

ЗАХИСТ ОБТ ВІД ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

УДК: 623.368

DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.72-80>

І. Мартинюк, О. Стаднічук, Н. Гузик, Є. Шматов, А. Каршень, Т. Погребняк

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Article history: Received 08 February 2024; Revised 27 February 2024; Accepted 14 March 2024

ПРОГНОЗУВАННЯ ВИЯВЛЕННЯ ПАРІВ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН У МІСЦЯХ ВСТАНОВЛЕННЯ ВНП НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Більшість досліджень за даною тематикою зосереджено навколо технологічної розробки пристроїв, здатних ефективно виявляти міни у вибраній точці в межах території, тоді як сама стратегія швидкого пошуку, безпомилкового виявлення та досліджень у цьому напрямку недостатньо вивчена. Розробка нових технологій пошуку, виявлення та розмінування є досить складною через різноманіття рельєфу та умов довкілля, де встановлюються міни, а також через велику лінійку типів мін. Тому питання пошуку відповідних способів, методик, датчиків (сенсорів) для виявлення вибухонебезпечних предметів на місцевості та моделі прогнозування наявності парів вибухових речовин як в ґрунті, так і в повітрі навколо мін чи вибухонебезпечних предметів залишається доволі актуальним. Мета дослідження – обґрунтування математичної моделі для прогнозування виявлення парів вибухових речовин у місцях встановлення мін та вибухонебезпечних предметів. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати процеси, що впливають на міграцію (транспортування) вибухових речовин у ґрунтах; побудувати математичну модель залежності концентрації випарів вибухових речовин від відстані до джерела та часу, обґрунтувати коректність отриманого розв'язку на прикладах. У роботі проаналізовано властивості (характеристики) вибухових речовин та процеси, що впливають на їхнє поширення на горизонтальній площині за умови наземного встановлення міни. Встановлено, що важливою характеристикою, яка впливає на потік хімічних сигнатур вибухових речовин на поверхні ґрунту, є константа її розподілу ґрунту та повітря, а найбільша маса характерних хімічних речовин для виявлення мін буде присутня на поверхні ґрунту, а не в повітрі над нею. Модель для прогнозування виявлення концентрації вибухових речовин на межі ґрунт-повітря потенційно може бути використана в поєднанні з концентрацією парової фази, виявленою датчиками (сенсорами), для зворотного розрахунку глибини встановлення міни та висоти сканування хімічним датчиком. Отримані результати можуть бути використані для дослідження наступної математичної моделі, що описуватиме наявність вибухових речовин у повітрі в місці встановлення міни чи поблизу вибухонебезпечних предметів

Ключові слова: вибухові речовини, вибухонебезпечні предмети, міни, тротил, TNT, DNT, міграція, дифузія, адсорбція, математична модель, прогнозування виявлення парів.

Постановка проблеми

Кількість різновидів мінної зброї, що постійно зростає, посилює негативні наслідки її застосування під час збройних конфліктів. Впродовж останніх років різко зросла і кількість поранених і тих, хто загинув, не лише серед комбатантів, а й цивільного населення, внаслідок вибухів вибухонебезпечних предметів (ВНП). Згідно з неповною статистикою, понад 110 мільйонів протипіхотних мін залишені на територіях більше ніж у 80 країнах і, що понад 20000 людей гинуть або отримують поранення щороку внаслідок вибуху прихованих мін [1, 2]. З 2016 року Україна випередила за кількістю жертв підриву на мінах Афганістан, Сирію,

Ємен, а з 2018 року – у п'ятірці світових лідерів з мінного забруднення територій (майже 21 тис.км²) [3, 4].

З 24 лютого 2022 року після повномасштабного вторгнення РФ на Україну площа та об'єми замінованих територій України зросли більше ніж у 10 разів і складають щонайменше 30% всієї території нашої країни [4, 5, 6]. Збройні Сили України у ході відбиття вторгнення противника, намаганні стримати просування, сповільнити темп наступу на напрямках його просування та захисту прикордонних територій здійснювали і надалі продовжують мінування доріг, шляхів, мостів, важливих об'єктів. У відповідь противник при відступі з північно-східного напрямку та з правобережжя Дніпра біля Херсону для прикриття

своїх угруповань та при створенні оборонної лінії на південно-східному напрямку постійно використовує мінно-вибухові загородження, мінує місцевість, дороги, населені пункти, окремі об'єкти. Крім того, ворог активно використовує мобільні установки для дистанційного мінування, що дозволяє швидко встановлювати мінні поля на великих площах. Це зменшує мобільність наших військ і, враховуючи випадковий розподіл протипіхотних мін на різних рельєфах, збільшує час та ресурси на його розмінування, зокрема вже на деокупованих територіях, де здійснюється гуманітарне розмінування.

Гуманітарне розмінування – комплекс заходів, які проводяться фахівцями з розмінування (саперами) з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із вибухо-небезпечними предметами, включно з обстеженням територій, виявленням, знешкодженням та (або) знищенням ВПН, маркуванням, підготовку документації після розмінування, надання громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачу очищеної території [7]. За цим важким завданням криється високий ризик ураження для фахівців з розмінування (саперів) та їхнього обладнання. Внутрішні операційні витрати, брак спеціалістів та технічного спорядження сповільнюють темпи розмінування, що робить такі території джерелом ризику, особливо для цивільного населення та біорізноманіття. Практичний досвід свідчить, що жоден з методів, яким користуються сьогодні для виявлення мін за допомогою технічних засобів за основними параметрами (чутливість, вибірковість, швидкодія, безпечність) повністю не задовольняє стандартам ООН. Більшість досліджень на сьогоднішній день зосереджено навколо технологічної розробки пристроїв, здатних ефективно виявляти міни у вибраній точці в межах території, тоді як сама стратегія пошуку, щоб вирішити, де досліджувати та яким маршрутом слідувати, недостатньо вивчена. Розробка нових технологій пошуку, виявлення та розмінування є досить складною через різноманіття рельєфу та умов довкілля, де встановлюються міни (ВНП), а також через велику кількість типів мін. Тому питання пошуку відповідних датчиків для виявлення ВНП на місцевості та моделі прогнозування наявності парів ВР як в ґрунті так і в повітрі навколо міни чи ВНП залишається доволі актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз друкованих джерел показав, що на сьогодні актуальними є питання як способів і засобів для пошуку, виявлення та розмінування забруднених територій, так і підготовки спеціалістів та умов виконання бойових завдань. Так, автори [8] провели аналіз факторів, що впливають на якість виконання завдань із

розмінування місцевості під час ведення бойових дій, порівняли різні способи розмінування та методи контролю якості очищення місцевості від ВНП, обґрунтували пропозиції щодо оснащення груп розмінування.

