

УДК 628.4.046

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.03010>**Володимир Ващенко,**

доктор фізико-математичних наук,
професор Міжвідомчого наукового центру фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України,
просп. Шевченка 1, м. Одеса, 65044, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-21279>
E-mail: nucleoroid@gmail.com

Ірина Кордуба,

доктор технічних наук,
доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>
E-mail: uaror-korduba@ukr.net

Хафез Ненсі Махмуд,

аспірантка кафедри екології,
Національний авіаційний університет,
просп. Любомира Гузара 1, м. Київ, 03058, Україна,
E-mail: uaror-korduba@ukr.net

Негода Назарій

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0082-6027>
E-mail : nvnegoda33@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ПІРОЛІЗУ МЕДИЧНИХ ВІДХОДІВ

АНОТАЦІЯ. У сфері поводження з відходами виділяється пріоритетний напрям - захист довкілля та здоров'я людини від негативного впливу відходів, зокрема медичних та фармацевтичних. Термін "медичні відходи" визначає повну сукупність усіх категорій та видів медичних відходів (МВ) які в Україні віднесені до класу небезпечних. Нестримне зростання кількості та темпів виробництва небезпечних МВ в умовах російсько-української війни (МВ) критично загострює екологічну ситуацію в Україні. Але існуючі методи та технологічні засоби не спроможні забезпечити їх повну екологічно безпечну переробку та утилізацію. У статті проаналізовано особливості методу спалювання медичних, фармацевтичних та лікарняних відходів. Продемонстровано, що плазмо дугові технології та технології плазмохімічного піролізу є добре перевіреними і комерційно привабливими для їх застосування в промислових масштабах і в тому числі в медичній галузі для утилізації, переробки та знищення небезпечних відходів. Спалювання медичних відходів на відкритому повітрі або в інсинераторах має температурні обмеження не більше 500 °С. В роботі, в якості високотемпературної альтернативи інсинерації медичних відходів, розглядається технологія плазмохімічного піролізу при 1100-1250 °С що реалізована у вигляді мобільної плазмопіролізної установки «Плазмон-3», розроблена та створена на базі вітчизняного плазмо генератора ПУН-1. Показано переваги застосування високотемпературного плазмохімічного піролізу, що роблять його, з точки зору екологічної безпеки поза конкурентним і на відміну від димо-виділяючих аналогів, технології плазмохімічного піролізу знищують медичні відходи не утворюючи екологічно небезпечних залишків..

Ключові слова: медичні відходи, спалювання, інсинерація, плазмохімічний піроліз, військові медичні відходи, мобільні плазмопіролізні установки, плазмогенератор.

TECHNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL FEATURES OF PLANTS FOR PLASMA-CHEMICAL PYROLYSIS OF MEDICAL WASTE

ABSTRACT. *The protection of the environment and human health from the negative impact of waste, in particular medical and pharmaceutical waste, is a priority in the field of waste management. The term "medical waste" defines the full range of all categories and types of medical waste (MW) that are classified as hazardous in Ukraine. The unrestrained growth of the amount and rate of production of hazardous medical waste in the context of the Russian-Ukrainian war (MW) critically exacerbates the environmental situation in Ukraine. However, existing methods and technological means are not able to ensure their complete environmentally safe processing and utilization. The article analyzes the peculiarities of the method of incineration of medical, pharmaceutical and hospital waste. It is demonstrated that plasma arc technologies and plasma-chemical pyrolysis technologies are well-proven and commercially attractive for their application on an industrial scale, including in the medical field, for the disposal, recycling and destruction of hazardous waste. The incineration of medical waste in the open air or in incinerators has temperature limits of no more than 500 °C. The paper considers the technology of plasma-chemical pyrolysis at 1100-1250 °C as a high-temperature alternative to medical waste incineration, which is implemented in the form of a mobile plasma pyrolysis unit "Plazmon-3", developed and created on the basis of the domestic plasma generator PUN-1. The advantages of using high-temperature plasma-chemical pyrolysis are shown, which make it, in terms of environmental safety, beyond the competition and, unlike smoke-emitting analogues, plasma-chemical pyrolysis technologies destroy medical waste without forming environmentally hazardous residues*

Keywords: *medical waste, incineration, incineration, plasma-chemical pyrolysis, military medical waste, mobile plasma pyrolysis units, plasma generator.*

