

Технологія захисту навколишнього середовища

УДК 628.471:504:662.6

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0613>

¹Ірина Кордуба,

доктор технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>, e-mail: uaror-korduba@ukr.net

¹Альона Перебинос,

кандидат технічних наук, асистент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0003-0565-9413>, e-mail: perebynos.ar@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МЕДИЧНИХ І ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВІДХОДІВ

АНОТАЦІЯ. Пандемія COVID-19 та повномасштабна війна в Україні спричинили суттєве зростання обсягів і зміну морфологічного складу медичних відходів, що створює додаткові екологічні та санітарно-епідемічні ризики. Виникла потреба у формуванні національної стратегії управління медичними відходами в умовах надзвичайних ситуацій, здатної забезпечити стійкість системи охорони здоров'я. Традиційні технології, зокрема спалювання, не гарантують повної деструкції токсичних сполук і можуть спричинити вторинне забруднення довкілля. Відповідно до рекомендацій ВООЗ, безпечне спалювання можливе лише за температур понад 800 °С в основній камері та 1000 °С у камері допалювання, тоді як для повної деструкції органічних токсинів необхідні температури 1200–3000 °С, досяжні лише за умов плазмохімічної обробки. У роботі проаналізовано сучасні плазмохімічні технології оброблення відходів, що ґрунтуються на використанні електродугових плазмотронів із робочими температурами понад 2000 °С. Доведено, що такі технології забезпечують повну демоллекуляризацію токсичних сполук, зокрема полімерів і компонентів хімічної зброї, без утворення діоксинів і смол. У результаті процесу утворюються екологічно безпечні продукти – синтез-газ ($H_2 + CO$), придатний для подальшого енергетичного використання, та невелика кількість інертного шлаку, який може бути використаний у будівельній галузі. Розкрито конструктивні та експлуатаційні особливості плазмотронів різної потужності, що забезпечують стабільність дуги й тривалий термін служби електродів. Плазмохімічний метод має низку переваг: повне знищення токсичних компонентів, рекуперація енергоємного синтез-газу, високий коефіцієнт газифікації (93–95 %), зменшення обсягів відходів, енергозбереження та екологічна безпечність процесу. Порівняння демонструє, що плазмохімічні технології здатні ефективно переробляти навіть збільшені обсяги небезпечних відходів, мінімізуючи ризики для персоналу й населення, забезпечуючи екологічну безпеку та можливість вторинного використання утворених продуктів.

Ключові слова: медичні відходи, плазмохімічні технології, плазмодуговий метод, плазмотрон, синтез-газ, демоллекуляризація, оброблення відходів, видалення відходів, екологічна безпека.

APPLICATION OF PLASMA CHEMICAL METHODS FOR ENVIRONMENTALLY SAFE TREATMENT OF MEDICAL AND PHARMACEUTICAL WASTE

ABSTRACT. The COVID-19 pandemic and the full-scale war in Ukraine have caused a significant increase in the volume and change in the morphological composition of medical waste, which creates additional environmental and sanitary-epidemic risks. There is a need to develop a national strategy for managing medical waste in emergency situations, capable of ensuring the sustainability of the healthcare system. Traditional technologies, in particular incineration, do not guarantee complete destruction of toxic compounds and can cause secondary environmental pollution. According to WHO recommendations, safe incineration is possible only at temperatures above 800 °C in the main chamber and 1000 °C in the afterburning chamber, while for the complete destruction of organic toxins, temperatures of 1200–3000 °C are required, which are achievable only under plasma-chemical treatment conditions. The paper analyzes modern plasma-chemical waste treatment technologies based on the use of electric arc plasma torches with

operating temperatures above 2000 °C. It is proven that such technologies provide complete demolecularisation of toxic compounds, in particular polymers and components of chemical weapons, without the formation of dioxins and resins. The process results in environmentally safe products – synthesis gas ($H_2 + CO$), suitable for further energy use, and a small amount of inert slag, which can be used in the construction industry. The design and operational features of plasma torches of different powers, which ensure arc stability and long electrode service life, are disclosed. The plasma-chemical method has a number of advantages: complete destruction of toxic components, recovery of energy-intensive synthesis gas, high gasification coefficient (93–95%), reduction of waste volumes, energy saving and environmental safety of the process. The comparison demonstrates that plasma chemical technologies are capable of effectively processing even increased volumes of hazardous waste, minimising risks to personnel and the public, ensuring environmental safety and the possibility of secondary use of the products formed.

