

УДК 623.959.3



С. В. Костиря



М. В. Ткач

ЛАЗЕРНІ СИСТЕМИ ЯК ЗАСІБ ВИЯВЛЕННЯ ТА ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ: СВІТОВИЙ ДОСВІД

У статті досліджено можливості використання лазерних технологій для виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів, проаналізовано сучасні підходи, технічні рішення і результати наукових досліджень у цій сфері, оцінено перспективи інтеграції лазерних систем у комплексні методи протимінної діяльності та підвищення рівня безпеки проведення гуманітарного розмінування.

К л ю ч о в і с л о в а: лазерні системи, лазерний промінь, вибухонебезпечні предмети, розмінування.

Постановка проблеми. Проблема розмінування територій залишається однією з найгостріших задач ХХІ століття. Велика кількість мін досі становить смертельну загрозу в понад 70-ти країнах світу, перешкоджаючи поверненню населення, сільськогосподарському використанню земель і процесам екологічного відновлення. Традиційні технології виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) хоч і ефективні, але мають суттєві обмеження. Вони повільні, вимагають безпосереднього контакту з потенційно небезпечними ділянками, не завжди здатні виявити пластикові міни, у них високий відсоток хибних спрацьовувань. Тому зростає актуальність розвитку інноваційних методів дистанційного виявлення ВНП.

Перспективною є система лазерної нейтралізації боєприпасів ZEUS-HLONS (HMMWV Laser Ordnance Neutralization System). Вона нейтралізує боєприпас, фокусуючи лазер на його зовнішній оболонці. Це нагріває вибуховий наповнювач до займання, що призводить до швидкого згоряння або дефлаграції вибухової речовини, нейтралізуючи таким чином боєприпас, незалежно від типу використаного детонатора. Отриманий вибух мінімізує побічні збитки та захищає персонал і обладнання. Дальність ураження цієї системи на відстані рятує життя на полі бою.

Ще одним перспективним напрямом є лазерно-акустичне зондування. Розробка В'ячеслава Аранчука з Національного центру фізичної акустики (NCPA) Університету Міссісіпі, яка отримала назву LAMBDIS (Laser Multibeam Differential Interferometric Sensor), демонструє значний прорив у цій галузі. Нова система поєднує точність лазерної інтерферометрії з безконтактним збудженням вібрацій у ґрунті, що дозволяє отримувати детальну картину підповерхневих аномалій і оперативно ідентифікувати потенційно небезпечні об'єкти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічно виділяють два класи застосувань лазерів у протимінній діяльності: 1) ідентифікація – віддалені спектроскопічні методи, LIDAR (технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах); 2) нейтралізація / деструкція – високопотужні лазерні системи для локального нагріву, випаровування чи створення «розриву» в корпусі ВНП.

Інтерес до лазерів у секторі гуманітарного розмінування зростає завдяки розвитку високопотужних джерел, компактних діодних і волоконних лазерів, а також просуванню від лабораторних демонстрацій до демонстраційних проектів / пілотів. Але практичне застосування знаходиться поки що на етапі прототипів або полігонних випробувань.

Останні дослідження підтверджують ефективність спектроскопії лазерно-індукованого пробою для швидкої класифікації ВНП. Поліпшення досягається комбінуванням із машинним навчанням (нейронні мережі) для підвищення точності класифікації. Основними перевагами є дистанційний (безконтактний) аналіз і мінімальна підготовка зразка. Обмеженням можуть бути певні атмосферні умови, що ускладнює розрізнення.

Помітна тенденція при комбінації сенсорів (мультимодальні підходи): поєднання спектроскопії лазерно-індукованого пробою / гіперспектра / машинного навчання для зменшення хибних спрацьовувань та підвищення надійності. Лазерні технології для виявлення ВВП (особливо спектроскопія лазерно-індукованого пробою у парі з машинним навчанням та LIDAR для картографування) демонструють реальний прогрес і перспективи дистанційної ідентифікації.

Метою статті є дослідження можливостей використання лазерних технологій як інноваційного засобу для виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів, аналіз сучасних підходів, технічних рішень і результатів наукових досліджень у цій сфері, а також оцінювання перспектив інтеграції лазерних систем у комплексні методи протимінної діяльності та підвищення рівня безпеки проведення гуманітарного розмінування.

Виклад основного матеріалу. В основі дії лазера покладено принцип вимушеного випромінювання, передбачений Ейнштейном у 1917 році. Він полягає в тому, що за певних умов атом, насичений енергією, зіштовхується з фотоном, але не поглинає його, а випромінює новий фотон, за своїми характеристиками ідентичний ініціюючому. Щоб це відбувалося стабільно, важливо, аби більшість атомів перебували у збудженому стані. Крім того, необхідно обгорнути середовище, у якому відбувається процес, дзеркальною поверхнею, що відбиватиме фотони. Завдяки цьому їхня кількість у генераторі буде постійно множитися, після чого достатньо просто залишити для них єдиний вузький отвір, який і створить промінь інтенсивного випромінювання.