Методи виявлення мін ґрунтуються на фундаментальних принципах [9, 10, 11], головне тих, що використовують геофізичні відмінності між певними частинами мін та навколишнім середовищем, включно з георадаром, низькочастотною електромагнітною індукцією, металошукачами, ультразвуковими пристроями, інфрачервоним зображенням тощо. Інструментальні підходи до характеристики парів ВР базуються на оцінці хімічного складу повітря поблизу мін чи ВНП. Найбільш чутливими методами для аналізу повітря на вміст (наявність) ВР та продуктів їхнього гідролізу є спектральні методи, газова хроматографія у поєднанні з мас-спектрометрією [8].

Ведуться також дослідження щодо використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для збільшення ефективності виявлення ВНП (можливістю швидко оглядати та виявляти на великих площах розсіяні міни) та безпечності особового складу (саперів) [12, 13, 14]. Зокрема, пропонуються встановлювати на БПЛА модулі радіолокаційного, оптичного, інфрачервоного та хімічного виявлення мінно-вибухових пристроїв [10, 11]. Поєднання БПЛА мультироторного типу з різними сенсорами, зокрема хімічними, відповідає таким критеріям, як мобільність, швидкість (оперативність), чутливість, достовірність, вибірковість, надійність, стабільність [11]. Також пропонується стратегія багатоспектрального синтезу на основі моделі глибокого навчання [14], зокрема, використовуючи мультиспектральну платформу на базі БПЛА, за допомогою стратегії активного навчання створено багатоспектральний набір даних типів мін в різних умовах.

Найбільш чутливим і селективним детектором ВР є нюхова система ссавців, тому біологічні методи є перспективними для використання у мініатюрних датчиках. Межі традиційних інструментальних методів поступають сенсорним методам, що базуються на основі біологічних, хімічних та імунохімічних методах і лежать в основі E-Nose та динамічної ольфактометрії – стандартизованого методу, що використовується для визначення концентрації летких речовин у повітрі [15].

Фактично технологія хімічного виявлення мінно-вибухових пристроїв базується на ідентифікації парів ВР [9, 10, 12, 14, 16, 18]. Низка робіт [16, 17, 18] розглядає вплив зовнішніх факторів на концентрацію парів ВР, що надходять зсередини корпусу міни назовні. Зокрема, досліджується вплив температури,

вологості, різних типів корпусів вибухових пристроїв (мін, боєприпасів, що не вибухнули, саморобних вибухових пристроїв тощо). Було встановлено, що чим нижча температура довкілля і більша щільність ґрунту, тим менша кількість ВР та їхніх похідних переноситься на поверхню.

У роботах [19, 20] були спроби описати отримані експериментальним шляхом результати наявності фракції ВР у ґрунті чи на його поверхні за допомогою математичної моделі. Основною проблемою, як зазначають автори, є трудність у визначенні різних констант, наприклад константи розподілу ґрунт/повітря, залежно від зовнішніх умов. Очевидно, що шляхи пошуку розв'язання цього питання для прогнозування визначення слідів ВР на поверхні ґрунту та в повітрі залежно від різних умов потребують дослідження.

Формулювання мети статті (постановка завдання)

Мета дослідження – обґрунтування математичної моделі для прогнозування виявлення парів вибухових речовин у місцях встановлення мін та ВНП. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати процеси, що впливають на міграцію (транспортування) вибухових речовин у ґрунтах; побудувати математичну модель залежності концентрації випарів ВР від відстані до джерела та часу, обґрунтувати коректність отриманого результату на прикладах.

Виклад основного матеріалу

Вибухонебезпечні предмети загалом та міни зокрема, дифундують у довкілля суміш різних сполук через пори та мікротріщини у корпусах. Поверхня землі впродовж тривалого часу у місці встановлення міни (ВНП) буде забруднена ВР [16-18, 21], оскільки виділені пари ВР сорбуються та концентруються в ґрунті навколо встановлених мін. Скупчення достатньої кількості ВР та їхніх похідних на поверхні землі служить основою для виявлення мін та ВНП.

Основними найбільш поширеними компонентами боєприпасів, з якими стикаються фахівці з розмінування (сапери) під час знешкодження ВНП та розмінування територій, є тротил (TNT), гексоген (RDX) та октоген (HMX) (рис. 1, табл. 1) [21].

Тротил виділяє пари ізомерів тротилу та похідні: 2,4-динітролуен (2,4-DNT), 1,3-динітробензен (1,3-DNB), 2-аміно-4,6-ДНТ, 2,4-діаміно-6-нітротолуен (2,4-ADNT), 4-діаміно-2,6-динітротолуен (4-ADNT), а міни та ВНП, що містять гексоген або його суміш з тротилом – циклогексаном [14, 17, 18, 19]. Фактично,

кількість похідних TNT змінюється в ряді: DNT > DNB > TNT, а 2-ADNT і 4-ADNT утворюються як результат впливу навколишнього середовища на тротил [18, 20, 21]. Так, аналіз зразків ґрунтів з мінних полів з Боснії та Герцеговини, Косово і Камбоджі показав відсутність пар тротилу, тоді як пари DNT та DNB були присутні [18, 20]. В інших дослідженнях [17] вміст у ґрунті та водних витяжках 2,4-DNT та TNT є на порядок вищим за вміст інших похідних, а їхня кількість змінюється залежно від типу і розміру міни (ВНП) та типу корпусу (пластиковий чи металевий) міни.

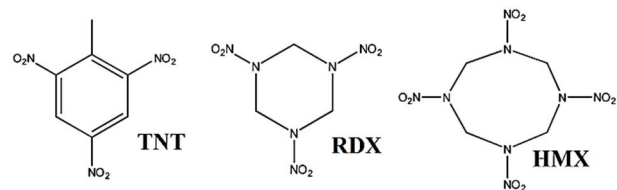


Рис. 1. Поширені вибухові речовини: тротил (2,4,6-тринітролуол, TNT), гексоген (1,3,5-тринітро-1,3,5-тріазинан, RDX) і октоген (1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетразокан, HMX)

За певних умов ґрунту може відбутися деградація (руйнування) ВР і на поверхні ґрунту не буде виявлених слідів вибухових речовин.

