The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

Received: *September 14, 2025* | **Revisions Requested:** - | **Revision Received:** -
Accepted: *November 17, 2025* | **Published Online:** *March 21, 2026*

Licensed (C) by Creative Commons Attribution International License 4.0 (CC BY-NC-SA)

DOI: 10.62524/msj.2025.3.4.18

Сучасні методи утилізації боєприпасів: міжнародні стандарти, технологічні підходи та перспективи розвитку

Євген Хоменко
аспірант
начальник Центру досліджень
Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту
e-mail: ek70282@gmail.com
ORCID: 0009-0006-7006-3439

Віктор Рибалка
начальник відділу підготовки персоналу
Державна спеціальна служба транспорту
e-mail: fischmak@gmail.com
ORCID: 0009-0008-6344-5791

Сергій Костиря
кандидат технічних наук
старший офіцер відділу досліджень проблем протимінної діяльності
Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту
e-mail: kostyrya81@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5215-080X

Марина Ткач
інженер відділу досліджень проблем протимінної діяльності
Центр досліджень Державної спеціальної служби транспорту
e-mail: marina.tkach.1583@outlook.com
ORCID: 0009-0001-1478-004X

Анотація. Проблема утилізації боєприпасів посідає особливе місце у системі міжнародної безпеки. Основні методи знищення – це відкрите спалювання та детонація, вони забезпечують швидке та відносно дешеве вирішення проблеми, проте шкідливі для довкілля та здоров'я людей. Сучасний розвиток технологій і посилення міжнародних норм зумовили пошук альтернативних підходів, які б поєднували безпеку, екологічну та економічну доцільність. У статті розглянуто сучасні методи утилізації боєприпасів із фокусом на міжнародні стандарти, технологічні підходи та перспективи їх розвитку. Питання утилізації боєприпасів набуває особливої актуальності в умовах зростання обсягів неробочих, пошкоджених і старих боєприпасів, що становлять загрозу для безпеки людей і довкілля. Аналіз здійснено з урахуванням чинних міжнародних норм і практик, технічних рішень, які застосовуються в різних країнах, а також головних тенденцій у цій сфері. Окрема увага приділена екологічним та соціальним аспектам утилізації, оцінці впливу на довкілля і

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

потенційні ризики для населення. Метою статті є комплексний огляд міжнародних стандартів у сфері утилізації боєприпасів, аналіз дослідницьких програм США та Європи, огляд методів демілітаризації та характеристика основних технологій від розбирання до переробки. Особливу увагу приділено механічним та гідроструминним методам, закритому спалюванню, хімічним і окисним процесам, а також практикам відновлення ресурсів. Матеріал базується на огляді літератури, міжнародних програм, практичного досвіду та екологічних оцінок. Результати дослідження свідчать, що немає універсального методу утилізації боєприпасів: вибір технології залежить від типу матеріалу, наявної інфраструктури, вимог безпеки та екологічних стандартів. Перспективним напрямком є розвиток контрольованих окисних і хімічних методів, які забезпечують високий ступінь руйнування вибухових речовин та зменшення негативного впливу на довкілля. У майбутньому провідне значення матимуть інтегровані технологічні схеми, що поєднують етапи розбирання, видалення, знищення та переробки.

Ключові слова: надкритичне окиснення води, інсинерація, утилізація боєприпасів.

Вступ (Introduction)

У сучасному світі питання щодо демілітаризації та утилізації боєприпасів набуло особливої ваги. Воно стосується не лише військової сфери, а й безпеки цивільного населення, екології та міжнародної стабільності. На складах багатьох країн досі зберігаються величезні обсяги старих або пошкоджених боєприпасів, термін придатності яких давно минув. Крім того, після збройних конфліктів залишаються тисячі вибухонебезпечних предметів, що перетворюють цілі райони на небезпечні для життя території.

