

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 радіофармацевтичних 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 газоаерозольного димового залишку з використанням синтез-газу утворюваного в плазмо 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 °С 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 газоводі (P); 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.

ABSTRACT

Nehoda N. Medical waste management using mobile plasma technologies
Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 10 – “Natural Sciences,” specialty 101 – “Ecology.” Kyiv National University of

Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of reducing the negative impact of anthropogenic load of the population and city infrastructure on its urban ecosystems.

In Chapter 1, according to WHO documents, a health-oriented city (HOC) is defined as a city in which urban development, transport infrastructure planning, architecture, environmental ecology, health care, and education, all policies for the creation and development of services and living conditions are organized to maximize and support the physical, mental, and social health of its residents based on many basic principles.

One of these principles emphasizes that the ZOM must be completely free of any accumulation of municipal and household solid and liquid waste, excluding its transportation within the city and the creation of landfills and dumps even outside the city limits. This principle is particularly painful for the citizens of Ukraine and for its national security, as in the context of full-scale war on the territory of Ukraine, it creates serious and complex environmental and medical problems that require new technological approaches and highly efficient technologies for the processing, disposal, and destruction of hazardous medical and pharmaceutical waste (HMPW). At the same time, legally, HMW is not included in the normal system of municipal solid waste management [1].

Currently, the most common methods of final disposal of any municipal and household waste (MHHW) are incineration in incinerators or in the open air, as well as burial in landfills and dumps. However, the vast majority of NMWs end up in general waste streams and are sent to landfills and dumps, where they can enter the food chain. Therefore, the World Health Organization (WHO) has not recommended low-temperature incineration of any MSW, especially in facilities with low levels of exhaust gas purification. Thus, WHO recommendations exclude the use of low-temperature incineration without proper environmental purification of flue gases. Ideally, the waste combustion temperature in the primary chamber of the incinerator

should be above 800°C, and in the secondary afterburning chamber — at least 1000°C.

As an alternative approach to creating health-oriented cities, the paper considers the Zero Waste strategy that has been implemented in certain cities, such as Ljubljana (Slovenia), San Francisco (USA), Kapanori and Canberra (Australia). However, no municipality has yet achieved complete elimination or cessation of waste accumulation. At the same time, it has become apparent that in most large industrial cities and even countries, it is difficult or even impossible to create a full-fledged infrastructure for Zero Waste. Therefore, today this strategy remains more of an ideological strategic guideline than a large-scale practical reality. One of the reasons for this situation is that the technological content of the Zero Waste strategy is not suitable for full-fledged, medically and environmentally safe, universal implementation, primarily in the system of handling non-hazardous municipal waste.

As an alternative approach to creating health-oriented cities, the paper considers the Zero Waste strategy that has been implemented in certain cities, such as Ljubljana (Slovenia), San Francisco (USA), Kapanori and Canberra (Australia). However, no municipality has yet achieved complete elimination or cessation of waste accumulation. At the same time, it has become apparent that in most large industrial cities and even countries, it is difficult or even impossible to create a full-fledged infrastructure for Zero Waste. Therefore, today this strategy remains more of an ideological strategic guideline than a large-scale practical reality. One of the reasons for this situation is that the technological content of the Zero Waste strategy is not suitable for full-fledged, medically and environmentally safe, universal implementation, primarily in the NMW management system.

The environmental and medical-biological effects of implementing Zero Waste for medical waste in Kyiv will, first and foremost, reduce the frequency and number of chronic and infectious diseases among the population, and thus reduce the number of hospitalizations due to chemical skin and respiratory diseases by reducing air pollution and the risks of surface and groundwater contamination.

Therefore, the new Zero Waste strategy in the medical waste management system should not only reduce the amount of medical waste, but also effectively eliminate all links in the existing chain on which the entire medical waste management system is based: collection → processing → disposal → possibility of unauthorized reuse → hazardous transportation → formation, accumulation, and storage of hazardous concentrated technologically non-recyclable residues.

The implementation of the Zero Waste municipal project for medical waste in Kyiv based on the Plazmon-3M technology will make it possible to safely dispose of 100% of of NMW by transforming it into non-toxic compounds at high temperatures, significantly simplify the system for handling hazardous MW, eliminate numerous dangerous transport operations involving NMW and, as a result, eliminate the risks of medical and environmental contamination and minimize logistics costs. However, plasma technologies for waste-to-energy (WTE) projects are still in the research and experimental stage.

Section 2 assesses the anthropogenic impact of urban ecosystem conditions on the health of the population of Kyiv. The research identified and proved that the creation of a health-oriented urban space is impossible without reducing municipal and household waste. with particular attention being paid to the problem of medical waste generation, which is associated with full-scale intrusion, as well as the consequences - air, water, and soil pollution, loss of biodiversity, destruction of ecosystems, etc. The methodology for assessing risks for the urban population has been improved and the use of risk indices for hazardous phenomena in the territory of urban ecosystems of natural and technogenic nature has been proposed.

