

АНОТАЦІЯ

Негода Н.В. Управління медичними відходами з використанням мобільних плазмових технологій

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки», за спеціальністю 101 – «Екологія». Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладного завдання удосконалення наявних та розробки нових підходів безвідходної технології знищення небезпечних медичних відходів в місці їх накопичення за допомогою плазмохімічних піролізних технологій з метою блокування попадання їх в загальні муніципальних комунально-побутові потоки та їх фінішного накопичення на санкціонованих і не санкціонованих полігонах чи звалищах.

У розділі 1 згідно з документами ВООЗ, здоров'я орієнтоване місто (ЗОМ) визначається таким містом, в якому в основу міського розвитку, планування транспортної інфраструктури, архітектури, екології довкілля, охорони здоров'я та освіти вся політика створення та розвитку послуг і умов проживання організована для максимального забезпечення і підтримки фізичного, психічного та соціального здоров'я його мешканців на основі багатьох базових принципів.

Один з таких принципів акцентує на те, що ЗОМ повинне бути повністю вільним від будь-якого накопичення муніципальних та комунально-побутових твердих і рідких відходів виключаючи їх перевезення по території міста та утворення полігонів і сміттєзвалищ навіть поза міською смугою. Цей принцип є особливо болючим для громадян України і для її національної безпеки, що в умовах повномасштабної війни на території України породжує важкі і складні екологічні та медичні проблеми для вирішення яких необхідні нові технологічні підходи та високоефективні технології переробки, утилізації і

знищення небезпечних медичних та фармацевтичних відходів (НМФВ). При цьому юридично НМФВ не входять у звичайну систему поводження з міськими ТПВ [1].

На сьогодні найпоширенішими методами фінішної утилізації будь-яких муніципальних та комунально-побутових відходів (МКПВ) є їх спалювання в інсинераторах або на відкритому повітрі, а також поховання на полігонах і сміттєзвалищах. Однак переважна більшість НМФВ попадає в загальні потоки МКПВ і потрапляє на сміттєзвалища і полігони, і таким шляхом далі вони можуть проникати в харчові ланцюги. Тому Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) не рекомендувала низькотемпературне спалювання будь-яких НМФВ і особливо в установках із низьким рівнем очищення вихлопних димних сумішей. Отже, рекомендації ВООЗ виключають застосування низькотемпературної інсинерації без належного екологічного очищення димових газів. В ідеалі температура згоряння відходів в первинній камері інсинератора повинна бути більшою за 800°C, а у вторинній камері допалювання — мінімум 1000°C.

У якості альтернативного підходу для формування здоров'яорієнтованих міст в роботі розглядається стратегія «Zero Waste» яка була реалізована в окремих містах - м. Любляна (Словенія), м. Сан-Франциско (США), м. Капанорі та м. Канберра (Австралія). Однак повної ліквідації або зупинки накопичення відходів поки що не досягнуто на жодному муніципалітеті. При цьому виявилось, що у більшості великих промислових міст і навіть країн важко і навіть неможливо створити повноцінну інфраструктуру для «Zero Waste». Тому на сьогодні ця стратегія залишається більше ідеологічним стратегічним орієнтиром, а не масштабною практичною реальністю. Однією з причин цієї ситуації є те, що технологічне наповнення стратегії «Zero Waste» не придатне для повноцінного медико-екологічного безпечного універсального впровадження його перш за все в системі поводження з НМФВ.

З метою подальшого удосконалення стратегії «Zero Waste» в системі поводження з НМФВ в м. Києві в роботі пропонуються високотемпературні

плазмові дугові технології, зокрема, модульні повністю автоматизовані плазмохімічної установки які можуть оперативно доставлятися в місця вироблення або накопичення НМФВ. Впровадження таких установок в системі поводження з НМФВ дозволить: поступово збільшувати вилучення і знищення НМФВ із загальних потоків муніципального та комунально-побутових відходів;

Екологічний та медико-біологічний ефекти впровадження Zero Waste для медичних відходів в м. Києві перш за все дозволяє зменшити частоту та кількість хронічних та інфекційних захворювань серед населення, а значить і зменшення кількості випадків госпіталізації громадян через хімічні ураження шкірні та респіраторні хвороби через зменшення забруднення повітря та ризиків забруднення поверхневих та підземних вод.

