

Застосування плазмохімічних методів для екологічно безпечної утилізації медичних і фармацевтичних відходів

Назарій Негода, аспірант¹ (ORCID: 0000-0002-0082-6027), Ірина Кордуба, д-р техн. наук, доц.¹ (ORCID: 0000-0001-5135-8465), Олена Жукова, канд. техн. наук, доц.¹ (ORCID: 0000-0003-0662-9996),

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто сучасні плазмохімічні технології утилізації відходів, що базуються на використанні електродугових плазмотронів із робочими температурами до 10000 °С. Показано, що ці методи забезпечують повну демоллекуляризацію токсичних сполук, у тому числі полімерів і компонентів хімічної зброї, без утворення діоксинів і смол. Внаслідок процесу утворюються екологічно безпечні продукти — синтез-газ ($H_2 + CO$), придатний для енергетичного використання, та невелика кількість інертного шлаку, який може застосовуватися в будівництві. Охарактеризовано конструктивні й експлуатаційні особливості сучасних плазмотронів різної потужності, що забезпечують стабільність електричної дуги та тривалий ресурс роботи електродів. Плазмохімічний метод порівняно з традиційними технологіями утилізації відходів має низку переваг: практично повне знищення токсичних речовин, рекуперация енергоємного синтез-газу, високий коефіцієнт газифікації (93–95%), зменшення обсягу відходів у сотні разів, енергозбереження та екологічна безпека.

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

1. ВСТУП

З розвитком науки і техніки зростає вплив людини на природу, що призводить до збільшення забруднення. У 2016 році світ виробив 2,02 млрд тон відходів, прогноз на 2030 рік — 2,59 млрд тонн, на 2050 рік — 3,4 млрд тон. Темпи зростання відходів удвічі випереджають зростання населення. У країнах із високим доходом збирають 96% відходів, у країнах із низьким — лише 39%.

В Україні щорічно утворюється понад 35 млн тонн твердих побутових відходів (ТПВ): 20-40% — папір, 4-5% — текстиль, 2-5% — металобрухт, 2-3% — деревина, 1-5% — полімери, решта — харчові та інші відходи. На душу населення припадає 250-300 кг відходів на рік. Обсяг відходів зростає на 1-3% щорічно, незважаючи на зменшення населення, 95% відходів спалюють, або вивозять на полігони, які в основному не відповідають санітарним вимогам, що призводить до забруднення ґрунтів, атмосфери, підземних і поверхневих вод.

Згідно із Законом України, «відходи - це будь-які речовини, матеріали і предмети, яких їх власник позбувається, має намір або повинен позбутися, де особливо увага приділяється небезпечним відходам, що мають фізичні, хімічні, біологічні чи інші небезпечні властивості, які створюють або можуть створити значну небезпеку для навколишнього природного середовища і здоров'я людини та потребують спеціальних методів і засобів поводження з ними.

Найнебезпечнішими відходами, які продукує людина в процесі своєї життєдіяльності є хімічні та біологічні відходи.

Небезпека хімічних відходів полягає в тому, що вони не піддаються жодному виду деградації і залишаються токсичними для людини та навколишнього середовища. Прикладами таких відходів є органігалогенозовані гетероциклічні речовини, радіоактивні ізотопи металів, забруднені різними токсичними хімічними речовинами,

патогенними бактеріями та вірусами. Такі відходи мали медичне призначення: використані одноразові маски, рукавички, халати та інше

В Україні з 01.04.2025 діє наказ МОЗ від 31.10.2024 № 1827, який затвердив Порядок управління медичними відходами, встановлюючи вимоги до їх безпечного утворення, збирання, зберігання, перевезення та оброблення.

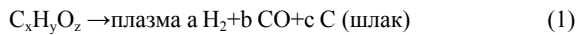
Обсяги медичних відходів глобально зростають через війни, пандемії та кризи. В Україні з 2022 року, через війну, їх кількість різко збільшилася, особливо в прифронтових регіонах (Донецька, Харківська, Херсонська, Запорізька області). У 2023 році у Львівській області зібрано 1200 тон медичних відходів (проти 400–500 тон у довоєнні роки). Відходи, що містять інфекційні матеріали, хімікати та одноразові вироби, без належної утилізації загрожують здоров'ю людей і довкіллю.

Система утилізації відходів в Україні має прогалини: лише частина медичних закладів співпрацює з ліцензованими підприємствами, а статус тимчасових медпунктів у зонах бойових дій невизначений

Проблема утилізації небезпечних відходів промислового, комунального та медичного походження залишається однією з найактуальніших екологічних і техногенних загроз сучасності. Традиційні методи термічного знешкодження, зокрема спалювання, супроводжуються утворенням діоксинів, оксидів азоту та інших токсичних речовин, що становлять загрозу для здоров'я людини та довкілля. У цьому контексті особливого значення набувають плазмохімічні технології, які забезпечують високотемпературне (до 10 000 °С) повне руйнування органічних сполук із перетворенням їх на безпечні продукти. Використання плазмотронів дозволяє не лише зменшити токсичні викиди майже на 99%, а й одержати енергетично цінний синтез-газ і будівельний шлак, що відкриває перспективу створення безвідходних замкнених циклів переробки.