The state and impact of existing influences were characterized by assessing and describing the concentrations of pollutants in the components of the environment, assessing the level and intensity of noise, vibrations, etc., and comparing them with MPCs.

According to the assessment, it was proven that the amount of waste generated directly depends on the level of well-being of the population, and the imperfection and disorganization of the waste management system directly threatens the general

health of the population. At the same time, the main risks (carcinogenic and non-carcinogenic) arising in the course of urban life, which are largely related to atmospheric pollution, were calculated. An algorithm was also developed to study the cause-and-effect relationship between anthropogenic and climatic factors and their impact on the urban environment and public health.

It has been determined that one of the main criteria for assessing the health-oriented nature of the urban environment is the compliance of urban infrastructure with the needs of the population, the level of which is assessed on the basis of the hygienic criterion of the urban environment. At the same time, it has been shown that the risks of developing carcinogenic and non-carcinogenic risks are largely associated with atmospheric air pollution, and the incidence of disease among the population in anthropogenically loaded areas is 1.5 times higher than in areas with lower loads.

Section 3 analyzes global and domestic technological and environmental experience in the development, creation, and application of plasma arc high-temperature technologies for the disposal of NMW. A study was conducted on the technological, environmental, and operational parameters of a plasma installation for high-temperature plasma-chemical disposal of toxic substances in field conditions in compliance with the sanitary and hygienic requirements of STANAG 2982 “Essential field sanitary requirements.” The aim is to standardize the minimum sanitary standards to be observed by NATO forces during field operations. Standardized NATO standards that define the minimum set of sanitary and hygienic rules for military personnel in field conditions - “Essential field sanitary requirements”.

At the same time, plasma chemical technologies are capable of destroying chlorinated organic compounds with an efficiency of up to 99.9% with very high destruction characteristics of dioxins and furans at the level of $(5-9) \cdot 10^{-3}$ ng/m³, which is much lower than the regulatory environmental standards.

In Ukraine, experimental mobile plasma arc installations “Plasmon-1,2,3” were created on the basis of the domestic direct current plasma generator PUN-1, in

which air can be used as a plasma-forming gas and its maximum electrical power is 90 kW and the temperature in the reagent combustion zone (RCZ) can be maintained at 1500-3500°C and ensure a degree of molecular destruction of waste up to 99.95%.

An important feature of plasma pyrolysis compared to traditional incineration of MSW is that preliminary waste sorting is greatly simplified or becomes completely unnecessary. At the same time, the high temperatures and powerful ultraviolet radiation of the plasma arc significantly accelerate the destruction of waste with the complete destruction of pathogenic microorganisms. And high temperatures in the reagent zone minimize the duration of heat treatment of waste and ensure high productivity in its processing/disposal.

The experimental-industrial mobile plasma arc installation “Plasmon-3M”, on which the author's research on the processes for processing and disposal of medical waste was carried out, has the following characteristics: 10-12 tons/day; moisture content - up to 20%; inorganic component - up to 20%; special additives - 1.5 tons/day; coke - 0.4 tons/day. At the same time, the Plasmon-3M unit can also be used to destroy virtually all categories of hospital waste: cotton products, various plastics, cellulose-polymer bandages, polyvinyl chloride blood bags, gloves and catheters made of polyurethane or silicone rubber, polyethylene and polymethyl methacrylate materials, glass and others, as well as for the processing of radioactive pharmaceutical waste.

The energy balance of smoke mixture purification processes in the plant is determined by comparing the energy consumption for plasma generation and reaction process maintenance with the amount of energy that can be obtained in the form of solid, liquid, or gaseous useful products. Plasmochemical pyrolysis technology eliminates virtually all the shortcomings of other existing waste disposal technologies and represents a comprehensive solution for the safe disposal of medical waste with over 99% conversion of organic matter into gas and no need for segregation of chlorinated hydrocarbons.

In Section 4 of the paper, a simplified express methodology was proposed for assessing the energy balance and purification parameters of the final smoke mixture to evaluate the efficiency of the Plazmon-3M plasma unit to determine its energy balance and purification parameters of product mixtures.

The section describes the results of experimental laboratory measurements and factory tests of the Plazmon-3M mobile unit. In particular, it presents the results of research into the operating characteristics of the PUN-1 plasma generator and the results of spectrophotometric measurements of the composition of the mixed solution filtered by a labyrinth liquid filter. The samples were analyzed using an FT-801 spectrophotometer.