Таблиця 1

Характеристики деяких мін

Тип міни	Характеристика, матеріал корпусу	Розміри, см	Тип ВР/маса, г
Вітчизняні зразки			
ПМН	Протипіхотна, металевий	11,2×5,7	TNT, 230
ПМН-4	Протипіхотна, металевий	9,5×4,2	TNT/RDX, 60/40
ТМ-62М	Протитанкова, металевий	32×12,8	TNT, 7500
Іноземні зразки			
РМА-1А	Протипіхотна, полівінілхлорид	14,4×6,4×3,5	TNT, 200
РМА-2	Протипіхотна, полістирол	6,4×2,7	TNT/RDX, 100/13
РРМ-2	Протипіхотна, поліетилен	12,5×8,2×6,3	TNT, 130
ТМА-5	Протитанкова, полістирол	30×28×10	TNT/RDX 5300/200
ТММ-1	Протитанкова, металевий	33×9,0	TNT, 5600

Імовірність виявлення у повітрі або на поверхні ґрунту ВР збільшується при додаванні до їх складу домішок деяких нітросполук (*o*-мононітротолуену, *n*-мононітротолуену чи диметилдинітробутану), які

підвищують тиск насиченої пари. Так, виробничі домішки в тротилі, такі як 2,4- DNT, 2,6- DNT, 1,3- DNB та 1,3,5-тринітробензол мають відносно вищий тиск пари, ніж TNT, і є потенційно кращими хімічними індикаторами для виявлення ВР із нерозірваних боеприпасів. Ймовірно, більша присутність 2,4-DNT, ніж тротилу, є наслідком різниці тиску їхніх парів (для DNT – 1,4 нг/л, а TNT – 70 нг/л) та періоду напіврозпаду в ґрунті (для DNT – 26 діб при температурі 22°C, а TNT – 24 год за аналогічних умов) [19, 22], а низький тиск пари TNT, RDX та HMX додатково знижує ймовірність виявлення сигнатур вибухових речовин. Отже, можна стверджувати, що чим вища леткість ВР, тим більша ймовірність їх виявлення за допомогою різних детекторів. Прикладом таких детекторів можуть бути, хімічні сенсори ВР на основі металоорганічних каркасів та оксидів металів на основі оксиду титану (TiO₂, NH₂-MIL-125) дозволяють ідентифікувати гексоген та тротил серед 25 структурно подібних нітросполук у режимі реального часу на відстані до 8 м; хімічні сенсори, розроблені на основі транзисторів з кремнієвих нанопровідників, модифікованих шаром аminosилану (3-амінопропілтриетоксисилану NH₂SiO₃), дозволяють виявляти пари ВР у межах 1×10⁻¹² мг/л; хімічні сенсори, що працюють за принципом хіморезисторів, використовують флуоресцентні полімери або металоорганічні каркаси з титан (VI) [13].

Кількість і розподіл частинок ВР на поверхні ґрунту залежить від багатьох факторів [16-19, 22]:

- типу ВВП, міни чи боеприпасу та типу корпусу;
- терміну встановлення міни (ВВП), що впливатиме на кількість випущених частинок;
- ймовірності детонації ВВП;
- вивітрювання та механічної дезагрегації ВР;
- факторів навколишнього середовища (температури, тиску, вологості повітря тощо).

На стан ВР після того, як вони потрапили у навколишнє середовище, впливатимуть абіотичні та біотичні процеси [18-20, 22]. Загалом процеси, що впливають на стан ВР та їхніх похідних можна розділити на дві категорії (рис. 2):

- процеси, що впливають на перенесення: розчинення, випаровування, адсорбція;
- процеси, що впливають на трансформацію (перетворення): фотоліз, гідроліз, окиснення, біодеградація.

Швидкість і ступінь транспортування та перетворення регулюватимуться фізико-хімічними властивостями ВР (розчинність, здатність до гідролізу, тиск пари тощо), факторами навколишнього середовища (погодними умовами, властивостями ґрунту: щільністю, пористістю, рН) та біологічними факторами (наявність та/або відсутність мікроорганізмів, що розкладають вибухові речовини).

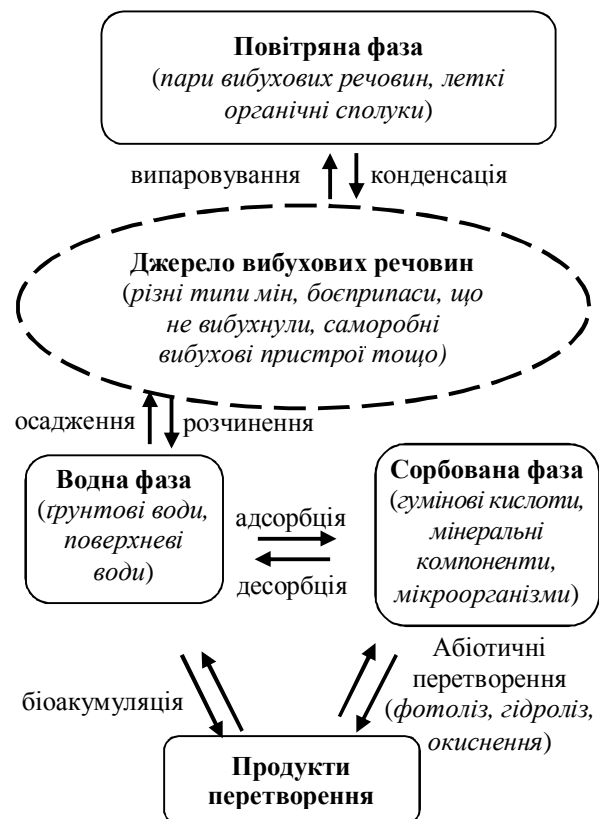


Рис. 2. Основні шляхи деградації вибухових речовин

На концентрацію парів ВР впливають тип та якісні характеристики ґрунту, щільність, пористість, склад, вологість. Зокрема, чим вища щільність і менша пористість, тим важче відбувається міграція ВР: у піску та суглинку пари TNT, DNT та DNB було виявлено, а у глині – ні [16, 17]. Дискретні частинки TNT, RDX та HMX, що утворюються в результаті детонації, можуть повільно розчинятися з часом, що призводить до постійного викиду ВР у ґрунті чи поверхневій воді впродовж тривалого часу [21]. Продукти перетворення тротилу мають більший потенціал для транспортування через більшу розчинність у воді порівняно з вихідною сполукою. Перетворення ВР, зокрема функціональних груп амінів, амідів, нітрилів і карбонових кислот, можливе за умов підвищення рН, головню в результаті лужного гідролізу і наявності вільної вологи. Так, TNT, RDX та HMX добре гідролізують при рН 10 і вище [19, 20].