Keywords: medical waste, plasma chemical technologies, plasma arc method, plasmatron, synthesis gas, demolecularization, waste treatment, waste disposal, environmental safety.

1. Постановка проблеми. Відповідно до Закону України «Про управління відходами», відходи визначаються як будь-які речовини, матеріали або предмети, від яких їх власник позбувається, має намір чи зобов'язаний позбутися. Медичні відходи, у свою чергу, становлять відходи, що утворюються в результаті здійснення медичного обслуговування, ветеринарної практики, експертиз та досліджень у сфері охорони здоров'я й ветеринарної медицини, включно з науковими та дослідницькими роботами [1]. Зростання обсягів медичних відходів є глобальною тенденцією, що посилюється під впливом збройних конфліктів, пандемій, природних катастроф і криз у сфері охорони здоров'я. До складу таких відходів входять інфекційно небезпечні матеріали, хімічні речовини, фармацевтичні препарати, а також значна кількість одноразових виробів, які становлять потенційну загрозу для здоров'я населення та довкілля за відсутності належного управління.

У період пандемії COVID-19 (2020–2021 рр.) основними видами медичних відходів були використані засоби індивідуального захисту (маски, рукавички, халати, щитки для обличчя), одноразові тести (ПЛР, антигенні), шприци, флакони з вакциною, а також матеріали з пунктів тестування та вакцинації. До основних джерел утворення медичних відходів належали лікувальні заклади, що надавали допомогу пацієнтам із захворюванням на COVID-19. Згідно з оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), пандемія COVID-19 спричинила по світу значне зростання обсягів медичних відходів [2]. В Україні відповідно до звіту United Nations Development Programme (UNDP) та проєкту Ukraine-MEDWASTE зафіксовано суттєве збільшення обсягів медичних та інфекційних відходів під час пандемії, хоча точний множник приросту варіює через обмеженість даних [3, 4].

В Україні після початку широкомасштабних воєнних дій у лютому 2022 року відбулися зміни у структурі та джерелах утворення медичних відходів. Основними їх джерелами стали військові шпитали та мобільні медичні пункти, у яких накопичуються кровозамінники, перев'язувальні матеріали, уламки хірургічних інструментів, лікарські засоби з простроченим терміном придатності або ті, що зберігалися з порушенням умов, а також засоби індивідуального захисту та забруднене обладнання, пошкоджене внаслідок бойових дій. З метою підвищення рівня безпеки управління медичними відходами в Україні 1 квітня 2025 року набув чинності наказ Міністерства охорони здоров'я України № 1827 від 31.10.2024 р., яким затверджено новий Порядок управління медичними відходами (ДСанПіН № 1827) [5]. Документ встановлює вимоги щодо їх утворення, збирання, зберігання, перевезення, оброблення та забезпечення безпеки для здоров'я людини і навколишнього середовища.

Особливої уваги потребують небезпечні відходи, що характеризуються фізичними, хімічними, біологічними чи іншими небезпечними властивостями, здатними завдати шкоди довкіллю та здоров'ю людини. Такі відходи вимагають застосування спеціальних методів і технологій управління. Серед найнебезпечніших видів відходів, що утворюються внаслідок людської діяльності, вирізняють хімічні та біологічні. Хімічні відходи є

