for buried explosive devices detection: a case studies review. *Australian Journal of Forensic Sciences*. 2022. Vol. 54, No. 4. P. 559–578. DOI: 10.1080/00450618.2020.1865453.
137. Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., de Smet T. S. Applying Deep Learning to Automate UAV-Based Detection of Scatterable Landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 5. Article 859. DOI: 10.3390/rs12050859.
138. Firoozabadi R., Miller E. L., Rappaport C. M., Morgenthaler A. W. Sub-surface sensing of buried objects under a randomly rough surface using scattered electromagnetic field data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. Vol. 45, No. 1. P. 93–104.
139. Cirillo F., et al. Desk-Aid: Humanitarian aid desk assessment with geospatial AI for predicting landmine areas. *arXiv preprint arXiv:2405.09444*. 2024.
140. Colreavy-Donnelly S., Caraffini F., Kuhn S., Gongora M., Florez-Lozano J., Parra C. Shallow buried improvised explosive device detection via convolutional neural networks. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2020. Vol. 27, No. 4. P. 403–416. DOI: 10.3233/ICA-200638.
141. Про внесення змін до Норм табельної належності, витрат і термінів експлуатації пожежно-рятувального, технологічного і гаражного обладнання, інструменту, індивідуального озброєння та спорядження, ремонтно-експлуатаційних матеріалів підрозділів ДСНС України : Наказ ДСНС України від 24.02.2020 № 157.
142. Про затвердження СОП 09.10/ДСНС «Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) територій, забруднених вибухонебезпечними предметами, ручним способом»: Окреме доручення ДСНС України від 04.09.2019 № В-127.

## **ДОДАТОК А**

### **Список публікацій за темою дисертації**

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

1. Кустов М., **Карпов А.** Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2023. № 1(37). С. 4–17.

2. Кустов М. В., Кулаков О. В., **Карпов А. А.**, Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2023. № 2 (38). С. 39–52.

3. 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. Харків : НУЦЗ України, 2024. № 1(39). С. 81–95. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-39-6.

4. **Карпов А. А.**, Кустов М. В., Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Черкаси: НУЦЗ України, 2024. № 2(40). С. 57-71.

5. **Карпов А.А.**, Кустов М.В., Корнієнко Р.В., , Іваненко О.О., Шаріпова Д.С. Експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2025. № 1 (41). С. 50–61.

**Статті у наукових періодичних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus:**

6. 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: <https://doi.org/10.4028/p-0h8ung>

7. **Karpov A.**, Kustov M., Basmanov O., Kulakov O. Investigation of diffraction of electromagnetic microwaves on explosive materials. *Advances in Science and Technology. International Scientific Applied Conference “Problems of Emergency Situations”*. Vol. 156. Trans Tech Publications Ltd., 2024. P. 91–102. <https://doi.org/10.4028/p-cg2mbv>

8. Kustov, M., **Karpov, A.**, Zimin, S., Strelec, V. Development of an Electromagnetic Detection Method for Explosive Materials. In *Advances in Science and Technology. International Scientific Applied Conference “Problems of Emergency Situations”*. Vol. 170. Trans Tech Publications Ltd, 2025. P. 153–162. <https://doi.org/10.4028/p-m6umyw>

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

9. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Класифікація способів виявлення вибухонебезпечних предметів та речовин. Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Львів : ЛДУ БЖД, 2022. С. 428–430.

10. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Сучасні способи виявлення вибухонебезпечних предметів. Об’єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням : матеріали круглого столу. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 40–41.

11. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Аналіз існуючих технічних способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів. Проблеми пожежної безпеки 2022 (Fire Safety Issues 2022): матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗУ, 2022. С. 269–271.

12. Кустов М., **Карпов А.** Перспективні засоби дистанційного розмінування: матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»: Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗУ, 2022. С. 215-216.

13. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Аналіз матеріалів вибухонебезпечних предметів: матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню

надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків»: Харків: НУЦЗУ, 2023. С. 178-179.

14. **Карпов А.А.**, Кустов М.В., Männig D. Аналіз небезпеки вибухонебезпечних предметів. Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2023. С. 233-234.

15. **Карпов А. А.** Технічні засоби дистанційного розмінування: матеріали круглого столу «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням». : – Харків : НУЦЗУ, 2023. С 137-138.

16. **Karpov A.**, Kustov M. Modern explosive object detection technologies. Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference. Bordeaux, France, 2022. Pp. 402–404. URL: <https://eu-conf.com/ua/events/youth-education-and-science-through-today-s-challenges>.

17. Kustov M., Buscham C., **Karpov A.** Methods of detection of explosive substances: матеріали круглого столу (вебінару) «Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 159–160.