2. ОСНОВНИЙ ТЕКСТ

Останні два десятиліття плазмохімічні методи з температурами до $T \approx 104 \text{ K}$ ($10\,000 \text{ }^\circ\text{C}$) досліджуються для знищення небезпечних речовин, промислових і комунальних відходів, включаючи полімери та компоненти хімічної зброї. Вони забезпечують повну демоллекуляризацію при температурах вище $T > 1200$ без утворення смол і діоксинів, розкладаючи відходи на безпечні сполуки:



де a, b, c – стехіометричні коефіцієнти, залежні від складу відходів.

Плазмохімічні технології зменшують викиди токсинів на 99%, а синтез-газ ($\text{H}_2 + \text{CO}$) і шлак використовуються для енергії чи будівництва. Процес відбувається без кисню, що виключає утворення оксидів азоту NO_2 :



Парова плазма забезпечує контрольовану переробку відходів будь-якого складу, а гідрозатвор ізолює реактор від атмосфери.

На сьогодні у світі створено десятки видів нових електродугових плазмотронів з тривалим експлуатаційним ресурсом та потужністю від 1 кВт до 20 МВт, а також спеціалізовані плазмодугові стаціонарні та мобільні установки які здатні працювати в температурному діапазоні до 10000°C . Більш тривалий експлуатаційний ресурс плазмотронних електродів забезпечується шляхом експлуатації на високих вольтамперних відношеннях струмів до 400 А та напруг в кілька кіловольт. Плазмодугові генератори з малими потужностями до 200 кВт працюють при напругах до 2-х кВольт, а більш потужні - при 2000 Вольт і вище.

Захищені електроди з малими робочими струмами мають експлуатаційні ресурси в кілька тисяч годин, а при застосуванні регенераційних схем їх ресурс стає необмеженим. Такі плазмодугові генератори придатні для їх спеціалізованого промислового застосування в установках для утилізації відходів практично усіх категорій.

Плазмодугові генератори працюють в широкому діапазоні витрат плазмоутворюючих газів в результаті точної стабілізації електричної дуги в газорозрядній камері. При цьому прив'язка катодного і анодного електродних п'ятен електричної дуги реалізується на торцях термоелектродів, що дає можливість установлювати задану довжину електричної дуги. Зміни напруги на дузі, що виникає при зміні напруженості поля при різних режимах, компенсуються швидким регулюванням розрядного струму, що забезпечує точної підтримки потужності/температури плазмодугового струменю.

Плазмодугові технології і установки на базі нових плазмодугових генераторів також можна застосовувати для стендового експериментального дослідження електродугових плазмодугових установок для утилізації відходів з тривалим експлуатаційним ресурсом роботи або для комплексних ресурсних і технологічних випробувань для технологічного і техніко-економічного обґрунтування технологічних і промислових процесів та циклів для відходів з різним складом і рівнем їх екологічної та медико-екологічної небезпеки.

Плазмодуговий метод також має низку додаткових важливих переваг порівняно з традиційними технологіями утилізації медичних і фармацевтичних відходів.

Таблиця 1: Переваги плазмодугового методу

№	Перевага	Короткий опис
1	Високотемпературне знищення токсичних речовин	Повне руйнування майже всіх токсичних сполук завдяки температурі $>2000 \text{ }^\circ\text{C}$
2	Рекуперация синтез-газу	Утворення газу з CO та H_2 , що містить до 40–50% енергії, можливість повторного використання
3	Високий коефіцієнт газифікації	Досягнення 93–95%, економія електроенергії до 40%, зменшення об'єму відходів у 300–400 разів
4	Спрощення підготовчих процесів	Зменшення потреби у первинному сортуванні та сушінні відходів
5	Блокування утворення діоксинів	Високотемпературний вплив запобігає утворенню діоксинів при наявності хлорвмісних сполук

3. ВИСНОВКИ

Плазмодугові технології є перспективним напрямом у сфері утилізації промислових, комунальних, а також небезпечних медичних і фармацевтичних відходів. Вони дозволяють створювати замкнені безвідходні цикли, знижувати екологічні ризики, мінімізувати утворення вторинних токсичних сполук і водночас отримувати корисні енергетичні продукти. Використання таких плазмодугових установок може стати ключовим елементом у реалізації концепції «здоров'яорієнтованого» та екологічно безпечного міста.

Список літератури

- [1] Chartier Y, Emmanuel J, Pieper U, Pruss A, Rushbrook P, Stringer R, Townend W, Wibur S, Zghondi R. Safe management of wastes from health-care activities. Geneva: World Health Organization, 2014. 320 p.
- [2] Баркова І.М. Природа та війна: як військові дії впливають на довкілля України. *Science and society: modern trends in a changing world. Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Vienna, Austria. 2024. 31-38.* URL: <https://sci-conf.com.ua/iii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-and-society-modern-trends-in-a-changing-world-19-21-02-2024-viden-avstriya-arhiv>
- [3] Janik-Karpinska E, Brancaloni R, Niemcewicz M, Wojtas W, Foco M, Podogrocki M, Bijak M. Healthcare waste—a serious problem for global health. *Healthcare*. 2023;11:242. URL: <https://doi.org/10.3390/healthcare11020242>.
- [4] World Health Organization: Health-care waste. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>. Accessed 13 July 2022
- [5] Технологія плазмодугової газифікації — переваги та недоліки. VinIT: вебсайт. URL: <https://vinit.com.vn/ru/технология-плазменной-газификации-п/>