Поляризація лазерного променя дозволяє якісно і точно його заломлювати та відбивати. Саме тому на виході зазвичай встановлюють допоміжні прилади у вигляді призми, дзеркал, лінз і їхніх комбінацій. Прикладом може бути оптоволоконний кабель, який по суті є надзвичайно видовженим дзеркалом. Мерехтіння лазерного променя в ньому відбувається мільйони разів і передає інформацію на велетенській відстані. Однак отримати лазерний промінь із заданими характеристиками не так просто. Квантовий генератор складається з трьох головних частин: системи накачування, активного середовища та оптичного резонатора. При цьому конструкція кожного з цих елементів може варіюватися залежно від типу пристрою. Система накачування здебільшого являє собою лампу, здатну випромінювати фотони – зазвичай імпульсну чи дугову. Хоча також може використовуватися й електричний розряд, інший лазер, сонячне світло, хімічна реакція та навіть вибух. Активне середовище – це, власне, ті атоми, що будуть ініціюватися фотонами та випускати їхні «копії». Воно поміщається всередину оптичного резонатора. Дзеркальну поверхню останнього підбирають таким чином, щоб вона ефективно відбивала фотони саме тієї довжини та поляризації, які треба посилити.

Існують чотири типи лазерів. Найголовнішою складовою кожного лазера є саме активне середовище. Воно визначає не тільки те, яку довжину хвилі матиме лазер, але й яке джерело накачування та оптичний резонатор для нього треба використовувати. Це середовище може перебувати в одному з чотирьох основних станів речовини: твердому, рідкому, газоподібному та плазмовому. Лазери класифікують саме за типом активного середовища. Але одночасно всередині кожного з основних типів існує безліч різновидів, що часто використовуються як основна технічна характеристика лазера. Наприклад, у твердотільних лазерах переважно використовують як активне середовище кристал або скло, від якого вони й отримали свою назву (рис. 1).

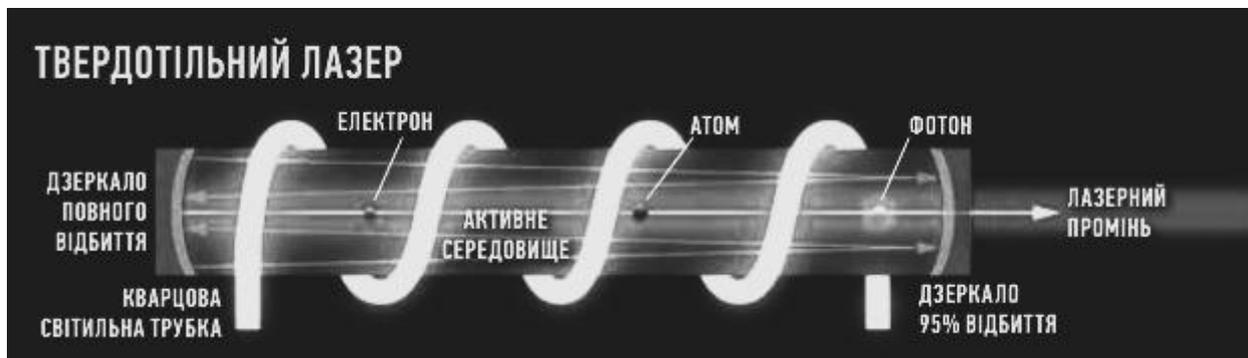


Рисунок 1 – Принцип дії твердотільного лазера

Перший лазер, створений Теодором Майманом, належав саме до цього типу. Фотони в ньому генерувалися всередині рубіна. До газозфазних лазерів належать аргонові, неонові, криптоніві, азотні й інші подібні лазери (рис. 2).

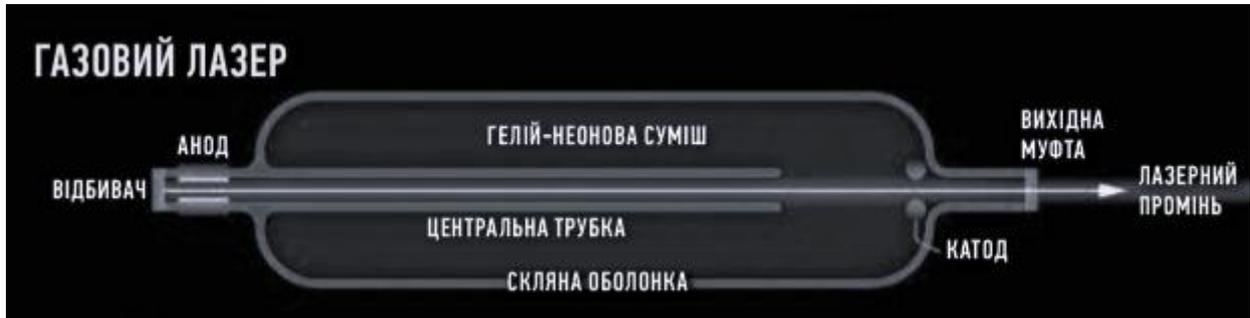


Рисунок 2 – Принцип дії газового лазера

Лазери на вільних електронах взагалі не мають активного середовища. Фотони в них формуються у вакуумі (рис. 3). Джерелом накачування у цих пристроях є потік електронів, а аналогом оптичного осцилятора – спеціальний набір магнітів, який називається ондулятором. Він примушує заряджені частинки коливатися таким чином, аби вони постійно втрачали енергію та випромінювали фотони.