1. Постановка проблеми. В результаті нестримного зростання та широкого застосування одноразових медичних матеріалів в умовах російсько-української війни на території України об'єми та темпи виробництва небезпечних медичних відходів (МВ) критично зростають. При цьому на сьогодні усі медичні відходи в Україні віднесені до класу небезпечних а термін "медичні відходи" визначає повну сукупність усіх категорій та видів медичних відходів. Згідно з [1-2] та з іншими правовими положеннями/рекомендаціями, медичні відходи в Україні класифікують за категоріями: А – епідемічно безпечні медичні відходи; В – епідемічно небезпечні медичні відходи; С – токсикологічно небезпечні медичні відходи; D – радіологічно небезпечні медичні відходи. Але реально існуюча технологічно недосконалість системи поводження з медичними відходами загрожує здоров'ю громадян і критично посилює екологічну кризу.

Найпоширенішим методом утилізації медичних відходів практично у всіх країнах світу є їх спалювання на відкритому повітрі або в інсинераторах. Однак, через відсутність сучасних високопродуктивних та екологічно безпечних технологій переробки та утилізації медичних відходів, до 95% МВ потрапляють на санкціоновані та несанкціоновані полігони і сміттєзвалища, створюючи при цьому важкі ризики хімічних, токсичних, медико-біологічних, канцерогенних, мутагенних, радіаційних та багатьох інших впливів на здоров'я громадян України. При цьому неправильне поводження з небезпечними МВ і їх неконтрольоване поширення може призводити до інфікування медичного персоналу та населення через ураження шкіри, органів дихання та травлення.

Багато медичних відходів можуть містити активні їдкі, канцерогенні, мутагенні, подразнювальні, сенсibiliзуючі, горючі та вибухонебезпечні властивості. При цьому морфологічний склад медичних відходів не прогнозованим чином дуже залежить від специфіки та особливостей медзакладів, що їх утворюють, та від багатьох інших факторів.

2. Аналіз екологічної небезпеки процесів прийнятих в системі поводження з медичними відходами в Україні. Найчастіше утилізація небезпечних медичних відходів (МВ) здійснюється шляхом їх відкритого спалювання на територіях медичних чи спеціалізованих ліцензованих закладів. Процес відкритого горіння медичних відходів на відкритому повітрі як правило має температуру яка не перевищує 500-700 °C. Такі низькі температури недостатні для повної екологічно безпечної термічної утилізації та повного знищення МВ. Пояснюється це тим, що за таких низькотемпературних умов утворюються нові, також не менш небезпечні, стійкі хімічні сполуки - діоксини, фурані, соляна кислота та інші токсиканти, що

викидаються в довкілля у вигляді димових газо-аерозольних та твердих і зольних залишків. Але стійкі молекули цих речовин не демолуляризуються під час відкритого спалювання на повітрі. Тому вони попадають в навколишнє середовище і далі накопичуються в харчових циклах.

Єдиним виходом з такої ситуації може бути додаткове допалювання таких залишків за допомогою спеціально встановлених в інсинераторах додаткових камер при температурах 1100-1250 °С. Однак, застосування таких камер допалювання часто не дає бажаного ефекту доведення складу скидваних в атмосферу димових газо-аерозольних продуктів до норм та вимог чинного, оновленого за євро стандартами, законодавства України.

З огляду на таку ситуацію МОЗ України своїм Наказом №1602 [3] зробило важливі зміни в Державних санітарно-протиепідемічних правилах і нормах щодо поводження з медичними відходами, зміни спрямовані на зменшення небезпечних ризиків та блокування шляхів потрапляння небезпечних речовин та матеріалів на побутові полігони/звалища.

В наказі №1602 головні новації стосуються класифікації медичних відходів. До безпечних відходів категорії “А” тепер включені харчові відходи інфекційних, фтизіатричних і дерматовенерологічних стаціонарів, а також первинна упаковка лікувальних та профілактичних засобів (ЛПЗ), за виключенням первинної упаковки токсичних, сильнодіючих і наркотичних ліків.

Інфекційні небезпечні медичні відходи категорії “В” (крім гострих медичних виробів), забруднені біологічними рідинами тепер, після їх оброблення, дозволено направляти на вторинне перероблення. Також значно зменшився список токсикологічно небезпечних відходів.