Тому нова стратегія Zero Waste в системі поводження з НМФВ повинна не просто зменшити кількість медичних відходів, а реально виключити усі ланки наявного ланцюга на якому вибудована вся система поводження з НМФВ: збирання → оброблення → утилізацію → можливість повторного несанкціонованого використання → небезпечного транспортування → утворення, накопичення та зберігання небезпечних концентрованих технологічно не перероблюваних залишків.

Реалізація муніципального проекту «Zero Waste» для медичних відходів у м. Києві на основі технології «Плазмон-3М» дасть можливість екологічно безпечно утилізувати усі 100% НМФВ шляхом їх високотемпературної трансформації на нетоксичні сполуки і значно спростити систему поводження з НМФВ, а також ліквідувати небезпечні численні транспортні операції з НМФВ і, як наслідок, усунути ризики медико-екологічного зараження довкілля і максимально зменшити логістичні витрати. Однак плазмові технології для виконання проектів Waste-to-energy (WTE) все ще залишається на стадії досліджень і експериментів.

У розділі 2 здійснено оцінку антропогенного впливу умов урбоєкосистем на здоров'я населення м. Київ. В ході досліджень було визначено та доведено,

що формування здороорієнтованого міського простору неможливе без зменшення міських муніципальних відходів, особливої уваги потребує проблема утворення медичних відходів, що пов'язано із повномасштабним вторгненням, а також як наслідки — забруднення повітря, води та ґрунту, втрати біорізноманіття, руйнування екосистем та інше. Удосконалено методику оцінки ризиків для міського населення та запропоновано використання індексів ризиків небезпечних явищ на території урбоекосистем природного та техногенного характеру.

Стан та вплив наявних впливів характеризувався за допомогою оцінки та характеристики концентрацій забруднювальних речовин в складових навколишнього середовища, оцінці рівня та інтенсивності шуму, вібрацій та ін., порівняння їх з ГДК.

Відповідно до проведеної оцінки було доведено, що кількість утворених відходів на пряму залежить від рівня добробуту населення, а недосконалість та неорганізованість системи поводження з відходами прямо загрожує загальному стану здоров'я населення. При цьому було розраховано основні ризики (канцерогенні та неканцерогенні), які виникають в процесі життєдіяльності містян, що значною мірою пов'язані із забруднення атмосферного повітря.

Визначено, що одним з основних критеріїв оцінки рівня здоров'яорієнтованості міського середовища є відповідність міських інфраструктур потребам населення, рівень якого оцінюється на основі гігієнічного критерію міського середовища. При цьому показано, що ризики розвитку канцерогенних та неканцерогенних ризиків значною мірою пов'язані із забруднення атмосферного повітря, захворюваність населення в антропогенно навантажених районах більша в 1,5 рази, ніж в районах з нижчим навантаженням.

У розділі 3 виконано аналіз світового та вітчизняного техно екологічного досвіду розробки, створення і застосування плазмових електродугових високо температурних технологій для утилізації НМФВ. Проведено дослідження

техно екологічних та експлуатаційних параметрів плазмової установки для високотемпературної плазмохімічної утилізації токсичних речовин у польових умовах з дотриманням санітарно-гігієнічних вимог STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements». Стандартизовані норми НАТО, визначають мінімальний набір санітарно-гігієнічних правил для військових у польових умовах.

Плазмохімічні технології здатні знищувати хлоровані органічні сполуки з ефективністю знищення до 99,9% з дуже високими характеристиками деструкції діоксинів та фуранів на рівні $(5-9) \cdot 10^{-3}$ нг/м³, що набагато менше за нормативні екологічні світові стандарти.