Рисунок 3 – Принцип дії лазера на вільних електронах

Рідкофазні лазери – це лазери на різних барвниках (кумарин, родамін тощо) (рис. 4).

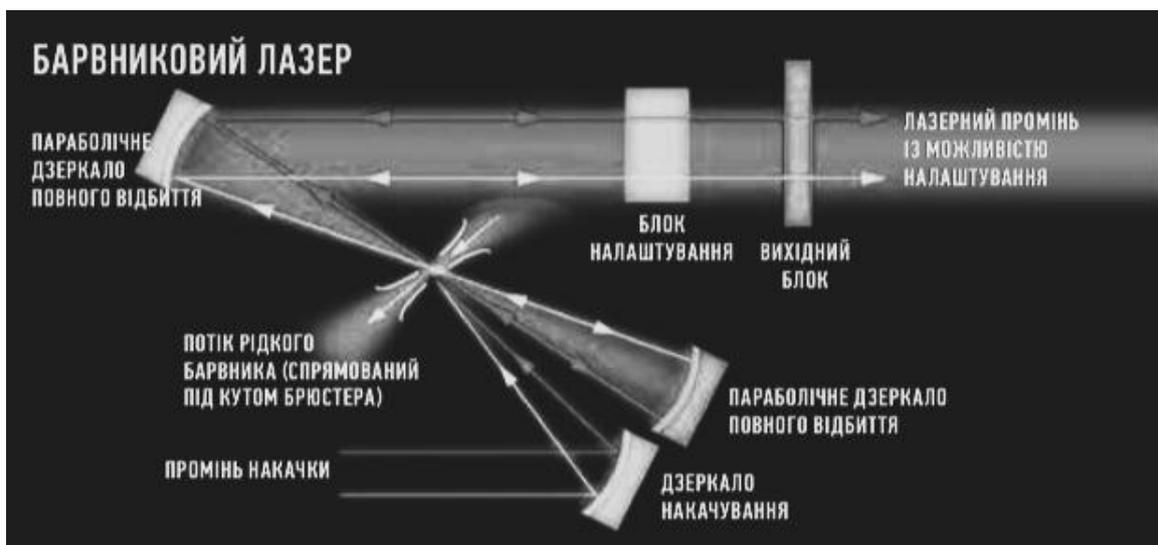


Рисунок 4. Принцип дії барвникового лазера

Ідея лазерної зброї базується на тому, що лазер є вузьким променем когерентного випромінювання. Через це він, на відміну від сонячних променів, здатний тривалий час не збільшуватись у діаметрі. Коли промінь зберігає певний діаметр, у ньому забезпечується потрібна густина енергії. Що таке велика кількість світлової енергії, сконцентрована в одному місці, добре демонструє експеримент із Сонцем, збільшувальним склом і будь-яким легkozаймистим предметом. Лазерна зброя діє так саме, але на відстані багатьох кілометрів. Саме тому з позиції фізики лазер не може різати у прямому сенсі цього слова. Він прицільно випалює, плавить і випаровує матеріал, і лише висока точність його дії дозволяє порівняти її з процесом різання. Однак забезпечити на відстані десятків кілометрів таку густину енергії променя, щоб із бронею ворожого танку вчинити так само, як із дерев'яною планкою на відстані 10 см, вкрай важко. Тому, хоча проекти лазерів, що можуть фізично знешкоджувати ворожу техніку й особовий склад, існують давно, більшість зразків озброєння застосовують м'якші способи впливу [1].

Перевагами застосування лазерного променя є низька вартість «пострілу» та застосування на відстані без ризику для саперів. Промінь лазера поширюється зі швидкістю світла, гравітація практично не впливає на його точність, на відміну від кулі. Потужність лазера та діаметр його променя можна легко змінювати, управляючи способом ураження. Крім того, боєкомплект у цьому випадку визначається виключно кількістю енергії. Однак і проблеми у лазерів достатньо значні. Передусім це стосується розсіювання лазерного променя. Чим густіше середовище, тим сильніше спадає густина енергії з відстанню. Тому туман, дим і дощ суттєво знижують їхню ефективність. Ще одна велика проблема: для того, аби лазерний промінь уразив ціль, значна частина його енергії має бути нею поглинута. А вона може бути ще й розсіяна та відбита. І те, у яких пропорціях ці три фізичні явища відбуваються, залежить не лише від характеристик лазера, але й від самої цілі. Нарешті, у лазерів неймовірно великі потреби в електроенергії [2, 3].