До категорії “С” тепер входять тільки медичні відходи, що забруднені цитостатиками, гено-токсичними, отруйними і сильнодіючими лікарськими засобами та стоматологічними амальгамами. При цьому, тепер при поводженні з МВ з вмістом ртуті, важких металів та токсикантів дозволяється не дотримуватися Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм.

За новими нормами для усіх медично-побутових відходів, окрім харчових, вимагається їх роздільне збирання з наступною передачею для повторного використання та вторинної переробки. Медичні та інші заклади охорони здоров'я теж мають право обробляти контаміновані біологічними рідинами негострі медичні відходи й передавати їх для вторинної переробки. А якщо в медичному закладі немає відповідних умов для їх переробки, то в такому випадку відходи потрібно заактувати й передавати їх на спалювання.

Важливою екологічною новацією також є заборона процедур хімічної дезінфекції інфікованих небезпечних МФВ, що виключає операцію небезпечного замочування й ополіскування відходів.

З'явилась також нова норма, що вимагає призначення фахівців відповідальних за поводження з відходами у закладах охорони здоров'я (ЗОЗ) які зобов'язані займатися розробленням типових схем поводження з МВ та регулювання усіх дій при поводженні з МВ в ЗОЗ від їх утворення і до їх знешкодження чи транспортування, а також відповідати за виконання цих схем.

Однак, за рамками Наказу №1602 залишається проблема забезпечення сучасними технологіями для повної екологічно чистої та безпечної утилізації медичних відходів. При цьому особливу увагу слід звернути саме на технологічний аспект утилізації відходів інфекційних та туберкульозних відділень, ветеринарних відходів та відходів з ризиками рівня біологічної зброї, а також медичних відходів заражених небезпечними хворобами (ВІЛ, гепатит). При цьому, не дивлячись на значну громіздкість та перевантаженість системи поводження з медичними відходами більшість методів та засобів дезінфекції та знезараження медичних відходів вимагають їх додаткового фінішного спалювання з послідуочим транспортуванням неспалюваних зольних залишків на сміттєзвалища та полігони.

Отже, на сьогодні ситуація, що склалася, суперечить принципам державної регуляторної політики і прямим чином загрожує національній безпеці України та життю і здоров'ю громадян, руйнує міжнародні інвестиційні структури.

Для створення адекватної ефективної інноваційної технологічної інфраструктури для правильного поводження з медичними відходами та їх екологічно безпечної та ефективної утилізації, потрібен, перш за все, їх належний облік та екологічний моніторинг динаміки реальних масштабів. окресленої проблеми. При цьому впроваджені принципово нові технологій утилізації МВ до повного їх екологічно безпечного знищення повинні повно масштабно охоплювати утилізацію всього асортименту небезпечних медичних відходів, що виробляються більше як у 70-и тисячах лікарень, госпіталів та інших медзакладів та установ України.

Небезпечні ризики також має хімічна дезінфекція/знезараження різних медичних відходів перед їх офіційною передачею ліцензованим компаніям для їх утилізації. В даному разі виникають додаткові екологічні ризики для здоров'я медичного та транспортного персоналу в результаті спільного синергетичного впливу МВ разом з хімічними дезінфектантами.

Для вирішення цієї проблеми потрібно створювати нові високотемпературні технології, здатні радикальним чином здійснювати управління медичними відходами з повноцінним гарантованим екологічним захистом та відновленням територій громад.

В Україні, для спалювання лікарняних біологічних відходів почали застосовувати відносно дорогі інсинератори які, згідно з висновками ВООЗ є технологіями, що можуть утилізувати високо небезпечні медичні відходи згідно з найжорсткішими у всьому світі вимогами нового євростандарту. Вважається, що такі інсинератори можна експлуатувати в радіусі 50 та 100 м від лікарень чи житлових будівель.



Рис. 1. Загальний вигляд інсинератора „Мюллер” С.Р.50М виробництва Франція.

Fig. 1. General view of the incinerator "Müller" S.R.50M, manufactured in France.

Для прикладу, французький інсинератор «Мюллер» С.Р.50М для спалювання органічних твердих відходів повністю знищує мікроорганізми і якщо будь-який параметр викидів перевищує відповідний євростандарт, то робота інсинератора автоматично блокується. Глибина інсинерації інфікованих медичних відходів досягає 95%, а решта 5 % зольного залишку може транспортуватись на сміттєзвалище. При середній питомій теплоті згорання відходів 3500 ккал/кг методом високотемпературного піролітичного спалювання при температурі до 850 °С в камері піролізу, з подальшим допалюванням піролізних газів при 1100-1250 °С в додатковій камері без утворення «чорного диму» і тонкодисперсного пилу продуктивність інсинераторів «Мюллер» становить 50-60 кг/годину.