Тривалий час основним способом знищення таких боєприпасів було спалювання або підрив у відкритому просторі. Хоча це дозволяло швидко позбутися небезпечних запасів, наслідки для довкілля були катастрофічними: отруєння ґрунтів, забруднення повітря та води, підвищення ризику для людей. Сучасна наука та міжнародні норми дедалі активніше вимагають переходу до безпечних і контрольованих технологій, що дають можливість утилізувати вибухові речовини без шкоди для довкілля та людей.

Проблема демілітаризації сьогодні виходить за межі технічного завдання – вона стає соціальною та гуманітарною. Її вирішення потребує поєднання наукових знань та міжнародного досвіду, що гарантуватиме безпеку всіх учасників процесу. Для України, яка переживає наслідки масштабної війни, ця тема має особливе значення, адже від ефективності утилізації залежить швидкість відновлення територій.

Огляд літератури (Literature review)

Дослідження у сфері утилізації боєприпасів ведуться вже кілька десятиліть і за цей час сформувалася велика кількість наукових досліджень, технічних звітів та міжнародних проєктів. Ці матеріали відображають розвиток підходів від програм відкритого знищення до складних і високотехнологічних методів, що орієнтовані на екологічну безпеку та ресурсне відновлення.

Сполучені Штати Америки тривалий час залишаються лідером у сфері досліджень та практичного впровадження методів демілітаризації. Важливу роль відіграє програма технологій демілітаризації Joint Demilitarization Technology Program (JDTP), яка фінансує та координує інноваційні проєкти у сфері знешкодження та утилізації боєприпасів (рис. 1). У рамках цієї програми активно вивчалися методи надкритичного окиснення води, розплавленого сольового окиснення та електрохімічних процесів. JDTP дозволила зосередити ресурси на пошуку технологій, що здатні повністю знищувати органічні компоненти вибухових речовин без утворення токсичних побічних продуктів [1].

The Central Research institute
of the Armed Forces of Ukraine

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

Паралельно із проблемою звичайних боєприпасів постало питання щодо знищення запасів хімічної зброї. Це завдання потребувало ще більш суворих стандартів безпеки, що сприяло пошукам нових технологій, які здатні гарантувати повне руйнування токсичних речовин. Одним із результатів стало широке застосування гідролізу, а також тестування надкритичного окиснення води для хімічних реагентів. Дослідження у цьому напрямі мали важливе значення для загальної сфери демілітаризації, адже напрацьовані технології поступово почали застосовувати до боєприпасів із вибуховими речовинами.



Рисунок 1. Касетні елементи проходять автоматизований процес утилізації в Джопліні, Міссурі, США, 2012 р.

Джерело: розроблено автором на основі досліджень [2].

Європа також стикнулася із масштабними викликами у сфері демілітаризації. У відповідь було започатковано низку дослідницьких ініціатив, зокрема в межах Західноєвропейської асоціації озброєнь (WEAO). Одним із найбільш значущих проєктів стала програма Cooperative Environmental Program Agreement (CEPA), спрямована на вивчення альтернативних технологій знищення вибухових речовин. Європейські підходи відзначаються акцентом на екологічній безпеці та суворому контролі за викидами. Саме тут активно тестувалися методи плазмової технології, термічної десорбції та мокрого повітряного окиснення [2].

Ще одним важливим інструментом міжнародного рівня стала система інформаційної підтримки Munitions Information Demilitarization and Assessment System (MIDAS). Вона збирає та аналізує дані про характеристики боєприпасів, методи їх утилізації та результати застосованих технологій. Завдяки цьому користувачі отримують змогу оцінювати ефективність різних методів і планувати операції з урахуванням реальних ризиків. MIDAS фактично виконує функцію бази знань, яка сприяє стандартизації практик та поширенню найкращого досвіду [3].

Методологічна основа (Methodological Framework)

Метою статті є комплексний аналіз сучасних технологій демілітаризації боєприпасів із урахуванням міжнародних стандартів та дослідницьких програм. Основними завданнями є:

узагальнення досвіду провідних держав і міжнародних організацій; огляд наявних методів за етапами процесу;

характеристика ключових технологій, що застосовуються у сфері знешкодження;

визначення перспективних напрямів розвитку, які можуть забезпечити поєднання безпеки, економічної ефективності та впливу на екологію.