На початку XXI століття багато країн зацікавилися реалізацією лазерної зброї у варіантах переважно для автомобільної техніки. У 2000-х роках Сполучені Штати успішно випробували в Іраку та Афганістані систему лазерної нейтралізації ZEUS.

Багатоцільова колісна машина ZEUS-High Mobility Multi-purpose Wheeled Vehicle (HMMWV) та система лазерної нейтралізації боєприпасів або ZEUS-HLONS (HMMWV Laser Ordnance Neutralization System), розроблена Командуванням космічної та протиракетної оборони / Стратегічним командуванням армійських сил США.

ZEUS, автономна твердотільна лазерна система на неброньованому HMMWV, була представлена у грудні 2002 року на симпозіумі Асоціації Армії США в Ель-Пасо, штат Техас. На відстані 200 м вона використовувала лазерний промінь для нагрівання цілі, контролювано запалюючи боєприпас, що зменшувало побічні збитки. Крім того, завдяки системі ZEUS особовий склад, який знешкоджував саморобні вибухові пристрої, отримав можливість не полишати транспортний засіб, уникаючи ризику снайперського вогню.

Система ZEUS була першою потужною лазерною збройною системою, розгорнутою в зоні бойових дій на авіабазі Баграм в Афганістані та поблизу неї, що ефективно продемонструвала її можливості боротьби з мінами. Протягом шести місяців перебування в зоні бойових дій система ZEUS, оснащена лазером потужністю 0,5 кВт, нейтралізувала 211 російських боєприпасів десяти різних типів, розкиданих навколо баз та вздовж узбіч доріг; 51 з них було знищено за 100 хв, що стало рекордом зі знешкодження боєприпасів [4].

Система RADBO, яка включає систему спрямованої енергії ZEUS від Parsons, дозволяє знищувати боєприпаси, які не вибухнули, зсередини транспортних засобів із захистом від мінної засідки (MRAP) на відстанях, що можуть перевищувати 300 м за оптимальних умов. У 2024 році ця система була застосована в оперативному режимі на тристоронніх спільних навчаннях Core North 24 в Індо-Тихоокеанському регіоні, де вона продемонструвала 100 % ефективність та успішне виконання завдання зі швидкого очищення аеродрому після атаки.

Система складається з лазера потужністю 3 кВт, напрямника променя, станції оператора та допоміжних підсистем, автономних, на одному транспортному засобі. Вона повністю відповідає вимогам військової техніки (високі та низькі температури, електромагнітні перешкоди, піщані / пилові хвили, дощ, туман та дорожній режим) і за час розгортання пододала понад 2000 миль по пошкоджених дорогах без збоїв. ZEUS продемонструвала інтеграцію як на платформах HMMWV, так і на MRAP, також вона може інтегруватися з іншими платформами з відповідною потужністю та вантажопідйомністю.

ZEUS здатна знешкоджувати більш ніж 50 різних типів боєприпасів (міни, вдосконалені звичайні боєприпаси, мінометні снаряди, гвинтівкові гранати, ракети та артилерійські снаряди), від малих пластикових мін до великих товстостінних 155-міліметровими снарядами та 500-фунтових бомб загального призначення. На сьогоднішній день нейтралізовано понад 4000 боєприпасів з ефективністю понад 99 % [5].

Німецький оборонний концерн Rheinmetall ще з 2000-х працює над стаціонарними та мобільними варіантами системи HEL (High Energy Laser). Основою їхньої лазерної зброї є оптико-волоконні джерела лазерного випромінювання, які забезпечують високу потужність (від 5 кВт до 100 кВт), надійність (кілька десятків тисяч «пострілів») та низьку вартість «пострілу» (від одного до кількох євро). Як стверджують розробники, вже нині їх лазери спроможні посилити захист від малих та середніх БПЛА, вертольотів, ракет, мін та артилерійських снарядів.

Ще у 2012 році фахівці Rheinmetall у присутності міжнародних експертів випробували два лазери потужністю 20 кВт та 30 кВт. З відстані одного кілометра вони за секунди перерізали сталеву балку товщиною 15 мм та знищили групу дронів, що летіли зі швидкістю 50 м/с на відстані 2 км. За допомогою спеціальної технології накладання променя лазери синхронно фокусувалися на одній точці й видавали сумарно 50 кВт. А 30-кіловатна лазерна система продемонструвала здатність самостійно відстежувати, націлюватися та знищувати сталеві кулі з вибухівкою діаметром усього 82 мм, що летіли зі швидкістю 50 м/с.