В Україні експериментальні мобільні плазмові дугові установки «Плазмон-1,2,3М» з максимальною електричною потужністю становить 90 кВт, були створені на базі вітчизняного плазмового генератора постійного струму ПУН-1 в якому плазмоутворювальним газом може бути повітря, а температура в реагентній зоні горіння (РЗГ) може підтримуватися на рівні (1500-4000) °С і забезпечувати ступінь молекулярної деструкції відходів до 99,%. і навіть більше. При цьому потужне ультрафіолетове випромінювання плазмової дуги значно прискорює деструкцію відходів з повним знищенням патогенних мікроорганізмів.

Експериментально-промислова мобільна плазмова електродугова установка «Плазмон-3М», на якій проводилися авторські дослідження процесів для переробки та утилізації медичних відходів має наступні характеристики: 10-12 т/добу; вологість — до 20%; неорганічна компонента — до 20%. При цьому установка «Плазмон-3М» також може застосовуватися для знищення практично всіх категорій лікарняних відходів: бавовняні вироби, різні пластмаси, целюлозно-полімерні пов'язки, полівінілхлоридні пакети для крові, рукавички та катетери з поліуретану чи з силіконової гуми, поліетиленові та поліметилметакрилатні матеріали, скло та інші, а також для перероблення радіо фармацевтичних відходів.

У розділі 4 в роботі було запропоновано спрощену експрес-методику для

оцінки енергетичного балансу і параметрів очищення фінішної димової суміші для оцінки ефективності роботи плазмової установки «Плазмон-3М» для визначення її енергетичного балансу та параметрів очищення продукт-сумішей.

У розділі описані результати експериментальних лабораторних вимірювань і заводських випробувань мобільної установки «Плазмон-3М». Зокрема представлено результати дослідження робочих характеристик плазмового генератора ПУН-1 та результати спектрофотометричних вимірювань складу фільтрувального змішаного розчину лабіринтного рідинного фільтра. Аналіз проб проводився за допомогою спектрофотометра FT-801.

В плазмохімічному реакторі при спалюванні твердих медичних органічних відходів з вмістом вуглецю також утворюється високоенергетичний синтез-газ який значно простіше, економніше і ефективніше використовувати цей синтез-газ в неочищеному вигляді для власних потреб плазмової установки з метою економії зовнішнього електроспоживання та «допалювання» утворюваних в димовій суміші небезпечних речовин з метою доведення вихлопних димових сумішей до екологічних вимог державних і міжнародних норм, правил та методів щодо безпечної утилізації медичних відходів, включаючи інфіковані відходи.

Результати експериментальних температурних вимірювань розподілу температури (температурний профіль реагентного простору реактора по висоті) уздовж центральної осі симетрії циліндричного реактора реакційної зони, від горизонтальної площини сопла плазмового струменя до виходу вихлопної димової газоаерозольної суміші дозволяють оцінити ефективність процесу, стабільність роботи установки та рівень утворення побічних продуктів.

Під час роботи установки на потужності генератора плазми 12 кВт було виявлено температурні пульсації в інтервалі $\sim (1200-1600)^\circ\text{C}$ виникнення яких можна пояснити залежністю відбору потужності плазмового струменю на

прогрівання медичних відходів до температур, що забезпечують виникнення плазмохімічних деструкційних процесів інтенсивність яких залежить від швидкості та нерівномірності їх надходження в реагентну зону реактора та від потужності плазмового струменя, а також залежно від зміни речовинного складу та температури вхідних відходів.

В розділі також проведено порівняльний аналіз характеристик плазмових генераторів з метою їх вибору, охолодження та фільтрація димових та конденсованих сумішей. Описано переваги і недоліки плазмових генераторів постійного струму.

Кількість відходів, що пройшли через плазмохімічний реактор, скорочується від 50 до 400 разів.

Для удосконалення системи охолодження та очищення рідких і димових сумішей використано додатковий самопромивний блок фільтраційного очищення рідкого забрудненого залишку. Ще один додатковий зовнішній блок і використовується для допалювання газозерозольного димового залишку з використанням синтез-газу утворюваного в плазмі хімічному реакторі установки.