небезпечними через високу токсичність і стійкість у навколишньому середовищі – вони повільно піддаються деградації та можуть накопичуватися у ґрунті, воді та живих організмах [6]. До цієї категорії належать органогалогенові сполуки, радіоактивні ізотопи металів, а також матеріали, забруднені токсичними хімічними речовинами. Біологічні відходи становлять ризик поширення патогенних мікроорганізмів, вірусів і токсинів, що зумовлює необхідність їх знешкодження у спеціалізованих умовах.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують ефективність плазмохімічних технологій у переробці різних видів відходів, включно з небезпечними медичними та фармацевтичними. Зокрема, плазмохімічний піроліз забезпечує глибоку деструкцію токсичних сполук, таких як полімери та компоненти хімічної зброї, завдяки високим температурам, що досягаються плазмовими дугами. У порівнянні з традиційними методами, плазмохімічні технології характеризуються високим коефіцієнтом газифікації (93–95 %), що дозволяє ефективно переробляти великі обсяги відходів. Зокрема, у кризових умовах, коли обсяги медичних відходів можуть суттєво зростати, ці технології зберігають ефективність. Плазмові методи також є екологічно прийнятними: вони забезпечують підтримку високих температур (1200–1400 °C і вище) та хімічної реактивності, що сприяє швидкій термічній обробці відходів [7-13]. Таким чином, сучасні наукові публікації підтверджують, що плазмохімічні технології є ефективними та безпечними для навколишнього середовища методами утилізації відходів, здатними забезпечувати стабільне управління навіть за змінних умов виробництва та надзвичайних ситуацій [14-15].

3. Метою роботи є комплексна оцінка ефективності, екологічної безпеки та техніко-економічних характеристик плазмохімічної утилізації медичних та фармацевтичних відходів, а також визначення переваг і обмежень застосування плазмодугових установок порівняно з традиційними методами обробки, такими як спалювання, автоклавування та хімічна нейтралізація.

4. Матеріали та методи. Об'єктом дослідження були медичні та фармацевтичні відходи, класифіковані відповідно до чинних санітарних норм та Національного переліку відходів України [5, 16]. Предметом дослідження – плазмохімічна обробка у вигляді термічного піролізу з використанням плазмодугових установок. Аналітичний підхід полягав у визначенні ступеня деструкції токсичних компонентів, коефіцієнта газифікації та оцінці екологічної безпеки процесу, що дозволяє порівняти плазмохімічні методи з традиційними способами обробки відходів.

5. Результати дослідження. Порівняння обсягів медичних відходів під час пандемії COVID-19 та у період війни в Україні демонструє дві масштабні кризи, які спричинили різке зростання кількості небезпечних медичних матеріалів, однак мають різну природу та структуру утворення відходів (табл. 1). Медичні відходи війни є складнішими за складом і небезпечнішими: вони поєднують біологічну, хімічну, токсикологічну та радіологічну загрозу. Багато з них утворюються в польових умовах без належної інфраструктури для збору та утилізації, що призводить до неконтрольованого розповсюдження збудників інфекцій, стійких до антибіотиків, а також забруднення ґрунтів і водоносних горизонтів токсичними речовинами. У районах активних бойових дій (Харківська, Донецька, Херсонська області) ситуація особливо критична. У 2023 році у цих областях обсяги медичних відходів збільшилися щонайменше в 4–5 разів у порівнянні з довоєнним періодом. За деякими даними, загальна кількість таких відходів в Україні могла перевищувати 10 000 тонн на рік, при цьому значна частина утворювалась у непристосованих умовах [3].

Порівнюючи біологічну небезпеку медичних відходів періоду COVID-19, воєнного та мирного часу, слід зазначити, хоча в усіх випадках існує ризик зараження, під час війни ці ризики доповнюються широким спектром хімічних забруднювачів. Наприклад, рештки медикаментів, хімічних реагентів і навіть уламки боєприпасів можуть мати канцерогенну або мутагенну дію. У той час як у період пандемії в Україні діяли централізовані системи контролю за поводженням з інфекційними відходами, зокрема на основі рекомендацій ВООЗ і МОЗ, у період війни багато таких систем виявилися паралізованими або недоступними.