Актуальність проблеми зумовлюється кількома факторами:

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

величезні обсяги застарілих боєприпасів, накопичені по всьому світу, потребують обов'язкового знищення;

військові конфлікти створюють щоденний потік вибухонебезпечних предметів, які становлять загрозу для цивільного населення;

відкриті методи знищення, що активно застосовувалися в минулому, нині забороняються або обмежуються міжнародними угодами через їхній руйнівний вплив на екологію.

Актуальність також посилюється під соціальним тиском. Громадськість дедалі більше контролює питання стосовно екологічних стандартів і все менше приймає практику відкритих спалювань поблизу населених пунктів. Тому держави змушені інвестувати у закриті та високотехнологічні процеси, навіть якщо вони дорожчі.

Міжнародні стандарти є основою, на якій будуються національні стратегії демілітаризації. Документи НАТО, зокрема STANAG, регламентують підходи до зберігання, транспортування та знешкодження боєприпасів, орієнтуючись на військові завдання та вимоги безпеки. AASTP-1 визначає правила для арсеналів і складів, що дозволяють знизити ризики аварій і забезпечити правильне поводження з небезпечними матеріалами. У сфері гуманітарного розмінування ключову роль відіграють стандарти IMAS, серед яких IMAS 11.10 безпосередньо стосується знищення боєприпасів. Він встановлює мінімальні вимоги для проведення операцій у польових умовах, де на перший план виходять безпека цивільного населення та захист довкілля.

Такі стандарти формують універсальну систему, в межах якої відбувається обмін досвідом і розроблення спільних технологій. Вони не лише уніфікують підходи між різними країнами, а й створюють передумови для міжнародного контролю, де є ризик поширення вибухових матеріалів [4, 5].

Результати (Results)

Сучасні підходи щодо утилізації боєприпасів відзначаються різноманіттям методів, що відображають складність і багатостадійність цього процесу. Жоден із методів не є універсальним, а тому ефективна система демілітаризації передбачає комбінацію кількох технологій, які застосовуються послідовно або паралельно. В основі класифікації лежить поділ на етапи: розбирання та попереднє оброблення, видалення енергетичних матеріалів, знищення вибухових речовин і подальше відновлення та перероблення ресурсів (рис. 2).



Рисунок 2. Відходи, що утворюються внаслідок використання 66-мм легкої протитанкової зброї M72 (LAW)

Джерело: розроблено автором на основі досліджень [5].

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

Розбирання є заключним етапом більшості технологічних процесів. Воно передбачає вилучення корпусів, відокремлення детонаторів і підривачів, а також доступ до основного вибухового наповнювача. Попереднє оброблення охоплює підготовку всіх компонентів до подальшого знищення або перероблення.

Після розбирання настає етап вилучення вибухових речовин із корпусів. Це один із найнебезпечніших етапів, оскільки він пов'язаний із безпосереднім контактом із енергетичними матеріалами. Методи видалення можуть бути механічними, гідроструминними або комбінованими.

Знищення вибухових речовин є центральним етапом, оскільки саме він визначає рівень зниження ризиків для безпеки. Методи знищення можна умовно розділити на два типи: відкриті та закриті. Відкриті методи були найпоширенішими у XX столітті завдяки своїй простоті, проте зараз вони суттєво обмежуються. Закриті методи передбачають використання інсинераторів, хімічних реакторів, окисних камер та інших установок.

Фінальним етапом є відновлення та перероблення компонентів. Металеві елементи корпусів та деталей боєприпасів підлягають вторинному переробленню у металургійній промисловості. Частина вибухових речовин може бути перетворена на комерційні вибухівки для цивільного використання, а відпрацьовані компоненти будуть використовуватись в інших секторах промисловості.