В інсинераторі «Мюллер» С.Р.50М знищуються горючі медичні відходи, включаючи і епідеміологічно небезпечні, окрім радіоактивних, небезпечні біологічні відходи, прострочені та браковані фармпрепарати, стійкі органічні забруднювачі, непридатні та заборонені пестициди.

Продуктивність інсинератора „Мюллер” С.Р.50М складає 50-60 кг/годину, при середній калорійності відходів 3500 ккал/кг. Цей інсинератор знищує будь-які горючі органічні відходи, за винятком радіоактивних: небезпечні біологічні відходи ветеринарії, тваринництва, птахівництва, м'ясопереробної промисловості, прострочених фармацевтичних препаратів і відходів фармацевтичної промисловості, стійких органічних забрудників, непридатних і заборонених пестицидів. Але при цьому слід зауважити, що медичні відходи з такою калорійністю зустрічаються зовсім не часто. При цьому інсинератор „Мюллер” С.Р.50М має досить громіздкі габарити та високу матеріалоемність при його незначній непромисловій продуктивності. А принципова технологічна температурна обмеженість будь-яких інсинераторів полягає в тому, що для поглиблення “вигорання” екологічно небезпечних речовин, заново утворюваних в процесах горіння самих медичних відходів, потрібна додаткова кількість повітря спрямованого в осередок горіння. Але закачування додаткового “холодного” повітря в зону горіння знижує температуру в камері згорання медичних відходів до 400-500 °С, що, наприклад, не забезпечує гарантоване знищення патогенних екстремофільних мікроорганізмів. А застосування не спалювальних (не вогневих) засобів, таких як автоклави та гідроклави, для стерилізації відходів парою з прямим і непрямим нагріванням все одно вимагає подальшого додаткового спалювання оброблених таким чином медичних відходів у вогневих печах.

Така ж ситуація поширюється і на дуже дорогі методи мікрохвильової дезінфекції - стерилізовані таким чином медичні відходи також транспортуються разом із комунальними відходами на звалища, або спалюються.

На цьому фоні єдиною технологією здатною легко створювати в камері згорання медичних відходів температури до 10 000 °С і більше є плазмо-дугова технологія плазмохімічного піролізу. Також існують комерційно привабливі технології плазмохімічного піролізу медичних відходів які легко масштабуються для їх застосування як в локальних місцевих так і в промислових масштабах для утилізації, переробки та знищення усіх видів медичних відходів. Усі переваги високотемпературного плазмохімічного піролізу та його екологічні вигоди роблять цю технологію з точки зору екологічної безпеки поза конкурентною при обробці небезпечних токсичних відходів. І, на відміну від димовиділяючих аналогів, плазмохімічні піролізні технології знищують медичні відходи без утворення екологічно небезпечних залишків.

При застосуванні плазмохімічного піролізу для утилізації медичних відходів кількість токсичних діоксинів і фуранів значно нижча за прийняті стандарти викидів і не вимагає сортування/розділення небезпечних відходів. При цьому патогенні мікроорганізми знищуються повністю.

Отже, відкрите традиційно спалювання медичних, біомедичних і хімічних відходів на повітрі має небезпечні екологічні наслідки на тривалих відрізках часу. Тому розробка та створення нових економічно доцільних технологій для екологічно чистої та безпечної утилізації усіх видів медичних відходів набула характеру критичної необхідності. І, на сьогодні вже багато компаній у світі, наприклад: Pyrolysis Systems Inc., Канада; Siemens, Німеччина; Plasma Energy Applied Technology Inc., США; Plasmapole, Франція та інші розробляють високотемпературні плазмодугові системи різного тематичного призначення.

Аналіз світових технологій, екологічний досвід та сучасний стан застосування плазмопіролізних технологій для утилізації медичних відходів

Плазма є сумішшю нейтральних і заряджених частинок. Останні мають високу кінетичну енергію. Іонізовані заряджені частинки плазми здатні вступати в реакції рекомбінації з відірваними електронами і в цьому процесі виділяти значну енергію у формі ультрафіоле-

тового випромінювання. Кінетична енергія частинок переходить в теплову енергію, якої достатньо для деструкції хімічних речовин. Завдяки присутності в плазмі заряджених і збуджених частинок плазмове середовище стає високореактивним і здатним каталізувати гомогенні та гетерогенні хімічні реакції.