Вологість ґрунту впливає на концентрацію вибухонебезпечних парів. Сухі ґрунти «затримують» пари ВР через сильну адсорбцію, що знижує концентрацію пари, а вологість ґрунту навпаки – сприяє її просуванню. Адсорбція ВР на різних поверхнях (наприклад, колоїдному і гуміновому матеріалі, мінералах, мікроорганізмах) відбувається після її розчинення та взаємодії з поверхнею сорбенту. Як фізико-хімічні властивості розчиненої речовини та сорбенту, так і фактори навколишнього середовища впливатимуть

на реакції сорбції (наприклад, гідрофобний розподіл, утворення водневих зв'язків, іонний обмін, хемосорбція) і ступінь адсорбції. Збільшення кількості аміногруп у нітроароматичних сполуках покращує їхню сорбційну здатність і збільшує константу сорбційної ємності. З іншого боку, занадто велика кількість опадів може спричинити повне змивання вибухового матеріалу з поверхні ґрунту, що теж зменшує концентрацію пари ВР. Очевидно, що важливою характеристикою, яка впливає на потік хімічних сигнатур (пари ВР) на поверхню ґрунту, є константа розподілу ґрунту та повітря для кожного типу ВР та її похідних, а найбільша маса характерних хімічних речовин для виявлення закопаних мін буде присутня на поверхні ґрунту, а не в повітрі над нею.

Для опису “переміщення” хімічної речовини у горизонтальній площині для випадку, коли міна (ВНП) знаходиться на поверхні, пропонуємо використовувати дифузійну модель, що відображає математичний зв'язок між кількістю ВР (DNT, TNT) і відстанню до поверхні міни (рис. 3).

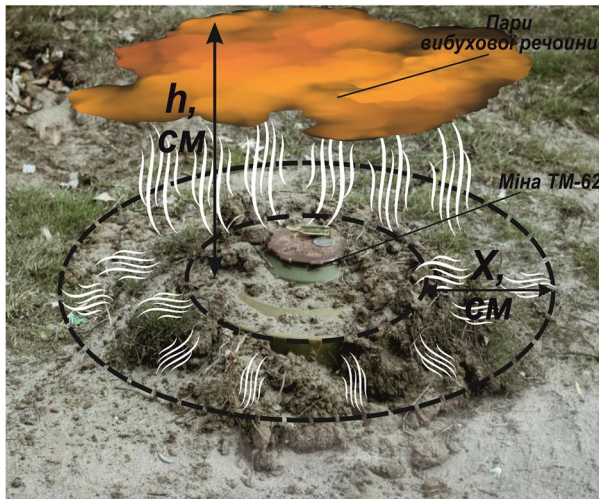


Рис. 3. Схематичне зображення запропонованої математичної моделі прогнозування виявлення парів вибухових речовин

Запропонована модель передбачає дослідження двох етапів. На першому з них розглядається модель дифузії на основі адсорбційної здатності ВР у ґрунті [23]. Для цього припустимо, що:

- маємо циліндричну міну з радіусом основи r , см, що встановлена на поверхні ґрунту;
- ВР рівномірно витікає на поверхню сферичної міни (рівновага встановиться впродовж доби і залишатиметься сталою);
- швидкість адсорбції ґрунту ВР (DNT, TNT) залишається постійною;
- відома щільність ґрунту.

Тоді концентрація парів ВР $C_1(x, t)$, мг/см² на сферичній поверхні ґрунту на відстані x (см) від поверхні міни обчислюється за формулою

$$C_1 = \frac{N}{S}, \quad (1)$$

де

$$N = C_0 - k \times M, \quad (2)$$

$$M = \frac{3}{4} \times \pi \times ((x+r)^3 - r^3) \times m, \quad (3)$$

$$S = 4 \times \pi \times (x+r)^2. \quad (4)$$

У формулах (1)-(4) через x позначено відстань від поверхні міни, см;

C_1 – кількість ВР (DNT, TNT) на сферичній поверхні ґрунту на відстані x від поверхні міни, встановлено на поверхні ґрунту, що може бути виражена як кількість ВР на одиницю товщини, мг/см³;

C_0 – кількість вибухової величини на поверхні міни, мг;

N – загальна кількість ВР (DNT, TNT) на сферичній поверхні ґрунту на відстані x від поверхні міни, мг;

S – площа поверхні сферичного ґрунту на відстані x від поверхні міни, см²;

M – якість ґрунту на відстані x (см) від поверхні міни, г;

k – константа адсорбції ґрунтом ВР, мг/г;

m – щільність ґрунту (k і m встановлюється експериментально для кожної окремої ділянки дослідження), г/см³;

r – приблизний радіус міни, см.

За допомогою MATLAB було обчислено концентрацію DNT та TNT на сферичній поверхні ґрунту на відстані x (см) від поверхні міни при різних значеннях радіуса міни r (рис. 4). Для розрахунків було обрано наступні значення:

- коефіцієнт адсорбції ґрунтом DNT $k = 0,00138$ мг/г, щільність ґрунту $m = 1,5$ г/см³, вихідна кількість DNT на поверхні міни $C_0 = 10$ г;

- коефіцієнт адсорбції ґрунтом TNT $k = 0,0004$ мг/г, щільність ґрунту $m = 1,5$ г/см³, вихідна кількість TNT на поверхні міни $C_0 = 10$ г.

Відповідно до розрахунків максимальна відстань горизонтального поширення TNT за заданих умов при радіусі міни (r) 10 см складає 182 см, а для $r = 30$ см – $x = 162$ см; для DNT: міни $r = 10$ см – $x = 117$ см, при $r = 12$ см – $x = 115$ см, при $r = 16$ см – $x = 111$ см, а при $r = 30$ см – $x = 97$ см. Водночас, згідно з експериментальними та польовими дослідженнями [16-20] на поверхні корпусу міни та у ґрунті поблизу неї було виявлено концентрації ~0,5 мг/кг для нітроароматичних сполук і 0,14 мг/кг для RDX. Тому

для наступних розрахунків обираємо концентрацію, співмірну з наведеними у літературі – 20 мг. У цих умовах відстань горизонтального поширення вибухових речовин зменшується. Так, для TNT за заданих умов при $C_0=20$ мг при радіусі міни $r=10$ см x становитиме 14 см, при $r=16$ см – $x=11$ см, $r=30$ см – $x=5$ см.