Розбирання та видалення енергетичних матеріалів – один із найважливіших етапів ланцюга демілітаризації. На практиці розбирання поєднує інженерні рішення, заходи безпеки та спеціалізоване обладнання. Вибір конкретних методів визначається типом боєприпасу, фізичним станом корпусу, чутливістю вибухової речовини та умовами місця робіт.

Механічні методи розбирання передбачають операції безпосередньо з корпусом боєприпасу, а саме його розрізання, свердління, розкриття заглушок та видалення детонаторів. Ці операції можуть застосовуватись як у польових умовах, так і у відповідних приміщеннях. Головна перевага механічних методів полягає в їхній універсальності, однак вони потребують дотримання суворих норм безпеки та контролю технологічного процесу.

Обговорення (Discussions)

Розбирання боєприпасу відбувається в строгій послідовності, це дозволяє відтворити послідовність складання боєприпасу "назад", що робить можливим безпечне вилучення необхідних елементів. Пробивання та свердління використовуються там, де неможливо повністю розкрити корпус. Подрібнення та розрізання допомагають підготувати матеріали до подальшого перероблення.

Застосування роботизованої техніки дозволяє суттєво знизити ризики для оператора, оскільки небезпечні операції відбуваються в зоні дистанційного керування. Сучасні роботизовані комплекси поєднують маніпулятори з відеокамерами, датчиками тиску і температури, а також інструментами для розрізання і свердління.

Свердління дає змогу створити канал для вилучення наповнювача або введення реагентів для подальшого хімічного оброблення. Управління швидкістю обертання, вибір матеріалу свердла та охолодження є важливими параметрами для уникнення небезпечних реакцій.

Гідроструминні технології ґрунтуються на властивості високошвидкісного потоку рідини зрізати або вимивати матеріали без теплового впливу. Вони дозволяють промивати наповнювач боєприпасу у спеціальні контейнери для подальшого перероблення. Ці системи знижують теплові ризики, проте потребують ретельного збирання та очищення розчинів. Також використовують абразивні домішки у водяних струменях, які підвищують здатність системи працювати з товстими або армованими оболонками [6].

У зоні знищення енергетичних наповнювачів простежується чіткий поділ між простими та складними технологіями. Відкриті методи, такі як спалювання та детонація, залишаються

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

найпростішими, але неприйнятними у довгостроковій перспективі. Інсинерація (спалювання) у закритих установках із системами очищення газів стала одним із перших кроків до зниження негативного впливу термічного знищення.

Хімічні та окисні технології працюють у контрольованому середовищі. Надкритичне окиснення води (SCWO) [7] працює в умовах, коли вода переходить у надкритичний стан, втрачає чітку межу між рідиною та газом і стає універсальним середовищем для змішування органіки з окисником. У таких умовах органічні молекули практично миттєво окислюються до вуглекислого газу, води й неорганічних солей, що робить SCWO одним із найчистіших доступних методів мінералізації вибухових речовин. Проте експлуатація SCWO пов'язана із суттєвими технічними викликами: високі тиски та температури пред'являють вимоги до матеріалів корпусів реакторів, підвищують ризик корозії та ускладнюють обслуговування. Пілотні установки, реалізовані в рамках програм, таких як JDTP, продемонстрували високу ефективність для рідких і напіврідких потоків, але при цьому підкреслили потребу у комплексних рішеннях для управління корозійними процесами і побічними водними потоками.

Розплавлене сольове окиснення Molten Salt Oxidation (MSO) відрізняється здатністю утилізувати хлоровані та інші важко окиснювані сполуки шляхом їх інкорпорації у сольовий розчин, що знижує ризик утворення летких токсичних продуктів [8]. MSO показує хороші результати під час оброблення PBX та формуляцій із галогенованими домішками, але вимагає ретельної організації поводження з відпрацьованими солями, які накопичуються у процесі, і, знову ж таки, потребує стійких до агресивних середовищ матеріалів. Мокре повітряне окиснення (WAO) виявилося корисним для очищення стічних вод і концентратів після вимивання або гідролізу; поєднання WAO з біологічним доочищенням дозволяє знизити енергетичні витрати й адаптувати схему до локальних умов.