На основі результатів отриманих в даному розділі надано описання теплофізичних, фізико-хімічних та плазмохімічних процесів і перетворень на етапах реакторного та після реакторного технологічних циклів

Для перевірки правильності теоретичних уявлень про механізм процесу плазмохімічної деструкції медичних відходів була розроблена й створена пілотна лабораторна установка «Плазмон-1», а згодом і дослідно-промислові установки «Плазмон-2» та «Плазмон-3М».

Було визначено температурні режими в різних зонах плазмохімічного реактора на початковій, робочій і завершальній стадіях процесу з метою уникнення різких змін теплових навантажень на конструкційні елементи.

Значення температури в камері допалювання становить 1200–1400 °C з часом перебування димових газів ~2с достатня для високоефективного

знешкодження всіх токсичних органічних продуктів, зокрема й галогеновмісних.

При цьому в реакторі з генератором плазми ПУН-1 для створення стаціонарного стану та організації процесу із чітким розподілом зон горіння, відновлення, сухої перегонки і сушки потрібно підтримувати достатню висоту шару відходів.

Отримані результати та набутий практичний досвід дозволили перейти до вирішення конкретних завдань знищення відходів з метою захисту навколишнього середовища, розробки нових ефективних технологій та створення надійних установок для утилізації особливо токсичних видів відходів. При цьому специфічні властивості медичних відходів передбачають дотримання норм етики, епідеміологічних та екологічних стандартів при роботі з ними. Ці норми забороняють застосування загальних принципів поводження з відходами, таких як сортування, попередня переробка та використання як вторинної сировини. Крім того, категорично заборонено змішувати їх із побутовими відходами та захоронювати на міських звалищах.

На виході з газоходу, тобто на виході з рукавного фільтру за допомогою газоаналізатора MSI-2000 проводилися вимірювання вмісту оксиду азоту та оксиду вуглецю у димових аерозольних залишках. Діапазон вимірювання за оксидом азоту становив $NO \Rightarrow 0 - 1227 \text{ мг/м}^3$, для оксиду вуглецю - $CO \Rightarrow 0 - 2000 \text{ мг/м}^3$.

Найцікавішим є той факт, що в процесі експериментів, майже від початку процесу протягом стадій виходу летких та відновлювального етапу стадії вигорання вуглецю, оксид азоту в димових газах не виявлявся.

Газоаналізатор ОКСИ 5М використовувався для тестових вимірювань CO_2 , викидів в атмосферу кисню O_2 ; окису вуглецю CO ; оксиду азоту NO ; діоксиду азоту NO_2 ; діоксиду сірки SO_2 ; тиску в газопроводі (Р); температури $T^\circ C$ димових газів під час тестового обслуговування установки.

Експериментальна установка «Плазмон-3» на базі вітчизняного генератора плазми отримала сертифікат на відповідність серійному впровадженню та пройшла заводські випробування і готова для серійного

впровадження в системі поводження з небезпечними медичними відходами, а також для проведення лабораторних досліджень процесів високотемпературної плазмохімічної деструкції.

Досвід створення та експлуатації плазмохімічних установок різного призначення показує, що на сьогодні ця технологія ще не готова для широкомасштабного масового знищення потоків змішаних муніципальних та комунально-побутових відходів на полігонах та звалищах. Але при цьому вона є єдиною мобільною технологією здатною знищувати небезпечні медичні відходи безпосередньо на місцях їх утворення або накопичення з метою їх вилучення із загальних міських потоків відходів.

Удосконалена схема зовнішнього блоку охолодження та очищення рідких та димових сумішей. У разі спалювання медичних відходів з непередбачуваним особливо небезпечним хімічним складом використовується додатковий зовнішній фільтрувальний блок.

Для зниження зовнішніх енерговитрат утворювану в плазмохімічному реакторі горюча продукт-суміш подається повторно в реагентну зону реактора або в зовнішній блок допалювання для покращення екологічних та економічних показників установки, що дає економію електроенергії до (20-40)%.

Ключові слова: здоров'яорієнтоване місто, урбоекосистема, антропогенний вплив, небезпечні медичні та фармацевтичні відходи, муніципальні відходи, екологічні ризики, техногенний вплив, стратегія нуль відходів, екологічна безпека, плазмохімічний піроліз, плазмовий генератор.