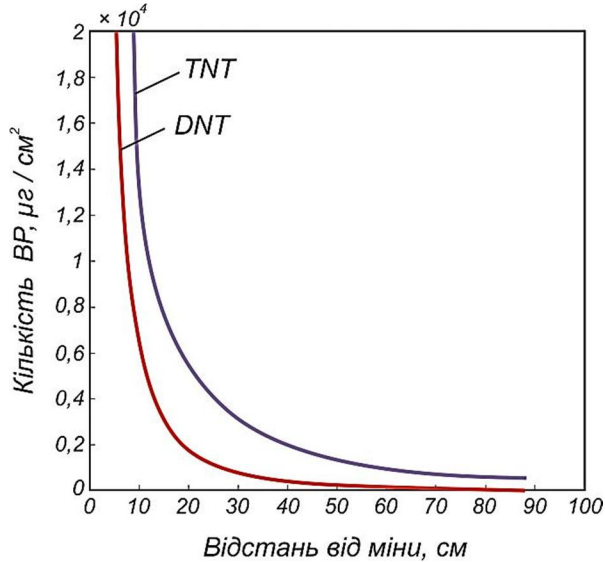


Рис. 4. Залежність між кількістю вибухової речовини (DNT, TNT) та відстанню до міни

Отже, можемо зробити висновок, що чим більший радіус міни, тим менша відстань горизонтального забруднення продуктами розпаду вибухових речовин.

Другий етап дослідження – математична модель визначення концентрації випарів ВР (DNT, TNT) на висоті h (см) для виявлення хімічними датчиками (сенсорами) у момент часу t (днів) (рис. 3) задається рівнянням дифузії, алгоритм виявлення парів ВР описано в [13, 24]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial h^2}. \quad (5)$$

До рівняння (5) додаються умови:

$$C(h, 0) = 0, \quad (6)$$

що задає розподіл ВР у початковий момент часу та

$$C(0, t) = C_1, \quad (7)$$

що задає концентрацію вибухової речовини на поверхні міни. Зауважимо, що відповідно до (1)-(4), можемо визначити кількість ВР (DNT, TNT) на сферичній поверхні ґрунту C_1 на відстані x від поверхні міни, встановленої на поверхні ґрунту, тому, насправді, концентрація випарів DNT є функцією трьох змінних $C = C(x, h, t)$.

Модель нехтує хімічними втратами через механізм “відведення” або адвективного переносу хімічної речовини через парофазу, який може статися в результаті випаровування води.

Дифузійна крайова умова (7) враховує опір масопередачі на межі ґрунт-повітря. Межовою умовою між двома шарами є суцільність, де концентрація та потоки рівні.

Побудована модель передбачає локальну рівновагу розподілу забруднюючих речовин між поровими просторами та ґрунтом. Поверхневий потік залежить від опору з боку ґрунту та повітря, що надається масовому переносу забруднювача та враховує сорбцію хімічної речовини, що дифундує через ґрунт, і визначається як

$$\varepsilon_a + \rho_b \times K_{SA},$$

де: K_{SA} – константа розподілу ґрунт-повітря (л/кг), а ρ_b – об’ємна щільність ґрунту (г/см³). За відсутності прямих вимірювань K_{SA} можна оцінити для вологих ґрунтів (>5%)

$$K_{SA} = \frac{K_{SW}}{K_{AW}},$$

де: K_{SW} – константа розподілу ґрунт-вода (л/кг);

K_{AW} – константа розподілу повітря-вода (константа закону Генрі, коефіцієнт молярної концентрації, безрозмірна).

Ефективний коефіцієнт дифузії D_{eff} , см²/добу у математичній моделі (5)-(7) враховує вплив пористості ґрунту та звивистість шляху дифузії хімічної речовини. Відповідно до [19] K_{SA} становить 5,7 та 2,9 для 2,4,6-TNT та 2,4-DNT відповідно, а D_{eff} – 5530 см²/добу та 5790 см²/добу для 2,4,6-TNT та 2,4-DNT відповідно.

Розв’язком задачі (5)-(7) є функція

$$C(x, h, t) = K_{sa} \frac{C_1}{\sqrt{4\pi D_{eff} t}} e^{\frac{-h^2}{4D_{eff} t}}, \quad (8)$$

що визначає залежність між кількістю тротилу на відстані x (см) від поверхні міни (горизонтального поширення ВР) на висоті h см від неї в момент часу t днів.

За допомогою MATLAB обчислено концентрацію 2,4,6-TNT та 2,4-DNT при радіусі міни $r=10$ см та вихідної концентрації $C_0 = 20$ мг за різних значень параметрів x , h (см) та t (днів). Отримані результати наведені у таблиці 2.

З отриманих числових даних можемо зробити висновок, що кількість випарів вибухових речовин зменшується при віддаленні від поверхні міни вздовж горизонталі та зі збільшенням висоти та часу. Варто зазначити, що 2,4,6-TNT дифундує повільніше за 2,4-DNT, зокрема на поверхні міни через 1 добу для 2,4,6-TNT є приблизно 1% від початкової концентрації вибухової речовини, а для 2,4-DNT – 2,14%, через 30 діб відповідно 0,29% та 0,41%. З часом концентрація вибухових речовин на відстані x змінюється не суттєво зі збільшенням висоти над поверхнею міни, зокрема, для 2,4,6-TNT на віддалі 5 см від

поверхні міни на 30 добу концентрації парів ВР різняться в діапазоні $1 \times 10^{-7} \div 7 \times 10^{-7}$, для 2,4-DNT відповідно $1 \times 10^{-7} \div 3 \times 10^{-7}$. Звідси випливає, що зі зростанням часу кількість випарів ВР на відстані x (см) від поверхні міни врівноважується і не залежить від висоти над нею.