Електрохімічні методи, зокрема mediated electrochemical oxidation (MEO) [9, 10], привабливі для оброблення невеликих обсягів концентрованих розчинів: вони дають можливість уникнути високих температур і тисків, а контроль над процесом може бути доволі точним. Масштабування таких технологій, які здатні обробляти велику кількість твердих сумішей, поки що обмежене. Плазмові реактори та термічна десорбція застосовуються переважно як завершальний етап для остаточного руйнування дуже стійких домішок або для термічного перероблення шлаків. Ці технології дають змогу досягти високого ступеня очищення, але водночас є енергоємними і дорогими.

Експериментальні установки довели свою технічну придатність, але щоб вони працювали добре в реальних умовах, потрібно підготувати матеріал перед подачею в реактор і обробити після нього. Під час випробувань було встановлено, що успіх залежить від того, наскільки можна підлаштувати режим роботи під конкретний склад суміші: різні вибухові речовини (тротил, гексоген та вибухівка на основі пластиду) поводяться по-різному. Найкраще працюють комбіновані схеми, коли спочатку механічними або гідроструминними методами акуратно видаляють та підготовлюють начинку, а вже потім остаточно знищують її в хімічних або окисних реакторах. Такий багатоступеневий підхід знижує ризики для людей та довкілля, спрощує логістику і зменшує кількість небезпечних відходів, які згодом треба переробляти. Планування будь-якої системи слід починати з детальної характеристики партії боєприпасів, зокрема аналізу складових, оцінювання корозійного стану корпусів, визначення наявності домішок і потенційної токсичності продуктів перетворення.

Важливим практичним аспектом є питання, що стосується відновлення ресурсів. Металеві корпуси після відповідного оброблення можуть бути переплавлені, а в деяких випадках хімічні продукти перетворення вибухових речовин підлягають подальшій утилізації чи використанню в промисловості. Максимальне використання ресурсів та мінімізація відходів під час утилізації знижує економічні витрати за програмою демілітаризації.

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

Висновок (Conclusion)

Аналізуючи сучасні підходи до утилізації боєприпасів, можна дійти висновку, що ця проблема залишається однією з найактуальніших як для безпеки людей, так і для охорони довкілля. Накопичення застарілих боєприпасів створює довготривалу загрозу, особливо коли вони зберігаються у неналежних умовах. Вибухи, пожежі або витік токсичних речовин із пошкоджених корпусів можуть мати серйозні наслідки для населення. Саме тому підхід до утилізації поступово переходить від простої ліквідації до комплексного та керованого процесу.

У процесі вивчення проблем утилізації було встановлено, що традиційні методи знищення, такі як спалювання або підриви, є ефективними з точки зору швидкості, але створюють значні екологічні ризики. Вони супроводжуються утворенням шкідливих викидів, забрудненням повітря, ґрунтів та води, а також не дозволяють відновити цінні ресурси. Зважаючи на це, у сучасній практиці все частіше застосовуються інноваційні фізико-хімічні технології, які дають можливість не лише знешкодити вибухові речовини, а й повторно використати корисні компоненти.

Із досвіду США та країн Європейського Союзу можна дійти висновку, що найбільш перспективними є замкнені технологічні системи, де процес утилізації відбувається під повним контролем – від підготовки боєприпасів до перероблення корисних компонентів. До таких технологій належать надкритичне окиснення води (SCWO), розплавлене сольове окиснення (MSO) та електрохімічне окиснення (MEO). Ці методи вже підтвердили свою ефективність у промислових випробуваннях, забезпечуючи майже повне руйнування вибухових компонентів без утворення небезпечних побічних продуктів. Проте, спираючись на отриманий досвід, можна стверджувати, що для їхньої стабільної роботи необхідно вдосконалювати матеріали реакторів, покращувати захист від корозії та забезпечувати надійні системи очищення.