Пізніше, на виставці IDEX-2015, компанія продемонструвала мобільний варіант системи HEL. Лазер потужністю 20 кВт встановили на багатоцільову броньовану машину Boxer 8×8 MRAV. Дальність його ураження сягала 3000 м. За заявами розробників, така система здатна виводити з ладу оптико-електронні системи, БПЛА, знищувати боєкомплект систем озброєння, вибухові пристрої, нерозірвані боєприпаси тощо. Платформами для лазерів HEL різної потужності (від 5 кВт до 50 кВт) також стали гусеничний БТР RUAG Defence M113 та захищена вантажівка підвищеної прохідності Tatra 8×8.

У 2019 році розробники продемонстрували оновлений варіант своєї зброї. Нова модульна установка дозволяла об'єднувати кілька лазерів потужністю 20 кВт у єдиний промінь. Під час тестування вона успішно вражала безпілотники й мінометні міни, а найважливіше – стала сумісною з зенітним артилерійським комплексом MANTIS, що перебуває на озброєнні Бундесверу [6].

Для Ізраїлю, зважаючи на напружену обстановку, створення нових зразків ефективної зброї – життєва необхідність, а лазерна зброя – ще один засіб, що допоможе істотно підвищити ефективність захисту повітряного простору. Тож створювати цю «зброю майбутнього» почали ще з початку 90-х років минулого сторіччя.

На виставці військових технологій Military & Defence Exhibition у Південній Кореї відома ізраїльська оборонна компанія Rafael Advanced Defense Systems продемонструвала лазерну систему Iron Beam, призначену для захисту від ворожих ракет, артилерійських снарядів та безпілотних літальних апаратів. За даними Rafael, система Iron Beam може сфокусувати на цілях лазерний промінь потужністю до 100 кВт. Таке озброєння може бути змонтоване на легких транспортних засобах і розгорнуте в різноманітних оперативних зонах, дозволяючи протистояти широкому спектру загроз – від безпілотників і ракет до мінометних снарядів. Крім того, система може нейтралізувати ідентифіковані саморобні вибухові пристрої та інші наземні загрози, підвищуючи свою універсальність на полі бою.

Ізраїльські військові в березні 2022 року провели серію успішних випробувань Iron Beam, знищивши БПЛА, мінометні снаряди і протитанкові ракети. Iron Beam може захоплювати ціль зі швидкістю світла і знищити її за 5 с на відстані до 7 км. Її планують інтегрувати в Iron Dome, щоб забезпечити злагоджену роботу ракет-перехоплювачів і лазерних систем [7]. У вересні 2025 року Міністерство оборони Ізраїлю та оборонний концерн Rafael оголосили, що розроблення лазерної системи Iron Beam остаточно завершено. На презентованих кадрах можна побачити збиття не тільки безпілотників та реактивних снарядів, а й артилерійських мін. Зазначається, що до кінця цього року її вже готують до постачання та оперативного використання в Армії оборони Ізраїлю [8].

Туреччина також тривалий час розробляє інноваційні види озброєння. Перші зразки лазерної зброї її компанії демонстрували ще на початку 2010-х.

Один із найцікавіших сучасних зразків розробила компанія Roketsan. Комплекс Alka поєднує у собі лазерну та електромагнітну зброю, за допомогою якої виводить з ладу та знищує поодинокі чи групові цілі. Комплекс може використовуватися у стаціонарному режимі або встановлюватися на шасі

автомобілів підвищеної прохідності. На сайті виробника вказують, що «система направленої енергетичної зброї Alka нейтралізує або повністю руйнує цілі, як-от: імпровізовані вибухові пристрої, міни / мікро БПЛА, що перевозять різноманітні вантажі (камери, вибухівку тощо), а також здатна протидіяти нападам роїв дронів». Також зазначена можливість працювати вдень та вночі, самостійно виявляти цілі, автоматично наводитися та супроводжувати їх. В автоматичному режимі система здатна слідкувати за об'єктами, що рухаються зі швидкістю 150 км/год. Alka вибирає найбільш вразливу точку на цілі та має високу точність відстеження. Похибка складає всього 8 мм/км. Ефективна дальність ураження цілі лазером – 500 м, електромагнітною гарматою – 1 км.

Над розробленням бойових лазерів також працюють компанія Aselsan і Науково-дослідний центр інформатики та інформаційної безпеки (TUBITAK BILGEM). У червні 2018 року Aselsan продемонструвала бойову машину BMC Amazon, озброєну лазерною гарматою LSS, яка була здатна вражати малогабаритні БпЛА на відстані 500 м та вибухові пристрої на відстані 200 м. Aselsan показали відео, де вже серійний бойовий лазер пропалює металеві пластини різної товщини з достатньо високою швидкістю [9].