Таблиця 1. Порівняння утворення медичних відходів в Україні під час пандемії COVID-19 і воєнного стану

Table 1. Comparison of medical waste generation in Ukraine during the COVID-19 pandemic and martial law

Показник	COVID-19	Війна в Україні
Джерело утворення	Лікарні, пункти вакцинації, лабораторії	Лікарні, військові госпіталі, мобільні пункти
Види відходів	Маски, тести, шприци, упаковка від вакцин	Кровозамінники, бинти, хірургічні інструменти, уламки, ліки
Орієнтовний обсяг	3 000–5 000 тон (2021)	8 000–12 000 тон (2023)
Характер	Масове інфекційне навантаження	Травматичне, змішане інфекційне та хімічне навантаження
Основні проблеми	Нестача утилізаційних потужностей	Відсутність безпечного збору та транспортування у зонах бойових дій

Джерела: Міністерство охорони здоров'я України. Аналітичні дані та звіти щодо утворення медичних відходів у лікарнях, пунктах вакцинації, військових госпіталях та мобільних пунктах, 2021–2023 рр.; власні розрахунки та узагальнення даних щодо видів та обсягів відходів у період пандемії COVID-19 та воєнних дій.

Оброблення медичних відходів в Україні в умовах повномасштабної війни стикається з низкою критичних викликів, особливо в прифронтових та тимчасово окупованих регіонах. Насамперед, у цих зонах фактично відсутня централізована система збирання, транспортування та безпечного видалення медичних відходів. Відходи часто залишаються без належного управління, захоронюються або спалюються у відкритих умовах без очищення викидів, що створює додаткову екологічну та епідеміологічну загрозу. Серйозною проблемою є пошкодження інфраструктури: зруйновані медичні заклади, лабораторії та підприємства з оброблення відходів не дозволяють дотримуватись стандартів безпеки. У багатьох громадах відсутня логістика або доступ до ліцензованих операторів, що унеможливує ефективне управління. Крім того, спостерігається гостра нестача обладнання – автоклавів, сучасних інсінераторів із фільтрами, систем сортування. Використовуються застарілі методи, які не відповідають вимогам екологічної та біобезпеки. Бойові дії спричиняють накопичення значних обсягів патогенних медичних відходів – перев'язувальні матеріали, шприци, ампули, залишки біологічних рідин. Зростання кількості поранень, ампутацій, переливань крові та оперативних втручань у польових умовах призводить до суттєвого збільшення обсягів інфікованих відходів, які становлять небезпеку для здоров'я населення та навколишнього середовища.

На сьогодні в Україні медичні відходи обробляються переважно такими способами: автоклавуванням при температурах 105 °C та 132 °C протягом 30 хв та 60 хв відповідно, а також спалюванням в інсінераторах при температурному діапазоні 800–1200 °C (табл. 2). Ці методи забезпечують знищення інфекційних агентів і безпечне поводження з небезпечними матеріалами. Згадані методи відрізняються за технологічними параметрами, рівнем ефективності знезараження, енергоспоживанням та впливом на довкілля. Порівняння дозволяє визначити оптимальний спосіб оброблення відходів залежно від їх типу, обсягу та наявних технічних можливостей [17].

Автоклавування дозволяє ефективно знезаражувати більшість інфекційних відходів, роблячи безпечними для подальшого оброблення. Спалювання при низьких температурах, нижче 800 °C, не забезпечує повного знищення токсичних речовин і може спричинити утворення діоксинів. ВООЗ не рекомендує спалювати медичні відходи при таких температурах, а радить проводити видалення за температури не нижче 1100 °C, що гарантує повне розкладання шкідливих сполук. В Україні лише частина інсінераторів відповідає цим

вимогам, тому дедалі більшої популярності набувають альтернативні технології знезараження, такі як плазмова обробка [18]. Тому, підвищення уваги до цієї проблеми полягає у необхідності впровадження інноваційних технологій оброблення — піролізу, плазмової газифікації, багатостадійної хімічної нейтралізації, автоклавування з хімічними реагентами, фотокаталітичної обробки. Такі методи дозволяють одночасно знешкоджувати як хімічні, так і біологічні компоненти медичних відходів, зменшуючи викиди небезпечних речовин та знижуючи ризики для населення.