З огляду на зазначене вище можна констатувати, що сучасні технології утилізації боєприпасів повністю орієнтуються не на просте знищення, а на раціональне використання ресурсів. Принципи повторного використання, перероблення та відновлення мають стати основою для побудови технологічних схем, де боєприпаси розглядаються як джерело вторинної сировини, а не як відходи. Такий підхід відповідає світовим екологічним тенденціям і мінімізує вплив на довкілля.

Отже, для України питання щодо безпечної утилізації набуває особливої ваги. Масштаби забруднення територій після бойових дій потребують не тільки термінового реагування, а й розвитку власних потужностей для перероблення та утилізації боєприпасів. Це має поєднувати наукові розробки, промислові можливості та міжнародну співпрацю.

Рекомендації (Recommendations)

Стаття може бути корисною й цінною для фахівців із безпеки та оборони, інженерів і технологів, екологів та експертів з охорони навколишнього середовища, науковців та академічних дослідників, міжнародних організацій і гуманітарних груп, що займаються розмінуванням територій та безпекою.

Конфлікт інтересів (Conflict of Interest)

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів за тематикою статті.

Використані джерела

1. *Department of Energy (DOE) Munitions Technology Development Program Progress Report FY 1998.* (1999, March 15). Joint Department of Defense (DoD). https://www.governmentattic.org/33docs/JdodDOEmTDPPRfy98_1999.pdf

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

2. *Burning the Bullet Industrial Demilitarization Of Ammunition* https://www.smallarmssurvey.org/sites/default/files/resources/Small-Arms-Survey-2013-Chapter-9-EN.pdf
3. *Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions*. (2019). https://cswab.org/wp-content/uploads/2019/01/National-Academies-of-Sciences-Alternatives-for-Demil-of-Conventional-Munitions-2019.pdf
4. *Guide for the destruction of stockpiled anti-personnel mines*. (2013, June 6). https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_11.10_Ed.2_Am.6.pdf
5. Gronheim, A., & Chairman, Noaf. (2010, May). *Manual Of Nato Safety Principles For The Storage Of Military Ammunition And Explosives*. https://www.rasrinitiative.org/pdfs/AASTP-1-Ed1-Chge-3-Public-Release-110810.pdf
6. Wilkinson, Josh, & Watt, Duncan. (2006, Jan.). *Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials*. https://www.rasrinitiative.org/pdfs/MSIAC-2006.pdf
7. Buelow, S. J., Allen, D., Anderson, G. K., Archuleta, F. L., & Atencio, J. H. (2002, Jun 25). *Destruction of energetic materials in supercritical water.* https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-03/documents/9545957.pdf
8. Upadhye, R. S., Brummond, W. A., Pruneda, C. O., & Watkins B. E. (1994, Sept. 8). *Molten Salt Destruction of Energetic Material Wastes as an Alternative to Open Burning.* https://www.osti.gov/servlets/purl/81102
9. Chiba Z. (1993, Aug. 16). *Mediated Electrochemical Oxidation of Mixed Wasted.* https://www.osti.gov/servlets/purl/10181264
10. Романов, С. В. (2020, Jul. 23.). *Технологія утилізації непридатних боєприпасів індукційно-тепловим способом.* Українська інженерно-педагогічна академія. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-131-136

References

1. *Department of Energy (DOE) Munitions Technology Development Program Progress Report FY 1998.* (1999, March 15). Joint Department of Defense (DoD). https://www.governmentattic.org/33docs/JdodDOEmTDPPRfy98_1999.pdf
2. *Burning the Bullet Industrial Demilitarization Of Ammunition.* https://www.smallarmssurvey.org/sites/default/files/resources/Small-Arms-Survey-2013-Chapter-9-EN.pdf
3. *Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions.* (2019). https://cswab.org/wp-content/uploads/2019/01/National-Academies-of-Sciences-Alternatives-for-Demil-of-Conventional-Munitions-2019.pdf
4. *Guide for the destruction of stockpiled anti-personnel mines*. (2013, June 6). https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_11.10_Ed.2_Am.6.pdf
5. Gronheim, A., & Chairman, Noaf. (2010, May). *Manual Of Nato Safety Principles For The Storage Of Military Ammunition And Explosives*. https://www.rasrinitiative.org/pdfs/AASTP-1-Ed1-Chge-3-Public-Release-110810.pdf
6. Wilkinson, Josh, & Watt, Duncan. (2006, Jan.). *Review of demilitarization and disposal techniques for munitions and related materials.* https://www.rasrinitiative.org/pdfs/MSIAC-2006.pdf
7. Buelow, S. J., Allen, D., Anderson, G. K., Archuleta, F. L., & Atencio, J. H. (2002, Jun 25). *Destruction of energetic materials in supercritical water.* https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-03/documents/9545957.pdf