Дослідники з Університету Міссісіпі винайшли швидший та ефективніший метод виявлення протипіхотних мін, у якому використано лазери та акустичну вібрацію, що може врятувати тисячі життів. Ідея створення системи LAMBDIS виникла з прагнення знайти безпечніший спосіб виявлення ВВП, який би не потребував фізичного контакту з ними. Звичайні методи, як-от: металошукачі або наземні радары, не завжди ефективні. У складних ґрунтах або на забруднених ділянках вони видають багато хибних сигналів. До того ж вони потребують наближення людини до ВВП. Це створює певні ризики і уповільнює роботу. Головна ідея системи LAMBDIS – використання лазерного променя для вимірювання дуже дрібних рухів поверхні землі, які виникають у відповідь на спеціальні вібрації. Якщо під землею є твердий предмет, наприклад, міна, він «відгукується» на ці вібрації і спричиняє трохи інший рух ґрунту, ніж порожня або однорідна ділянка. Лазер «бачить» ці відмінності, завдяки чому можна зрозуміти, чи є щось підозріле під поверхнею.

На початку роботи над системою дослідник В'ячеслав Аранчук застосував просту схему з одним променем. Такий варіант був достатньо точним, але охоплював лише вузьку ділянку землі. Перевірка великої території потребувала багато часу. Згодом, у 2019 році, він отримав патент на вдосконалену модель, яку можна було закріпити на транспортному засобі. Це дозволило сканувати ґрунт у русі, набагато швидше і з більшим охопленням. Швидкість сканування досягала приблизно 16 км/год [10, 11]. Щоб розширити зону обстеження і зробити систему ще точнішою, була розроблена нова конфігурація з кількома лазерами, які працювали одночасно. Такий підхід дозволив бачити не тільки вузьку смугу, а цілу площу, формуючи зображення об'єктів, які знаходяться під землею. Це особливо важливо на місцевості зі складним рельєфом, кущами чи іншими перешкодами.

Значну роль у цьому методі відіграє також використання комп'ютерних алгоритмів, які можуть швидко аналізувати сигнали та навчатися розпізнавати, де – міна, а де – камінь або купа ґрунту. Для цього дослідники записували сотні прикладів і тренували систему розрізняти типові сигнали. Згодом вона почала працювати швидше і точніше, ніж будь-який оператор.

LAMBDIS працює так, щоб точно «бачити» те, що відбувається під поверхнею ґрунту, навіть у складних умовах або коли сама машина рухається по нерівному рельєфу. Система має спеціальний блок стабілізації, який дозволяє не втрачати точність під час вимірювань. Він допомагає утримувати лазери у відповідному положенні навіть тоді, коли все навколо рухається та трясеться. Завдяки цьому дані залишаються точними, а зображення чітким.

Нова версія системи LAMBDIS не просто збирає дані, вона здатна навчатись. Кожного разу, коли вона помічає якусь відмінність, запам'ятовує її. З часом система розуміє, які сигнали відповідають каменю, металевим предметам або іншим типам об'єктів. Тобто чим більше вона працює, тим краще розпізнає міну серед інших речей. Лазери направляються на ґрунт з певної відстані, зчитують коливання, а потім комп'ютер обробляє отриману інформацію і видає карту потенційно небезпечних місць [12, 13, 14].

Порівнюючи зі звичайними металодетекторами, система LAMBDIS має низку переваг. Її функціонування не залежить від наявності металу в об'єкті. Це робить її надзвичайно ефективною у виявленні пластикових мін, які часто залишаються невидимими для стандартних засобів розмінування. Оскільки система аналізує фізичну відповідь ґрунту, а не його хімічний або електромагнітний склад, вона не видає хибних сигналів від сторонніх предметів. Ще одна важлива перевага – здатність працювати дистанційно. Оператори можуть залишатися в безпечному місці, керуючи системою зі

спеціальної мобільної платформи. Це суттєво знижує ризик травмування фахівців. Завдяки широкому охопту і високій швидкості обробки сигналів система LAMBDIS здатна значно скоротити час, необхідний для обстеження великої території.

За даними світової статистики, кількість постраждалих внаслідок мінних інцидентів зростає. Це свідчить про недостатню швидкість та ефективність розмінування і необхідність впровадження нових технологій. LAMBDIS може стати важливим інструментом у цьому процесі. Її використання дозволяє не лише пришвидшити очищення територій, а й зменшити витрати на розмінування. Впровадження автоматизованої технології здатне оптимізувати ресурси та збільшити кількість безпечних гектарів за одиницю часу. У країнах, де міни залишаються активною загрозою десятки років після завершення конфлікту, така система може змінити підходи до відновлення інфраструктури на небезпечних територіях. Наприклад, у сільських районах, що довгим часом не використовуються через мінну небезпеку, можливість швидкого визначення безпеки ґрунту створює умови для повернення земель до сільськогосподарського використання.

Незважаючи на очевидні переваги, технологія потребує подальшої оптимізації. Однією з проблем залишається потреба у калібруванні системи під різні типи ґрунтів. Різна структура, вологість, наявність природних включень можуть впливати на вібрацію, тому система має вміти адаптувати свої алгоритми до локальних умов. Також актуальним напрямом є вдосконалення програмного забезпечення, що аналізує вібраційні дані. Використання елементів штучного інтелекту для навчання на реальних вибірках замінованих територій може значно підвищити точність розпізнавання об'єктів і зменшити час обробки даних. У перспективі можлива інтеграція LAMBDIS у комплексні платформи, наприклад, безпілотні наземні або повітряні системи, які самостійно здійснюють розвідку місцевості, приймають рішення та позначають вибухонебезпечні предмети на карті.