В процесі плазмо-хімічного піролізу тверді медичні відходи з вмістом вуглецю газифікуються, утворюючи газоаерозольні суміші, які піддаються охолодженню і очищенню. Очищену суміш можна використати для виробництва теплової чи електричної енергії, а також для виробництва різних палив - етанолу, водню, горючого газу. Неорганічні матеріали розплавляються під дією плазмових факелів і відбираються окремо у формі склоподібного шлаку. Високотемпературне тепло утворюваних в плазмохімічних реакторах горючих синтетичних газів можна застосувати у самому ж піролізному циклі з метою економії зовнішніх енергоресурсів. При цьому вплив плазмо-хімічного піролізу на навколишнє середовище з точки зору екологічної безпеки та його технологічності перевершує інші методи і технології поводження з медичними відходами.

На сьогодні, на різних підприємствах світу технології плазмодугового нагрівання вже використовуються в цілодобовому промисловому режимі. На заводі у Дефіансі в США експлуатується шість плазмових факелів загальною потужністю 2,5 мегават для переробки більше як 280 тон металобрухту за одну робочу зміну.

Історично першу демонстрацію прототипного зразка електродугового інсинератора у 1987 р., здійснила компанія Westinghouse Environmental Services у США. А приблизно через рік у 1988 р., в угорському Інституті електротехнічної промисловості було розроблено нову пілотну установку плазмового реактора для знищення відходів хімічної промисловості [4] А ще через рік у 1989 році Retech Incorporation з Каліфорнії та Міністерство енергетики США ініціювали спільну програму знищення різноманітних відходів за допомогою плазмово-дугових технологій [5].

У 1994 році була створена перша обертальна плазмове піч для обробки хлорованих органічних сполук з ефективністю знищення органічних забруднень 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.

Далі, на протязі багатьох років в різних компаніях світу досліджувалися процеси плазмодугового очищення багатьох сотень різних типів відходів в промислових масштабах. При цьому ефективно перероблювалися та утилізувалися тверді побутові та медичні відходи, зола, автошини, вугільні та шламові відходи, поліхлорований біфеніл, небезпечні види золувиносу, фарби, розчинники, різні матеріали із звалищ і полігонів, а також низько радіоактивні відходи та інше.

Компанії CSIRO/Siddons Ramset Ltd's Plascon, Retech, Westinghouse Plasma Inc., Plasma Energy Corporation та інші компанії продовжують розробку великих системи для плазмової утилізації відходів.

В процесі плазмохімічного піролізу основними сполуками, що утворюються з вуглецевої речовини є метан, монооксид вуглецю, водень, вуглекислий газ і молекули води. Плазмохімічний піроліз об'єднує термохімічні особливості плазми з процесом піролізу за допомогою високотемпературних плазмових дуг в середовищах з дефіцитом кисню для повної глибокої деструкції небезпечних речовин у відходах на простіші молекули. При цьому важливою особливістю плазмпіролізу в порівнянні з традиційного спалювання ТМВ є те, що попереднє сортування хлорованих відходів значно спрощується або стає зовсім непотрібним.

Термін "плазмохімічний піроліз" визначає процес розкладу органічних сполук, що здійснюється в низькотемпературній плазмі із середніми енергіями молекул порядку 0,1-50 eV. Плазмохімічний піроліз вуглеводнів може здійснюватися безпосередньо в електричній дузі (електрокрекінг), або в плазмовому струмені водню чи іншого газу. Будь-який матеріал під впливом термічної плазми з температурою $T \sim 10^4$ °C, розкладається на свої елементарні складові. Саме цей ефект дає можливість організації технологічного процесу плазмової переробки для руйнування стійких екологічно небезпечних хімічних сполук, що містяться в

медичних відходах або утворюються в процесі їх спалювання. У порівнянні з існуючими технологіями, обробка медичних та інших відходів термічною плазмою має наступні переваги:

1. При високих температурах виникають реакції плазмохімічної деструкції небезпечних молекул та важких забруднюючих молекулярних комплексів, а також відбувається розплавлення та оскловування неорганічної складової медичних відходів, що дозволяє значно зменшити об'єми відходів і герметично коксувати забруднення, що важко руйнуються.