Таблиця 2

Кількість 2,4,6-TNT та 2,4 DNT залежно від горизонтального поширення (x , см) від міни, висоти датчика (h , см) та часу знаходження міни (t , дб)

Час, дб	Відстань від поверхні міни до датчика, h , см			
	15	30	50	100
Для 2,4,6-TNT на поверхні міни ($x = 0$ см)				
1	$3,41 \times 10^{-4}$	$3,31 \times 10^{-4}$	$3,08 \times 10^{-4}$	$2,19 \times 10^{-4}$
2	$2,42 \times 10^{-4}$	$2,38 \times 10^{-4}$	$2,30 \times 10^{-4}$	$1,94 \times 10^{-4}$
10	$1,09 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-4}$	$1,04 \times 10^{-4}$
30	$6,29 \times 10^{-5}$	$6,27 \times 10^{-5}$	$6,26 \times 10^{-5}$	$6,19 \times 10^{-5}$
2,4,6-TNT на відстані від поверхні міни ($x = 5$ см)				
1	$2,59 \times 10^{-4}$	$2,51 \times 10^{-4}$	$2,33 \times 10^{-4}$	$1,67 \times 10^{-4}$
2	$1,84 \times 10^{-4}$	$1,81 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-4}$	$1,48 \times 10^{-4}$
10	$8,26 \times 10^{-5}$	$8,24 \times 10^{-5}$	$8,18 \times 10^{-5}$	$7,97 \times 10^{-5}$
30	$4,77 \times 10^{-5}$	$4,77 \times 10^{-5}$	$4,76 \times 10^{-5}$	$4,70 \times 10^{-5}$
2,4,6-TNT на відстані від поверхні міни ($x = 10$ см)				
1	$6,38 \times 10^{-5}$	$6,19 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-5}$	$2,19 \times 10^{-5}$
2	$4,53 \times 10^{-5}$	$4,46 \times 10^{-5}$	$2,30 \times 10^{-5}$	$1,94 \times 10^{-5}$
10	$2,04 \times 10^{-5}$	$2,03 \times 10^{-5}$	$1,06 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-5}$
30	$1,18 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-5}$	$6,26 \times 10^{-6}$	$6,19 \times 10^{-6}$
2,4-DNT на поверхні міни ($x = 0$ см)				
1	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$
2	$1,21 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-4}$	$1,15 \times 10^{-4}$	$9,76 \times 10^{-5}$
10	$5,41 \times 10^{-5}$	$5,39 \times 10^{-5}$	$5,36 \times 10^{-5}$	$5,18 \times 10^{-5}$
30	$3,12 \times 10^{-5}$	$3,12 \times 10^{-5}$	$3,11 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-5}$
2,4-DNT на відстані від поверхні міни ($x = 5$ см)				
1	$1,29 \times 10^{-4}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$8,45 \times 10^{-5}$
2	$9,15 \times 10^{-5}$	$9,002 \times 10^{-5}$	$8,71 \times 10^{-5}$	$7,42 \times 10^{-5}$
10	$4,11 \times 10^{-5}$	$4,09 \times 10^{-5}$	$4,07 \times 10^{-5}$	$3,95 \times 10^{-5}$
30	$2,37 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	$2,37 \times 10^{-5}$	$2,34 \times 10^{-5}$
2,4-DNT на відстані від поверхні міни ($x = 10$ см)				
1	$3,17 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-5}$	$2,88 \times 10^{-5}$	$2,08 \times 10^{-5}$
2	$2,25 \times 10^{-5}$	$2,22 \times 10^{-5}$	$2,15 \times 10^{-5}$	$1,82 \times 10^{-5}$
10	$1,01 \times 10^{-5}$	$1,01 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$	$9,71 \times 10^{-6}$
30	$5,85 \times 10^{-6}$	$5,84 \times 10^{-6}$	$5,83 \times 10^{-6}$	$5,52 \times 10^{-6}$

Крім того, найбільша концентрація хімічних речовин фіксується на поверхні ґрунту, а не в повітрі над нею. Відповідно, хімічні датчики повинні бути дуже чутливими через низькі сигнатури (чутливість на межі 10 нг/кг).

Важливими чинниками у запропонованій дифузійній моделі та інших моделях [19, 20, 23] є константа розподілу ґрунт-повітря, константа адсорбції та коефіцієнт дифузії, які будуть залежати від виду хімічної речовини та типу ґрунту.

Висновки

Отже, для виявлення мін та ВВП можна скористатися низкою вибухових ознак від аналізу форми (наявність металічного детонатора можна виявити за

допомогою аналізу форми зображення) до індивідуальних характеристик ВР: щільності матеріалу (вибуховий матеріал щільніший за більшість органічних матеріалів), елементного складу (наприклад, нітрогену) чи наявності окремих груп (наприклад, наявність нітрогрупи чи аміногрупи) у зразку парів тощо.

На перенесення та виявлення органічних сполук (тротилу та споріднених речовин), отриманих із встановлених мін, впливають фактори навколишнього середовища, зокрема: температура, тиск, тип ґрунту (фізичні та хімічні властивості), вміст води, ущільнення, тип мін, місце встановлення і вік встановлення.

Відповідно до запропонованої математичної моделі прогнозування найбільша концентрація вибухових речовин фіксується на поверхні ґрунту, а не в повітрі над нею. Радіус міни (відповідно площа забруднення) обернено пропорційна до відстані горизонтального поширення: чим більший радіус, тим менша відстань горизонтального забруднення продуктами розпаду вибухових речовин. Крім того, з часом кількість випарів ВР на відстані x см від поверхні міни врівноважується і не залежить від висоти над нею.

Модель для прогнозування концентрації ВР на межі ґрунт-повітря потенційно може бути використана в поєднанні з концентрацією парової фази, виявленою датчиками, для зворотного розрахунку глибини встановленої міни та висоти сканування хімічним датчиком.

Отримані результати можуть бути використані для наступної математичної моделі, що описуватиме наявність ВР у повітрі в місці встановлення міни чи ВВП.

Список літератури

1. Geneva International Center for Humanitarian Demining/ GICHD. Офіційний сайт: <https://www.gichd.org/>
2. Landmine Monitor. LandMine. Cluster Munition Monitor. 2022. URL: www.themonitor.org/media/3352351/ 2022
3. Гуцул Т.В., Мирончук К.В., Ткач В.О., Хобзей М.М. Економічна ефективність і пріоритетність розмінування території: світовий досвід. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2023. Том 8. № 2. С. 308 – 313. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-44>
4. Iuliia Osmolovska. Walking on Fire: Demining in Ukraine. *GLOBSEC* 2023. 28 p. <https://www.globsec.org>
5. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Офіційний сайт. <https://dsns.gov.ua/>
6. Горбулін В.П. Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник НАН України*. 2022. № 2. С.3-13. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2022.02.00311>
7. Про протимінну діяльність в Україні : Закон України від 06.12.2018 № 2642-VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19#Text> (дата звернення: 04.02.2024).
8. Колос Р.Л., Фтемов Ю.О. Організація виконання робіт з розмінування місцевості від вибухонебезпечних предметів.