In a plasma chemical reactor, when burning solid medical organic waste containing carbon, high-energy synthesis gas is also produced, which is much easier, more economical, and more efficient to use in its unpurified form for the plasma unit's own needs in order to save external electricity consumption and “afterburning” hazardous substances formed in the smoke mixture in order to bring the exhaust smoke mixtures into compliance with the environmental requirements of state and international standards, rules, and methods for the safe disposal of medical waste, including infected waste.

The results of experimental temperature measurements of temperature distribution (temperature profile of the reactor reagent space along the height) along the central axis of symmetry of the cylindrical reactor of the reaction zone, from the horizontal plane of the plasma jet nozzle to the outlet of the exhaust smoke gas-aerosol mixture allow us to evaluate the efficiency of the process, the stability of the installation, and the level of by-product formation.

To improve the cooling and purification system for liquid and smoke mixtures, an additional self-cleaning filtration unit for liquid contaminated residue is used. Another additional external unit is used for afterburning gas-aerosol smoke residue using synthesis gas generated in the plasma chemical reactor of the installation.

Based on the results obtained in this section, a description of the thermophysical, physicochemical, and plasma-chemical processes and transformations at the stages of the reactor and post-reactor technological cycles is provided.

To verify the correctness of theoretical ideas about the mechanism of the plasma-chemical destruction of medical waste, a pilot laboratory installation “Plasmon-1” was developed and created, and later experimental industrial installations “Plasmon-2” and “Plasmon-3M”.

Temperature regimes in different zones of the plasma-chemical reactor were determined at the initial, working, and final stages of the process in order to avoid sudden changes in thermal loads on structural elements.

The temperature in the afterburning chamber is 1200–1400°C with a smoke gas residence time of ~2 s, which is sufficient for highly efficient destruction of all toxic organic products, including halogen-containing ones.

At the same time, in the reactor with the PUN-1 plasma generator, in order to create a steady state and organize the process with a clear distribution of combustion, recovery, dry distillation, and drying zones, it is necessary to maintain a sufficient height of the waste layer.

The results obtained and the practical experience gained have made it possible to move on to solving specific waste disposal problems with the aim of protecting the environment, developing new effective technologies, and creating reliable facilities for the disposal of particularly toxic types of waste. At the same time, the specific properties of medical waste require compliance with ethical, epidemiological, and environmental standards when working with it. These standards prohibit the application of general waste management principles, such as sorting, pre-processing, and use as secondary raw materials. In addition, it is strictly forbidden to mix it with household waste and bury it in municipal landfills.

At the outlet of the gas duct, i.e., at the outlet of the bag filter, the MSI-2000 gas analyzer was used to measure the content of nitrogen oxide and carbon monoxide

in the smoke aerosol residues. The measurement range for nitrogen oxide was $\text{NO} \Rightarrow 0-1227 \text{ mg/m}^3$, and for carbon monoxide - $\text{CO} \Rightarrow 0-2000 \text{ mg/m}^3$.

The most interesting fact is that during the experiments, almost from the beginning of the process, throughout the stages of volatile release and the carbon burnout stage, no nitrogen oxide was detected in the smoke gases.

The OKSY 5M gas analyzer was used for test measurements of CO_2 , oxygen O_2 emissions into the atmosphere; carbon monoxide CO ; nitrogen oxide NO ; nitrogen dioxide NO_2 ; sulfur dioxide SO_2 ; pressure in the gas duct (P); and the temperature T°C of flue gases during test maintenance of the installation.

The experimental installation "Plasmon-3" based on a domestic plasma generator has received a certificate of conformity for serial implementation, has passed factory tests, and is ready for serial implementation in the hazardous medical waste management system, as well as for conducting laboratory studies of high-temperature plasma-chemical destruction processes.

Experience in creating and operating plasma chemical plants for various purposes shows that this technology is not yet ready for large-scale mass destruction of mixed municipal and household waste streams at landfills and dumps. However, it is the only mobile technology capable of destroying hazardous medical waste directly at the site of its generation or accumulation in order to remove it from the general municipal waste streams.

An improved external cooling and purification unit for liquid and smoke mixtures. In the case of incineration of medical waste with an unpredictable, particularly hazardous chemical composition, an additional external filtration unit is used.

To reduce external energy costs, the combustible product mixture formed in the plasma chemical reactor is fed back into the reactor's reagent zone or into an external afterburning unit to improve the environmental and economic performance of the plant, resulting in energy savings of up to (20-40)%.

Keywords: *health-oriented city, urban ecosystem, anthropogenic impact, hazardous medical and pharmaceutical waste, municipal waste, environmental*

risks, technogenic impact, zero waste strategy, environmental safety, plasma chemical pyrolysis, plasma generator