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

8. Upadhye, R. S., Brummond, W. A., Pruneda, C. O., & Watkins B. E. (1994, Sept. 8). *Molten Salt Destruction of Energetic Material Wastes as an Alternative to Open Burning.* https://www.osti.gov/servlets/purl/81102
9. Chiba Z. (1993, Aug. 16). *Mediated Electrochemical Oxidation of Mixed Wasted.* https://www.osti.gov/servlets/purl/10181264
10. Романов, С. В. (2020, Jul. 23.). *Технологія утилізації непридатних боєприпасів індукційно-тепловим способом.* Українська інженерно-педагогічна академія. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2020-25-131-136

Modern Methods of Ammunition Disposal: International Standards, Technological Approaches, and Development Prospects

Yevhen Khomenko
Postgraduate Student
Head of the Research Center
Research Center of the State Special Transport Service
e-mail: ek70282@gmail.com
ORCID: 0009-0006-7006-3439

Viktor Rybalka
Head of the Personnel Training Department
State Special Transport Service
e-mail: fischmak@gmail.com
ORCID: 0009-0008-6344-5791

Serhii Kostyria
Ph.D. in Engineering
Senior Officer of the Mine Action Problems Research Department
Research Center of the State Special Transport Service
e-mail: kostyrya81@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5215-080X

Maryna Tkach
Engineer of the Mine Action Problems Research Department
Research Center of the State Special Transport Service
e-mail: marina.tkach.1583@outlook.com
ORCID: 0009-0001-1478-004X

Abstract. The problem of munitions disposal holds a special place in the system of international security. The primary methods of destruction – open burning and detonation – provide a rapid and relatively inexpensive solution to the problem, yet they are harmful to the environment and human health. The contemporary development of technologies and the tightening of international norms have prompted the search for alternative approaches that would combine safety, environmental, and economic feasibility. The article examines modern methods of ammunition disposal, focusing on international standards, technological approaches, and their development prospects. The issue of ammunition disposal is becoming increasingly relevant due to the growing volume of non-functional, damaged, and obsolete munitions, which poses a threat to human safety and the environment. The analysis is conducted taking into account current international norms and

ISSN (print): 2786-9318
ISSN (online): 2786-9326
Military Science. Vol. 3 No. 4 (2025)

practices, technical solutions applied in various countries, and key trends in this field. Special attention is paid to the environmental and social aspects of disposal, environmental impact assessment, and potential risks to the population. The aim of the article is to provide a comprehensive overview of international standards in the field of munitions disposal, an analysis of research programs in the USA and Europe, a review of demilitarization methods, and a characterization of the main technologies, from disassembly to recycling. Particular attention is paid to mechanical and hydro-jet methods, contained burning, chemical and oxidative processes, as well as resource recovery practices. The material is based on a review of literature, international programs, practical experience, and environmental assessments. The results of the study indicate that there is no universal method for munitions disposal: the choice of technology depends on the type of material, available infrastructure, safety requirements, and environmental standards. A promising direction is the development of controlled oxidative and chemical methods, which ensure a high degree of explosive destruction and a reduction in negative environmental impact. In the future, integrated technological schemes that combine the stages of disassembly, removal, destruction, and recycling will have a leading significance.

Keywords: supercritical water oxidation, incineration, munitions disposal.