2. Висока щільність енергії в плазмовому факелі до 200 ГДж/м^3 , дає можливість створювати високопродуктивні мобільні та стаціонарні установки з меншими капітальними витратами. Компактні розміри та висока щільність енергії суттєво скорочують час виходу на режим та на включення/відключення установок.

3. Використання електричної дуги як джерела енергії дозволяє відокремити процес тепловиділення від процесу кисневого окислення і при цьому він є незалежним від витрат окислювача або повітря. Використання високотемпературних електричних дуг також знижує витрати різних плазмоутворюючих газів.

4. Потужне ультрафіолетове випромінювання плазмової дуги значно прискорює деструкцію відходів, що є особливо дієвим в процесах піролізу органічних хлоридів. Високі температури [6] у реагентній зоні мінімалізують тривалість термообробки і дозволяють досягти високої продуктивності при переробці/утилізації відходів. Однак, для ефективного управління плазмохімічними процесами потрібно контролювати певний список параметрів піролізу і застосовувати автоматизовані засоби контролю та керування процесами плазмопіролізу.

5. Економічну ефективність плазмохімічних засобів переробки можна підвищити шляхом синтезу різних комерційних продуктів з високою доданою вартістю як для зовнішніх так і для внутрішніх власних потреб.

3. Мета роботи.

Запропонувати нові технологічні підходи та екологічні перспективи високотемпературного плазмохімічного піролізу щодо утилізації небезпечних медичних та фармацевтичних відходів. Розкрити переваги застосування високотемпературного плазмохімічного піролізу.

4. Виклад основного матеріалу.

Мобільні плазмопіролізні установки. В останні роки технологічна критичність ситуації з утилізацією медичних відходів у різних країнах технологічний та екологічний інтерес викликають мобільні плазмопіролізні установки. Технологічна блок-схема, загальний вигляд та конструкційні особливості вітчизняної мобільної плазмопіролізної установки "Плазмон-3" для утилізації медичних відходів, розробленої і виготовленої в Україні, представлена на рис. 4 [7].

Для організації неперервного плазмопіролізного процесу температура в плазмохімічному реакторі повинна підтримуватися на рівні $1100\text{-}1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Причому кожний локальний об'єм газу, що одержується в процесі переробки відходів, повинен перебувати в указаній температурній зоні $\leq 2\text{с}$ [8]. У таких температурних умовах токсиканти повністю розкладаються, а хлор присутній у хлоридній кислоті (HCl) легко утворює солі в процесах очищення. Для блокування повторного утворення токсикантів продукти плазмопіролізу потрібно швидко охолодити. Особливо інтенсивно екологічно небезпечних продуктів піролізу утворюються в діапазоні температур $200\text{-}650 \text{ }^\circ\text{C}$ з максимумом при температурі $\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Для того, щоб хлор зв'язати в стійкі хімічні сполуки процес охолодження продуктів плазмопіролізу завершується їх прокачуванням через вапняний розчин (вапняне молоко) або через розчин соди [9].

Найпоширенішим способом закалювання при плазмопіролізі є охолодження в теплообмінниках. Цей спосіб застосовують для охолодження газів із температурою до $3700 \text{ }^\circ\text{C}$. Також широко використовується метод закалювання продуктів плазмохімічного процесу струменями води або іншого рідкого чи газового реагента.

На рисунку 2 представлена блок-схема мобільної плазмохімічної піролізної установки “Плазмон-3”. Слід відмітити, що ця установка може застосовуватися для перероблення різних радіо фармацевтичних відходів [10].