18. **Карпов А. А.**, Кустов М. В., Басманов О. Є., Кулаков О. В. Перспективні технології та методики пошуку вибухонебезпечних матеріалів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Харків: НУЦЗУ, 2024. С. 183–184.

19. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Використання надвисокочастотного випромінювання для підвищення ефективності розмінування. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 160.

20. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Перспективна технологія розмінування: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків : НУЦЗУ, 2024. С. 406.

21. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Підвищення ефективності відновлення земельного фонду замінованих територій України: Екологічна безпека в умовах війни: Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції. Львів: ЛДУБЖД, 2024. С. 136.

22. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Роль піротехнічних технологій у забезпеченні безпеки та відновленні територій: Актуальні проблеми пожежної безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям в умовах сьогодення : Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 187–188.

23. Кустов М. В., **Карпов А. А.**, Яужева О. О. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних матеріалів : Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of emergency situations». Черкаси : НУЦЗУ, 2025. С. 247–248.

24. **Карпов А. А.**, Кустов М. В. Електромагнітний метод виявлення вибухонебезпечних речовин: Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси: НУЦЗУ, 2025. С. 60–61.

**Патент:**

25. Кустов М. В., Поспелов Б. Б., **Карпов А. А.**, Веретеннікова Ю. А. Спосіб дистанційного розмінування: пат. 155245 Україна : F42D 5/04. — № u 2023 03960; заявл. 21.08.2023; опубл. 01.02.2024, Бюл. № 5.

## **ДОДАТОК Б**

### **Акти впровадження результатів досліджень**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки

начальника Міжрегіонального центру

гуманітарного розмінування та швидкого

реагування Державної служби України

з надзвичайних ситуацій

(посада)

Віктор ПУДРОВСЬКИЙ

(ПІБ)

06 2025 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

КАРПОВА Артема Андрійовича

Комісія в складі:

Голови комісії: заступника начальника центру з гуманітарного  
розмінування та оперативного реагування

(посада)

ФЕДОРЦОВА Владислава Григорійовича;

(ПІБ)

Членів комісії: начальника відділу консультативно - методичного  
супроводу робіт з розмінування та освіти

(посада)

ГЛАЗУНА Петра Петровича;

(ПІБ)

заступника начальника загону гуманітарного розмінування  
та піротехнічних робіт

(посада)

КРАСНОПЬОРОВА Анатолія Миколайовича

(ПІБ)

склала даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження  
КАРПОВА Артема Андрійовича у вигляді методу електромагнітного  
детектування вибухонебезпечних предметів та опису можливостей існуючих  
систем дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів, були  
впроваджені в практичну діяльність Міжрегіонального центру гуманітарного  
розмінування та швидкого реагування Державної служби України  
з надзвичайних ситуацій

(назва підрозділу)

Це дозволило підвищити ефективність проведення робіт з розмінування території та підвищити безпеку роботи підрозділів ДСНС України при поводженні з вибухонебезпечними предметами.

Акт не є підставою для отримання КАРПОВИМ Артемом премій та інших винагороди з фондів Міжрегіонального центру гуманітарного розмінування та швидкого реагування Державної служби України з надзвичайних ситуацій за використання результатів його конкурсної роботи.

Голова комісії:

Заступник начальника центру  
з гуманітарного розмінування  
та оперативного реагування

(посада)

(підпис)

Владислав ФЕДОРЦОВ

(ПІБ)

Члени комісії:

Начальник відділу консультативно  
- методичного супроводу робіт  
з розмінування та освіти

(посада)

(підпис)

Петро ГЛАЗУН

(ПІБ)

Заступник начальника загону  
гуманітарного розмінування  
та піротехнічних робіт

(посада)

(підпис)

Анатолій КРАСНОПЬОРОВ

(ПІБ)

«04» 06 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки  
начальника Чугуївського РУ ГУ  
ДСНС України у Харківській області



Віталій БОНДАРЕНКО

«04» 04 2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

КАРПОВА Артема Андрійовича

Комісія в складі:

Голови комісії: тимчасово виконуючий обов'язки начальника  
Чугуївського РУ ГУ ДСНС України у Харківській області Віталій  
БОНДАРЕНКО

членів комісії:

- головний фахівець відділу цивільного захисту та організації  
наглядово-профілактичної роботи Чугуївського РУ ГУ ДСНС України у  
Харківській області Наталя РОГУЛЯ;

- провідний фахівець відділу цивільного захисту та організації  
наглядово-профілактичної роботи Чугуївського РУ ГУ ДСНС України у  
Харківській області Вікторія АНТОНЮК

склала даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження  
КАРПОВА Артема Андрійовича у вигляді систематизації існуючих методів  
та способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів та  
детального опису електромагнітного методу, були впроваджені в практичну  
діяльність Чугуївського РУ ГУ ДСНС України у Харківській області.