Таблиця 2. Методи оброблення медичних відходів в Україні
Table 2. Medical waste treatment methods in Ukraine

Метод	Суть процесу	Переваги	Недоліки	Особливості застосування
Автоклавування при $t \geq 105^\circ\text{C}$ (30 хв)	Стерилізація водяною парою при підвищеному тиску. Знищення бактерій, вірусів, спор. Часто доповнюється подрібненням відходів.	– Відсутність токсичних викидів. – Низькі витрати енергії. – Підходить для більшості інфекційних відходів.	– Не руйнує хімічні та фармацевтичні речовини. – Не зменшує об'єм так сильно, як спалювання. – Не застосовується для анатомічних або патологоанатомічних відходів.	Застосовується для інфекційних відходів (код 18 01 03*), перев'язувальних матеріалів, шприців, рукавичок. Не для токсичних або анатомічних компонентів.
Автоклавування при $t \geq 132^\circ\text{C}$ (60 хв)	Аналогічно до попереднього, але з вищою температурою та тривалістю стерилізації для знищення пріонів (дуже стійких патогенів).	– Єдиний неінсинераційний метод для знешкодження пріонів. – Екологічний, без токсичних газів.	– Потребує спеціального обладнання. – Високе енергоспоживання. – Також неефективний для хімічних відходів.	Застосовується для матеріалів, які могли бути контаміновані пріонами (нейрохірургія, лабораторії). Дуже обмежене використання.
Інсинерація (спалювання при $t 800\text{--}1200^\circ\text{C}$)	Повне згоряння відходів у спеціальних печах з високою температурою. Знищує органіку, патогени, фармацевтичні речовини.	– Повне знищення всіх патогенів. – Зменшення об'єму відходів до 5–10 %. – Універсальний метод для будь-яких категорій медичних відходів.	– Можливе утворення токсичних викидів (діоксини, метали). – Висока вартість обладнання. – Потреба у фільтрах і контролі викидів.	Ефективний для всіх типів медичних відходів, включно з анатомічними, фармацевтичними, лабораторними. Часто використовується в зонах бойових дій, за умови наявності мобільних або стаціонарних установок.

Останні два десятиліття плазмохімічні методи з температурами до $10\,000^\circ\text{C}$ досліджуються для знищення небезпечних речовин та промислових відходів, включаючи полімери та компоненти хімічної зброї. Вони забезпечують повну демоллекуляризацію при температурах вище 1200°C , без утворення смол і діоксинів, розкладаючи відходи на безпечні сполуки: водень, монооксид вуглецю та незначну частку твердого шлаку (до 7 % маси). Плазмохімічні технології зменшують викиди токсинів на 99 %, а синтез-газ ($\text{H}_2 + \text{CO}$) і шлак використовуються для енергії чи будівництва (табл. 3). Процес відбувається без кисню, що

виключає утворення оксидів азоту. Парова плазма забезпечує контрольовану переробку відходів будь-якого складу, а гідрозатор ізолює реактор від атмосфери [12].

Плазмовий дуговий метод має низку суттєвих переваг порівняно з традиційними технологіями оброблення медичних і фармацевтичних відходів. До них належать: забезпечення високотемпературного знешкодження більшості токсичних сполук; можливість рекуперації утвореного синтез-газу, що містить до 40–50 % енергії у вигляді оксиду вуглецю (CO) та водню (H₂), що сприяє формуванню замкнених екологічно безпечних циклів; досягнення високого коефіцієнта газифікації (93–95 %) з одночасним зменшенням енергоспоживання до 40 % та скороченням об'єму відходів у 300–400 разів. Крім того, технологія дає змогу спростити процеси попереднього сортування та сушіння відходів, а також запобігає утворенню високотоксичних діоксинів у присутності хлорвмісних сполук завдяки плазмовому впливу при температурах понад 2000 °C [19, 20].