Крім технічної сторони, розроблення LAMBDIS має вагоме соціальне та гуманітарне значення. Вона є прикладом того, як фундаментальні дослідження з фізики можуть безпосередньо сприяти порятунку людських життів. Впровадження нової системи може дати імпульс для міжнародних програм з розмінування, зокрема в межах проєктів, що координуються Європейським Союзом. Доступ до нових технологій розмінування особливо важливий для країн з обмеженими ресурсами. Якщо система LAMBDIS буде запущена у масове виробництво, її мобільна версія може стати основним елементом оснащення гуманітарних місій. Це дозволить державам, де є заміновані території, самостійно реалізовувати програми з їх очищення, не покладаючись виключно на міжнародну допомогу.

Висновки

Сучасні лазерні системи поступово стають важливим елементом у сфері розмінування, бо поєднують у собі безпеку, точність і технологічну ефективність. Їхня головна перевага полягає у тому, що людині не потрібно фізично наближатися до міни чи іншого вибухонебезпечного предмета. Промінь лазера може діяти з великої відстані, швидко і точно. Це не тільки зменшує ризики для саперів, а й відкриває можливості для використання автоматизованих або дистанційно керованих систем, які можуть працювати в складних умовах.

Традиційні методи розмінування потребують багато часу. Вони не завжди можуть виявити пластикові міни або снаряди, що лежать глибоко у ґрунті. У багатьох випадках оператор змушений покладатися на недосконалі дані, що призводить до хибних спрацювань або небезпечного наближення до вибухівки. Тому виникає потреба у впровадженні нових методів, як-от: лазерна нейтралізація або лазерно-акустичне виявлення.

Система ZEUS-HLONS є прикладом практичного застосування лазера для знешкодження боеприпасів. Вона встановлюється на звичайну армійську машину і працює в польових умовах. Завдяки здатності зосереджувати енергію в одній точці, система може нагрівати боеприпас до того моменту, поки вибухова речовина не згорить або не зруйнується без загрози для оточення. Подібні системи були особливо ефективними під час бойових дій у Іраку та Афганістані, де вони знешкоджували сотні боеприпасів за лічені хвилини, не піддаючи ризику життя солдатів.

Система LAMBDIS – технологія, що поєднує лазерне зондування з аналізом вібрацій ґрунту. Вона дозволяє обстежувати великі території значно швидше, ніж людина зі звичайними інструментами, і робити це без фізичного контакту з землею. Система LAMBDIS – це приклад того, як лазерні технології виходять за межі військового призначення і перетворюються на гуманітарний інструмент. Особливої цінності така система набуває у країнах, де великі території лишаються забрудненими внаслідок

бойових дій. Це прискорює повернення земель до сільського господарства, будівництва або використання місцевими громадами.

Попри всі переваги, лазерні системи потребують удосконалення. Їм заважають погодні умови (туман чи дощ). Також існує проблема великого енергоспоживання, особливо для потужних лазерів. Крім того, вони мають адаптуватися до різних типів ґрунтів і поверхонь, щоб не втрачати точність. Але ці виклики поступово долаються, з'являються нові джерела енергії. Адаптивні алгоритми та модульні конструкції дозволяють зменшувати ці обмеження з кожним роком. Загалом лазерні системи не тільки можуть доповнювати традиційні методи розмінування, вони змінюють підхід до безпеки на небезпечних територіях, зменшують участь людини у небезпечній роботі, підвищують швидкість очищення та знижують вартість розмінування. Саме тому такі технології варті уваги, інвестицій і подальшого впровадження у сферу гуманітарного розмінування.