Це дозволило підвищити ефективність проведення робіт з розмінування території та підвищити безпеку роботи підрозділів ДСНС України при поводженні з вибухонебезпечними предметами.

Акт не є підставою для отримання КАРПОВИМ Артемом премій та інших винагороди з фондів ГУ ДСНС України у Харківській області за використання результатів його конкурсної роботи.

Голова комісії:

Тимчасово виконуючий обов'язки

начальника Чугуївського РУ

ГУ ДСНС України у Харківській області



Віталій БОНДАРЕНКО

Члени комісії:

Головний фахівець відділу цивільного захисту

та організації наглядово-профілактичної роботи

Чугуївського РУ ГУ ДСНС України

у Харківській області



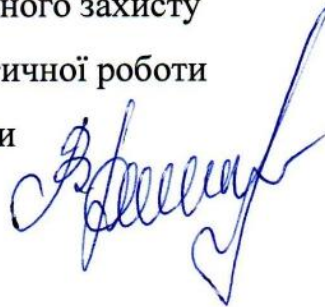
Наталя РОГУЛЯ

Провідний фахівець відділу цивільного захисту

та організації наглядово-профілактичної роботи

Чугуївського РУ ГУ ДСНС України

у Харківській області



Вікторія АНТОНЮК

«04» 04 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор науково-дослідного  
лабораторно-експериментального  
Центру ТОВ «Бранд Трейд»

«20» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Володимир Іванов



АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи  
КАРПОВА Артема Андрійовича**

Комісія у складі голови – старшого наукового співробітника науково-дослідного лабораторно-експериментального центру ТОВ «Бранд Трейд» кандидата технічних наук Стрільця В.В. та членів: начальника науково-дослідної лабораторії РХБ захисту та аналізу загроз Національного університету цивільного захисту України доктора технічних наук, професора Кустова М.В. та наукового співробітника науково-дослідного лабораторно-експериментального Центру ТОВ «Бранд Трейд» доктора технічних наук, професора Стрільця В.М. склала цей акт про те, що в науково-дослідному лабораторно-експериментальному Центрі ТОВ «Бранд Трейд» впроваджені наступні результати дисертаційної роботи Карпова Артема Андрійовича:

- Математична модель роботи георадару в умовах пошуку різних за своїм складом вибухонебезпечних предметів використана для визначення тактико-технічних вимог до нових конструкцій георадарів;
- Закономірності реагування георадарів на різні за складом вибухонебезпечні предмети використані для розробки рекомендацій щодо підготовки піротехніків до застосування георадарів в різних умовах.

Впровадження результатів дисертаційної роботи Карпова Артема Андрійовича дозволить підвищити рівень безпеки піротехніків без зниження рівня економічної ефективності при використанні георадарів.

Голова комісії  
канд. техн. наук

В.В. Стрілець

Члени комісії:  
докт. техн. наук, професор



М.В. Кустов

докт. техн. наук, професор

В.М. Стрілець

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з навчальної роботи  
Національного університету цивільного  
захисту України,

кандидат технічних наук, доцент

Олександр ДЖУЛАЙ

« 18 » 11 2025 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

КАРПОВА Артема Андрійовича

Комісія в складі:

Голови комісії: т.в.о. начальника кафедри протимінної діяльності та спеціальної підготовки Національного університету цивільного захисту України, доктора філософії Євгена МАКАРОВА;

членів комісії:

- старшого викладача кафедри протимінної діяльності та спеціальної підготовки Сергія СТЕПАНЧУКА;

- викладача кафедри протимінної діяльності та спеціальної підготовки, доктора філософії Юрія ДІДОВЦЯ

склала даний акт про те, що результати дисертаційного дослідження КАРПОВА Артема Андрійовича у вигляді систематизації існуючих методів та способів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів та детального опису електромагнітного методу, були впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України при вивченні освітнього компоненту «Технічні засоби забезпечення піротехнічних робіт» Тема 1.8. Методи застосування сучасних засобів знешкодження та знищення ВНП.

Це дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість ознайомлення здобувачів вищої освіти із сучасними технологіями детектування та знешкодження вибухонебезпечних предметів.

Акт не є підставою для отримання КАРПОВИМ Артемом премій та інших винагороди з фондів Національного університету цивільного захисту України за використання результатів його дисертаційного дослідження.

Голова комісії:

Т.в.о. начальника кафедри протимінної діяльності  
та спеціальної підготовки

« 18 » \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 20 25 р.

Євген МАКАРОВ

Члени комісії:

Старший викладач кафедри протимінної діяльності  
та спеціальної підготовки

Викладач кафедри протимінної діяльності  
та спеціальної підготовки

« 18 » \_\_\_\_\_ 11 \_\_\_\_\_ 20 25 р.

Сергій СТЕПАНЧУК

Юрій ДІДОВЕЦЬ