Таблиця 3. Порівняння методів оброблення медичних відходів
Table 3. Comparison of medical waste treatment methods

Критерій	Плазмові дугові технології	Традиційні методи видалення (спалювання / захоронення)
<i>Знищення токсичних речовин</i>	Здатність знищувати практично всі токсичні речовини завдяки високотемпературному впливу (>3000 °C).	Обмежена здатність, утворення вторинних токсичних сполук (діоксини).
<i>Енергетична ефективність</i>	Рекуперація синтез-газу (CO, H ₂) з високим енергетичним потенціалом, економія до 40 % електроенергії.	Низька або відсутня рекуперація енергії, високе енергоспоживання.
<i>Коефіцієнт газифікації</i>	93–95 % та зменшення об'єму відходів у 300–400 разів.	Низький, значний залишковий об'єм відходів.
<i>Попередня підготовка відходів</i>	Спрощене сортування та сушіння, але потрібне попереднє подрібнення.	Складне сортування, сушіння та підготовка відходів.
<i>Екологічність</i>	Мінімальний рівень NO _x , SO _x , CO ₂ ; запобігання утворенню діоксинів; мінімальні зольно-пилові викиди.	Високий рівень викидів NO _x , SO _x , CO ₂ , утворення діоксинів.
<i>Відходи після оброблення</i>	Практично безвідходний цикл, радикальне розщеплення органічних сполук.	Значна кількість золи, шлаків, вторинних відходів.
<i>Енергоспоживання</i>	Зовнішнє електроспоживання, але економія > 40 % за рахунок рекуперації теплової енергії.	Високе енергоспоживання без значної рекуперації.
<i>Технологічна складність</i>	Вимагає подрібнення відходів і складного обладнання для плазмового впливу.	Простіші технології, але менш ефективні.

Незважаючи на високу ефективність та екологічну безпечність, плазмовий електродуговий метод поки не набув широкого практичного застосування. Основними стримувальними чинниками залишаються висока вартість обладнання та конструкційна складність плазмотронів. Водночас сучасні розробки плазмотронів постійного й змінного струму характеризуються підвищеним ресурсом роботи електродів, спрощеним керуванням та обслуговуванням, що створює передумови для ширшого впровадження цієї технології. Високі енергетичні витрати плазмохімічного процесу можуть бути частково компенсовані за рахунок повторного використання теплової енергії, що накопичується у відходах, для потреб

самої установки. Такий підхід підвищує екологічну та енергетичну ефективність плазмохімічних систем, а також зменшує ризики утворення та викидів токсичних сполук, зокрема діоксинів, фуранів і поліхлорованих біфенілів, у навколишнє середовище.

6. Висновки. 1. Пандемія COVID-19 та повномасштабна війна в Україні зумовили суттєве зростання обсягів і зміну морфологічного складу медичних відходів, що створює додаткові екологічні та санітарні ризики.

2. Виявлено потребу у формуванні національної стратегії управління медичними відходами в умовах надзвичайних ситуацій, яка враховуватиме специфіку кризових періодів і забезпечуватиме стійкість системи охорони здоров'я.

3. На сьогодні більшість традиційних технологій оброблення медичних і фармацевтичних відходів, зокрема спалювання, не гарантують повної деструкції токсичних сполук і можуть спричиняти вторинне забруднення довкілля токсичними залишками. Відповідно до рекомендацій ВООЗ, безпечне спалювання медичних відходів можливе лише за температур вище 800 °С в основній камері та понад 1000 °С у камері допалювання, що потребує використання високотемпературних технологій.

4. Для повної молекулярної деструкції небезпечних органічних сполук у складі медичних і фармацевтичних відходів необхідні температури 1200–3000 °С, які можуть бути досягнуті лише за допомогою плазмохімічних технологій.

5. Плазмохімічна обробка відходів є перспективним напрямом розвитку системи екологічно безпечного управління медичними відходами, здатним забезпечити високий рівень знезараження та мінімізацію утворення вторинних токсичних продуктів.

6. Водночас плазмові технології залишаються переважно на стадії науково-експериментальних розробок і потребують подальших досліджень для оптимізації енергоспоживання, зниження вартості обладнання та масштабування у промислових умовах.