Перелік джерел посилання

1. Промені смерті. Теорія та практика лазерної зброї, 2024. URL:<https://universemagazine.com/promeni-smerti-teoriya-ta-praktyka-lazernoji-zbroji/> (дата звернення: 28.07.2025).
2. The promise and problems of laser weapons, 2001. URL: <https://www.airandspaceforces.com/article/1201lasers/> (дата звернення: 28.07.2025).
3. Directed-Energy Laser Devices – Advantages and Challenges, 2021. URL: <https://www.ophiropt.com/blog/directed-energy-laser-devices-advantages-and-challenges/> (дата звернення: 17.07.2025).
4. SMDC History: Zeus-HLONS meets the challenge, 2017. URL: https://www.army.mil/article/184327/smdc_history_zeus_hlons_meets_the_challenge (дата звернення: 05.08.2025).
5. Laser Neutralization System, 2025. URL: <https://www.parsons.com/products/zeus/> (дата звернення: 06.08.2025).
6. K. Ludewigt, Th. Riesbeck, Th. Baumgärtel, J. Schmitz, A. Graf, M. Jung Mobile and stationary laser weapon demonstrators of Rheinmetall Waffe Munition // Proceedings Volume 9251, Technologies for Optical Countermeasures XI; and High-Power Lasers 2015: Technology and Systems; 92510N (2015). DOI:<https://doi.org/10.1117/12.2071818>. Event: SPIE Security + Defence, 2015, Amsterdam, Netherlands.
7. Ilan Berman. The Logic of Israel's Laser Wall // National Institute for Public Policy, Information Series. No. 526. June 23. 2022.
8. Israel's «Iron Beam» fully operational to hit missiles along with drones, 2025. URL:<https://www.jpost.com/israel-news/defense-news/article-867735> (дата звернення: 15.08.2025).
9. Лазери проти дронів, 2021. URL:<https://armyinform.com.ua/2021/04/28/lazery-proti-droniv/> (дата звернення: 15.08.2025).
10. V. Aranchuk, I. Aranchuk, B. Carpenter, C. Hickey, D. Kleinert, H. Buchanan, J. D. Heffington. Laser multi-beam differential interferometric sensor for acoustic detection of buried objects // Proceedings Volume 10628, (2018). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2304663>.
11. V. Aranchuk, S. Johnson, I. Aranchuk, C. Hickey. Laser Doppler multi-beam differential vibration sensor for real-time continuous visualization of buried objects in multiple frequency bands // Applied Optics Vol. 62, Issue 23, pp. 12–17 (2023). DOI:<https://doi.org/10.1364/AO.486839>.
12. Ning Xiang, J. M. Sabatier. Laser Doppler vibrometer-based acoustic landmine detection using the fast M-sequence transform IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 1, Issue 4, October 2004, pp. 292–294. DOI: <https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.836257>.
13. C. P. Gooneratne, S. C. Mukhopahyay and G. Sen Gupta. A Review of Sensing Technologies for Landmine Detection: Unmanned Vehicle Based Approach // 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents December 13–15, 2004, Palmerston North, New Zealand, pp 401–407.
14. R. Haupt. Acoustic-laser land mine detection: Operationally enabling technologies. The journal of the acoustical society of America. Vol. 123. Issue 5. 2008. DOI:<https://doi.org/10.1121/1.2932731>.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025 р.

UDC 623.959.3

S. Kostyria, M. Tkach

LASER SYSTEMS AS A MEANS OF DETECTING AND NEUTRALIZING EXPLOSIVE ORDNANCE: WORLD EXPERIENCE

Nowadays, laser technologies are actively developing, and dozens of countries are investing in the creation of new systems based on them. The idea behind laser weapons is based on the fact that a laser is a narrow beam of coherent radiation. Because of this, unlike solar rays, it is capable of maintaining its diameter for a long time without spreading. When the beam maintains a specific diameter, the required energy density is ensured within it. The effect of such a large amount of light energy concentrated in one place is well demonstrated by the experiment involving the sun, a magnifying glass, and any flammable object. A laser weapon is a way to achieve the same result, but at a distance of many kilometers. That is why, from a physics perspective, a laser cannot «cut» in the direct sense of the word. It precisely burns out, melts and evaporates the material. One of the promising directions is the use of lasers for the detection and neutralization of explosive ordnance (EO), which is especially relevant during and, more significantly, after armed conflicts. Laser systems have many advantages. The main advantage is non-contact operation: the sapper does not approach the mine, thereby saving lives. The laser beam is very precise and instantaneous because it travels at the speed of light and is not affected by gravity, unlike, for example, a bullet. Also, a laser system doesn't require any projectiles, which simplifies logistics, as there is no need to store, transport, or replenish ammunition. A single laser "shot" is many times cheaper, making its use cost-effective. Thanks to their small size, some lasers can even be installed on small drones or remotely controlled platforms, which is ideal for working in hard-to-reach or dangerous areas. Despite this, laser technology still has certain limitations. For example, its effectiveness is reduced in conditions of heavy rain, dust, or fog, and it also requires a powerful and stable energy source. But modern science is moving fast: companies and nations are investing heavily in solving these problems.

Thus, laser systems are a modern alternative to traditional demining methods. This is the technology of the future that can significantly enhance safety, reduce human casualties, accelerate the clearance of territories, and make the process considerably cheaper. Implementing laser systems in the demining process will make it faster and safer.

К e y w o r d s: laser systems, laser beam, explosive ordnance, demining.

Костиря Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, старший офіцер відділу досліджень проблем протимінної діяльності Центру досліджень Державної спеціальної служби транспорту.
<https://orcid.org/0000-0001-5215-080X>

Ткач Марина Володимирівна – інженер відділу досліджень проблем протимінної діяльності Центру досліджень Державної спеціальної служби транспорту.
<https://orcid.org/0009-0001-1478-004X>