Військово-технічний збірник. 2017. № 17. С. 53-60. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.17.2017.53-60>

9. Gürkan S., Karapınar M., Doğan S. Detection and Imaging of Underground Objects for Distinguishing Explosives by Using a Fluxgate Sensor Array. *Applied sciences*. 2019. Is. 9. 5415 P. doi:10.3390/app9245415

10. Hussein E., Waller E. Landmine detection: The problem and the challenge. *Applied Radiation and Isotopes*. 2000. Is. 53, pp. 557–563. DOI:10.1016/S0969-8043(00)00218-9.

11. Cardona L., Jiménez J., Vanegas N. Landmine Detection Technologies to Face the Demining Problem in Antioquia. *Dyna (Medellin Colombia)*. 2014. 81. № 183, pp. 115-125. DOI: 10.15446/dyna.v81n183.37441.

12. Raj A., Rafiq I, Gowda J. A., Krishna L. S. Landmines detection using UAV. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* Volume: 06. Issue: 04. 2019 www.irjet.net

13. Мартинюк І., Шматов Є., Погребняк Т., Каршень А., Стаднічук О., Лаврененко О. Хімічні сенсори на безпілотних літальних апаратах: перспективний напрямок пошуку мінно-вибухових пристроїв. *Військово-технічний збірник*. 2023. № 29. С.102-110. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.102-110>

14. Qiu Z., Guo H., Hu J., Jiang H., Luo C. Joint Fusion and Detection via Deep Learning in UAV-Borne Multispectral Sensing of Scatterable Landmine. *Sensors* 2023. 23. P. 5693. <https://doi.org/10.3390/s23125693>

15. Wasilewski T., Gebicki J., Kamysz W. Bio-inspired approaches for explosives detection. *Trends in Analytical Chemistry*. 2021. 142. 116330 pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116330>

16. Cragin J.H., Leggett D.C. Diffusion and Flux of Explosive-Related Compounds in Plastic Mine Surrogates. *US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center*. 2003. ERDC/CRREL Technical Report TR-03-12. 22 p.

17. Leggett D.C., Cragin J.H., Jenkins T.F., Ranney T.A (2001) Release of Explosive-Related Vapors from Landmines. *U.S. Army Engineer Research and Development Center, ERDC/CRREL Technical Report TR-01-6*.

18. Pawłowski, W.; Karpinska, M. The Effect of Soil Moisture on the Ability to Detect TNT Pairs from the Sand Layer in Order to Prevent Environmental Pollution and Groundwater. *Molecules* 2021. 26. P. 3908. <https://doi.org/10.3390/molecules26133908>

19. Ravikrishna R., Valsaraj K.T., Price C.B., Brannon J.M., Hayes C.A., Yost S.L. Vapor-Phase Transport of Explosives from Buried Sources in Soils. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2004. (54). 12. pp. 1525-1533. DOI: 10.1080/10473289.2004.10471017

20. Irrazabal M., Hernández-Rivera S.P., Briano J.G. Modeling of TNT transport from landmines: Numerical approach. *Chemosphere*. 2009. 77. pp. 546–551. doi:10.1016/j.chemosphere.-2009.07.008.

21. Kustov, M., Karpov, A., Harbuz, S., Savchenko, A. Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. *In Key Engineering Materials*. Vol. 952. 2023. pp. 143–154. <https://doi.org/10.4028/p-0h8ung>

22. Kalderis D., Juhasz A.L., Boopathy R., Comfort S. Soils contaminated with explosives: Environmental fate and evaluation

of state-of-the-art remediation processes. *Pure Appl. Chem*. 2011. Vol. 83. No. 7. pp. 1407–1484. DOI:10.1351/PAC-REP-10-01-05

23. The Diffusion Model Based on the Exudation Mechanism of the Explosives in the Landmine. URL: https://2020/igem.org/Team:NEFU_China/Model

24. Звіт про виконання науково-дослідної роботи “Обґрунтування доцільності застосування безпілотних літальних апаратів коптерного типу обладнаних модулем хімічного пошуку, виявлення та визначення мінно-вибухових пристроїв”, шифр “Гриф” (остаточний звіт), 2023, с. 165.

REFERENCE

1. Geneva International Center for Humanitarian Demining/ GICHD. Офіційний сайт: <https://www.gichd.org>. [in English]

2. Landmine Monitor. LandMine. Cluster Munition Monitor. (2022), URL: www.themonitor.org/media/3352351/2022 [in English]

3. Hutsul T.V., Myronchuk K.V., Tkach V.O. and Khobzei M.M. (2023), Economic efficiency and prioritization of demining territories: world experience. [Ekonomichna efektyvnist i priorytetnist rozminuvannia terytorii: svitovyi dosvid]. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. Volume 8. No. 2. pp. 308–313. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-44> [in Ukrainian].

4. Iuliia Osmolovska. (2023), Walking on Fire: Demining in Ukraine. *GLOBSEC*. 28 p. <https://www.globsec.org> [in Ukrainian].

5. State Service of Ukraine for Emergency Situations. Official site. <https://dsns.gov.ua> [in Ukrainian].

6. Horbulin V. (2022), Svitova hlobalna problema rozminuvannia: ukrainskyi vector [World global demining problem: Ukrainian vector]. *Visnyk NAN Ukrainy–Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*. Issue 2. pp. 3–13. <https://doi.org/10.15407/visn2022.02.003> [in Ukrainian].

7. On Mine Action in Ukraine: Law of Ukraine of 06.12.2018 No. 2642-VIII / Verkhovna Rada of Ukraine. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19#Text> (accessed on 04.02.2024). [in Ukrainian].

8. Kolos R.L. and Ftemov Yu.O. (2017), Organization of work on demining the area from explosive objects. [Orhanizatsiia vykonannia robot z rozminuvannia mistsevosti vid vybukhonebezpechnykh predmetiv]. *Military and technical collection*. No. 17. pp. 53-60. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.17.2017.53-60> [in Ukrainian].