Список використаних джерел:

1. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX // Відомості Верховної Ради України. – 2023. – № 4. – Ст. 30. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 28.10.2025).
2. World Health Organisation. (2022, February 1). *Tonnes of COVID-19 health care waste expose urgent need to improve waste management systems*. <https://www.who.int/news/item/01-02-2022-tonnes-of-covid-19-health-care-waste-expose-urgent-need-to-improve-waste-management-systems>
3. Україна. ПРООН. (2023). Моніторинг бар'єрів та прогалин на шляху до сталого поведіння з медичними відходами в закладах охорони здоров'я України.
4. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). (2024). *Medical Waste in Ukraine (Ukraine-MEDWASTE): A pilot project K-Z391-ST02* [PDF]. Hamburg. https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-38663_01-Hauptbericht.pdf
5. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Порядок управління медичними відходами, у тому числі вимоги щодо безпечності для здоров'я людини під час утворення, збирання, зберігання, перевезення, оброблення таких відходів» : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 31 жовтня 2024 р. № 1827 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1938-24#Text>.
6. Вовк О. О., Бойченко М. С. Причинно-наслідковий аналіз стану екологічної безпеки під час виробництва та використання фармацевтичної продукції // Наукоємні технології. – 2017. – № 1. – С. 71–77.
7. Jie, Z., Liu, C., Xia, D., & Zhang, G. (2023). An atmospheric microwave plasma-based distributed system for medical waste treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 51314-51326.
8. Rutberg, P. G., Bratsev, A. N., Safronov, A. A., Surov, A. V., & Schegolev, V. V. (2003). The technology and execution of plasmachemical disinfection of hazardous medical waste. *IEEE transactions on plasma science*, 30(4), 1445–1448.
9. Unnisa, S. A., & Hassanpour, M. (2017). Plasma technology and waste management. *Resource Recycling Waste Management*, 1, 1–3.

10. Giakoumakis, G., Politi, D., & Sidiras, D. (2021). Medical waste treatment technologies for energy, fuels, and materials production: A review. *Energies*, 14(23), 8065.
11. Cai, X., & Du, C. (2021). Thermal plasma treatment of medical waste. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1–46.
12. Nema, S. K., & Ganeshprasad, K. S. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science*, 271–278.
13. Kaushal, R., Rohit, & Dhaka, A. K. (2024). A comprehensive review of the application of plasma gasification technology in circumventing the medical waste in a post-COVID-19 scenario. *Biomass conversion and biorefinery*, 14(2), 1427–1442.
14. Galaly, A. R. (2022). Sustainable development solutions for the medical waste problem using thermal plasmas. *Sustainability*, 14(17), 11045.
15. Shi, H. Y., & Wang, P. Y. (2025). Thermal Plasma Medical Waste Treatment: Data-ML Driven System Performance and Product Prediction. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 299–317.
16. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова Каб. Міністрів України від 24.03.2023 № 1102. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.10.2025).
17. Popovych, O., Vronska, N., Yatchyshyn, Y., & Zaharko, Y. (2020). Handling the pharmaceutical industry waste in Ukraine and the UA. *Environmental Problems*, 1 (5), 2020, 5(1), 50–57.
18. World Health Organisation. (2010). Exposure to dioxins and dioxin-like substances: a major public health concern. WHO: Geneva, Switzerland.
19. Ващенко, В., Кордуба, І., Ненсі Махмуд, Х. ., & Негода, Н. (2024). Технологічні та екологічні особливості установок для плазмохімічного піролізу медичних відходів. *Техніка будівництва*, (40), 93–108. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0310>
20. Zhovtianskyi V.A. Petrov S.V. Orlyk V.M. Yakymovych M.V. Vakilov I.M. Nazarenko V.G. Vabishchevych M.S. Voloshyniuk I.M. Yakubushyn Y.A., et al. Recycling of hazardous and radioactive waste using plasma technologies, – *Ecological Sciences*, – 2018, – No. 2 (21), – pp. 49–58.

References:

1. Pro upravlinnia vidkhodamy : Zakon Ukrainy vid 20 cherv. 2022 r. № 2320-IX // Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. – 2023. – № 4. – St. 30. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
2. World Health Organisation. (2022, February 1). *Tonnes of COVID-19 health care waste expose urgent need to improve waste management systems*. <https://www.who.int/news/item/01-02-2022-tonnes-of-covid-19-health-care-waste-expose-urgent-need-to-improve-waste-management-systems>
3. Ukraina. PROON. (2023). Monitorynh bar'ieriv ta prohalyh na shliakhu do staloho povodzhennia z medychnymy vidkhodamy v zakladakh okhorony zdorov'ia Ukrainy. {In Ukrainian}.
4. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). (2024). *Medical Waste in Ukraine (Ukraine-MEDWASTE): A pilot project K-Z391-ST02* [PDF]. Hamburg. https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-38663_01-Hauptbericht.pdf
5. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl «Poriadok upravlinnia medychnymy vidkhodamy, u tomu chysli vymohy shchodo bezpechnosti dlia zdorov'ia liudyny pid chas utvorennia, zbyrannia, zberihannia, perevezennia, obroblennia takykh vidkhodiv» : nakaz Ministerstva okhorony zdorov'ia Ukrainy vid 31 zhovtnia 2024 r. № 1827 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1938-24#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
6. Vovk O. O., Boichenko M. S. Prychynno-naslidkovyi analiz stanu ekolohichnoi bezpeky pid chas vyrobnytstva ta vykorystannia farmatsevychnoi produktsii // *Naukoiemni tekhnolohii*. – 2017. – № 1. – S. 71–77. {In Ukrainian}.
7. Jie, Z., Liu, C., Xia, D., & Zhang, G. (2023). An atmospheric microwave plasma-based distributed system for medical waste treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 51314–51326.
8. Rutberg, P. G., Bratsev, A. N., Safronov, A. A., Surov, A. V., & Schegolev, V. V. (2003). The technology and execution of plasmachemical disinfection of hazardous medical waste. *IEEE transactions on plasma science*, 30(4), 1445–1448.
9. Unnisa, S. A., & Hassanpour, M. (2017). Plasma technology and waste management. *Resource Recycling Waste Management*, 1, 1–3.
10. Giakoumakis, G., Politi, D., & Sidiras, D. (2021). Medical waste treatment technologies for energy, fuels, and materials production: A review. *Energies*, 14(23), 8065.

11. Cai, X., & Du, C. (2021). Thermal plasma treatment of medical waste. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1-46.
12. Nema, S. K., & Ganeshprasad, K. S. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science*, 271-278.
13. Kaushal, R., Rohit, & Dhaka, A. K. (2024). A comprehensive review of the application of plasma gasification technology in circumventing the medical waste in a post-COVID-19 scenario. *Biomass conversion and biorefinery*, 14(2), 1427-1442.
14. Galaly, A. R. (2022). Sustainable development solutions for the medical waste problem using thermal plasmas. *Sustainability*, 14(17), 11045.
15. Shi, H. Y., & Wang, P. Y. (2025). Thermal Plasma Medical Waste Treatment: Data-ML Driven System Performance and Product Prediction. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 299-317.
16. Pro zatverdzhennia Poriadku klasyfikatsii vidkhodiv ta Natsionalnoho pereliku vidkhodiv : Postanova Kab. Ministriv Ukrainy vid 24.03.2023 № 1102. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
17. Popovych, O., Vronska, N., Yatchyshyn, Y., & Zaharko, Y. (2020). Handling the pharmaceutical industry waste in Ukraine and the UA. *Environmental Problems*, 1 (5), 2020, 5(1), 50-57.
18. World Health Organisation. (2010). Exposure to dioxins and dioxin-like substances: a major public health concern. WHO: Geneva, Switzerland.
19. Vashchenko, V., Korduba, I., Nensi Makhmud, Kh., & Nehoda, N. (2024). Tekhnolohichni ta ekolohichni osoblyvosti ustanovok dlia plazmokhimichnoho pirolizu medychnykh vidkhodiv. *Tekhnika budivnytstva*, (40), 93–108. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0310> {In Ukrainian}.
20. Zhovtianskyi V.A. Petrov S.V. Orlyk V.M. Yakymovych M.V. Vakilov I.M. Nazarenko V.G. Vabishchevych M.S. Voloshyniuk I.M. Yakubyshyn Y.A., et al. Recycling of hazardous and radioactive waste using plasma technologies, - *Ecological Sciences*, – 2018, – No. 2 (21), – pp. 49–58.