9. Gürkan S., Karapınar M. and Doğan S. (2019), Detection and Imaging of Underground Objects for Distinguishing Explosives by Using a Fluxgate Sensor Array. *Applied sciences*. 2019. Is. 9. pp. 5415. DOI:10.3390/app9245415 [in English].

10. Hussein E. and Waller E. (2000), Landmine detection: The problem and the challenge. *Applied Radiation and Isotopes*. Is. 53, pp. 557–563. DOI:10.1016/S0969-8043(00)00218-9 [in English].

11. Cardona L., Jiménez J. and Vanegas N. (2014), Landmine Detection Technologies to Face the Demining Problem in Antioquia. *Dyna (Medellin Colombia)*. 81. № 183, pp. 115-125. DOI: 10.15446/dyna.v81n183.37441 [in English].

12. Raj A., Rafiq I, Gowda J. A. and Krishna L. S. (2019), Landmines detection using UAV. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 06. Issue: 04. www.irjet.net [in English].

13. Martynyuk I., Shmatov E., Pogrebnyak T., Karshen A., Stadnichuk O. and Lavrenenko O. (2023), Chemical sensors on unmanned aerial vehicles: a promising direction for the search for mine-explosive devices. [Khimichni sensory na bezpilotnykh litalnykh aparatakh: perspektyvnyi napriamok poshuku minno-vybukhovyykh prystroiv]. *Military and technical collection*. No. 29. pp. 102-110. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.102-110> [in Ukrainian].
14. Qiu Z., Guo H., Hu J., Jiang H. and Luo C. (2023), Joint Fusion and Detection via Deep Learning in UAV-Borne Multispectral Sensing of Scatterable Landmine. *Sensors*. 23. P. 5693. <https://doi.org/10.3390/s23125693> [in English].
15. Wasilewski T., Gebicki J., Kamysz W. (2021), Bio-inspired approaches for explosives detection. *Trends in Analytical Chemistry*. 142. 116330 pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116330> [in English].
16. Cragin J.H. and Leggett D.C. (2003), Diffusion and Flux of Explosive-Related Compounds in Plastic Mine Surrogates. *US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center*. ERDC/CRREL Technical Report TR-03-12. 22 p. [in English].
17. Leggett D.C., Cragin J.H., Jenkins T.F. and Ranney T.A. (2001), Release of Explosive-Related Vapors from Landmines. *U.S. Army Engineer Research and Development Center, ERDC/CRREL Technical Report TR-01-6*. [in English].
18. Pawłowski W. and Karpinska M. (2021), The Effect of Soil Moisture on the Ability to Detect TNT Pairs from the Sand Layer in Order to Prevent Environmental Pollution and Groundwater. *Molecules*. 26. 3908 P. <https://doi.org/10.3390/molecules26133908> [in English].
19. Ravikrishna R., Valsaraj K.T., Price C.B. Brannon J.M., Hayes C.A., Yost S.L. (2004), Vapor-Phase Transport of Explosives from Buried Sources in Soils. *Journal of the Air & Waste Management Association*. (54). 12. pp.1525-1533. DOI: 10.1080/10473289.2004.10471017. [in English].
20. Irrazabal M., Hernández-Rivera S.P. and Briano J.G. (2009), Modeling of TNT transport from landmines: Numerical approach. *Chemosphere*. 77. pp. 546-551. DOI:10.1016/j.chemosphere.2009.07.008. [in English].
21. Kustov M., Karpov A., Harbuz S. and Savchenko A. (2023), Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. *In Key Engineering Materials*. Vol. 952. pp. 143-154. <https://doi.org/10.4028/p-0h8ung> [in English].
22. Kalderis D., Juhasz A.L., Boopathy R., Comfort S. (2011), Soils contaminated with explosives: Environmental fate and evaluation of state-of-the-art remediation processes. *Pure Appl. Chem*. Vol. 83. No. 7. pp. 1407-1484. DOI:10.1351/PAC-REP-10-01-05 [in English].
23. The Diffusion Model Based on the Exudation Mechanism of the Explosives in the Landmine. https://2020/igem.org/-Team:NEFU_China/Model [in English].
24. Report on the implementation of the research work "Justification of the feasibility of using unmanned aerial vehicles of the copter type equipped with a module for chemical search, detection and identification of mine explosive devices", code "Vulture" (final report). 2023. p. 165.

FORECASTING THE DETECTION OF EXPLOSIVE VAPORS IN THE PLACES OF INSTALLATION OF EXPLOSIVE DANGEROUS DEVICES ON THE BASIS OF A MATHEMATICAL MODEL

I. Martyniuk, O. Stadnichuk, N. Huzyk, A. Karshen, Ye. Shmatov, T. Pogrebnyak

Most research on this topic focuses on the around the technological development of devices capable of effectively detecting mines at a selected point within the territory, while the very strategy of rapid search, accurate detection and research in this direction is not sufficiently studied. The development of new technologies for search, detection and clearance is quite difficult due to the diversity of terrain and environmental conditions where mines are laid, as well as the wide range of mine types. Therefore, the issue of finding appropriate methods, techniques, sensors for detecting explosive objects on the ground and a model for predicting the presence of explosive vapors in the soil and air around mines or explosive objects remains quite relevant. The purpose of the study is to substantiate a mathematical model for predicting the detection of explosive vapors in the areas where mines and explosive objects are installed. To achieve this goal, it is necessary to analyze the processes that affect the migration (transportation) of explosives in soils; to build a mathematical model of the dependence of the concentration of explosive vapors on the distance to the source and time, and to substantiate the correctness of the solution obtained using examples. The paper analyzes the properties (characteristics) of explosives and the processes that affect their spread on a horizontal plane in the case of a landmine. It was found that an important characteristic that affects the flux of explosive chemical signatures on the soil surface is the soil-air partition constant, and that the largest mass of characteristic chemicals for mine detection will be present on the soil surface rather than in the air above it. The model for predicting the detection of explosive concentrations at the soil-air interface can potentially be used in conjunction with the vapor phase concentration detected by the sensor(s) to back-calculate the depth of the mine and the scanning height of the chemical sensor. The results obtained can be used to study the following mathematical model that will describe the presence of explosives in the air at the site of a mine or near explosive objects

Keywords: explosives, explosive objects, mines, TNT, DNT, migration, diffusion, adsorption, mathematical model, prediction of vapor detection.