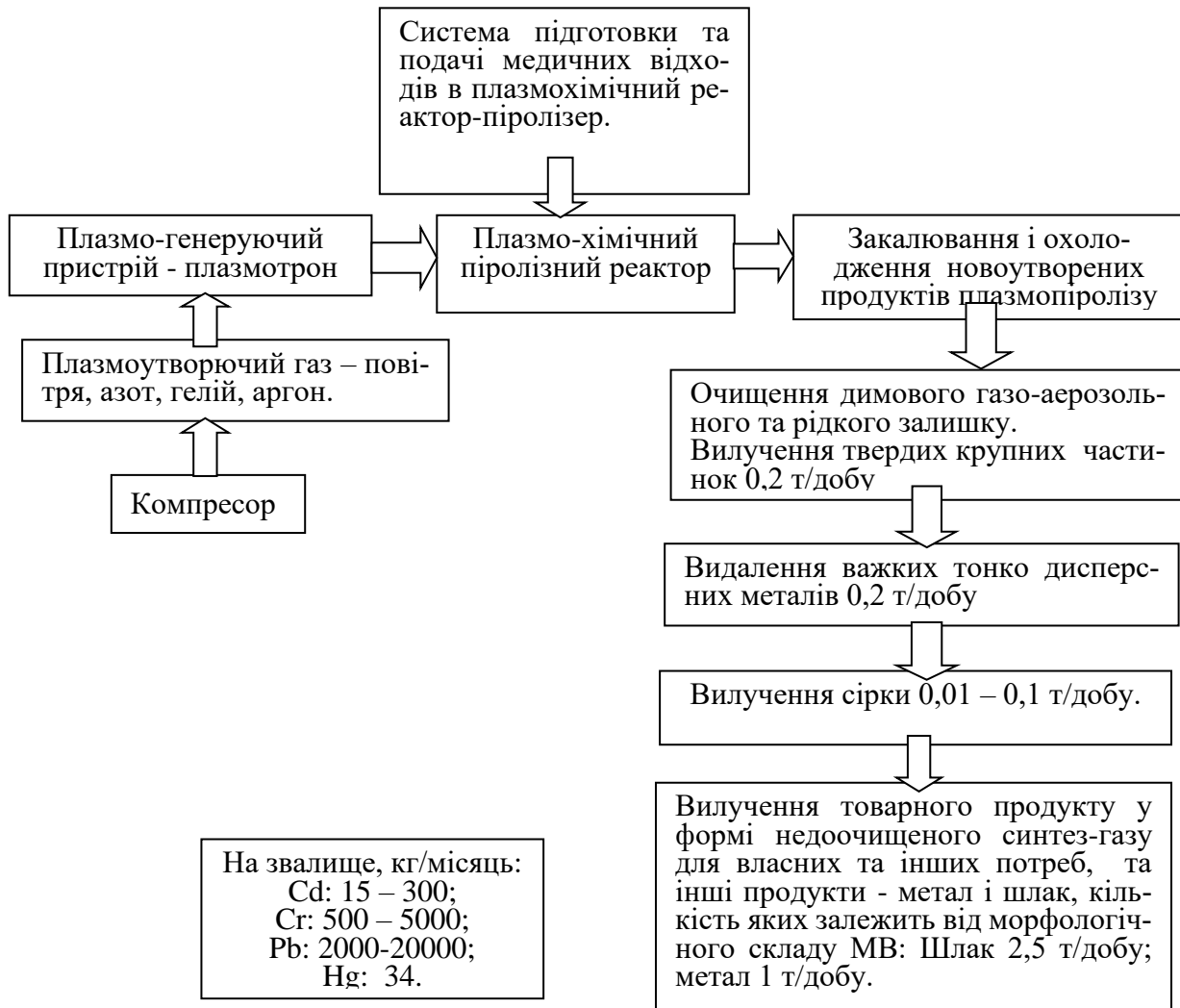


Рис. 2. Блок-схема плазмохімічної піролізної установки “Плазмон-3” для переробки та утилізації медичних відходів з наступними характеристиками: 10-12 т/добу; вологість - 20%; неорганічна компонента – 20%; спеціальні добавки – 1,5 т/добу; кокс – 0,4 т/добу.

Fig. 2. Block diagram of the plasma-chemical pyrolysis plant "Plasmon-3" for processing and disposal of medical waste with the following characteristics: 10-12 t/day; humidity - 20%; inorganic component - 20%; special additives - 1.5 t/day; coke - 0.4 t/day.

Принципова схема промислово-експериментальної плазмопіролізної установки «Плазмон-3», на якій проводилися авторські дослідження процесів плазмо піролізу, представлена на рис. 3.

Головними компонентами кожної плазмопіролізної установки є: плазмо генератор, блоки електроживлення та охолодження плазмо генератора, плазмопіролізний реактор, компресор для подачі плазмоутворюючих газів на плазмо генератор, система підготовки медичних відходів та їх подачі у плазмопіролізний реактор, система охолодження для закалювання продуктів плазмопіролізу, комунікаційний системний блок, пульт керування, блок накопичення неспалюваного залишку, система очищення остаточних димових газоаерозольних продуктів, інші допоміжні та контрольні системи.

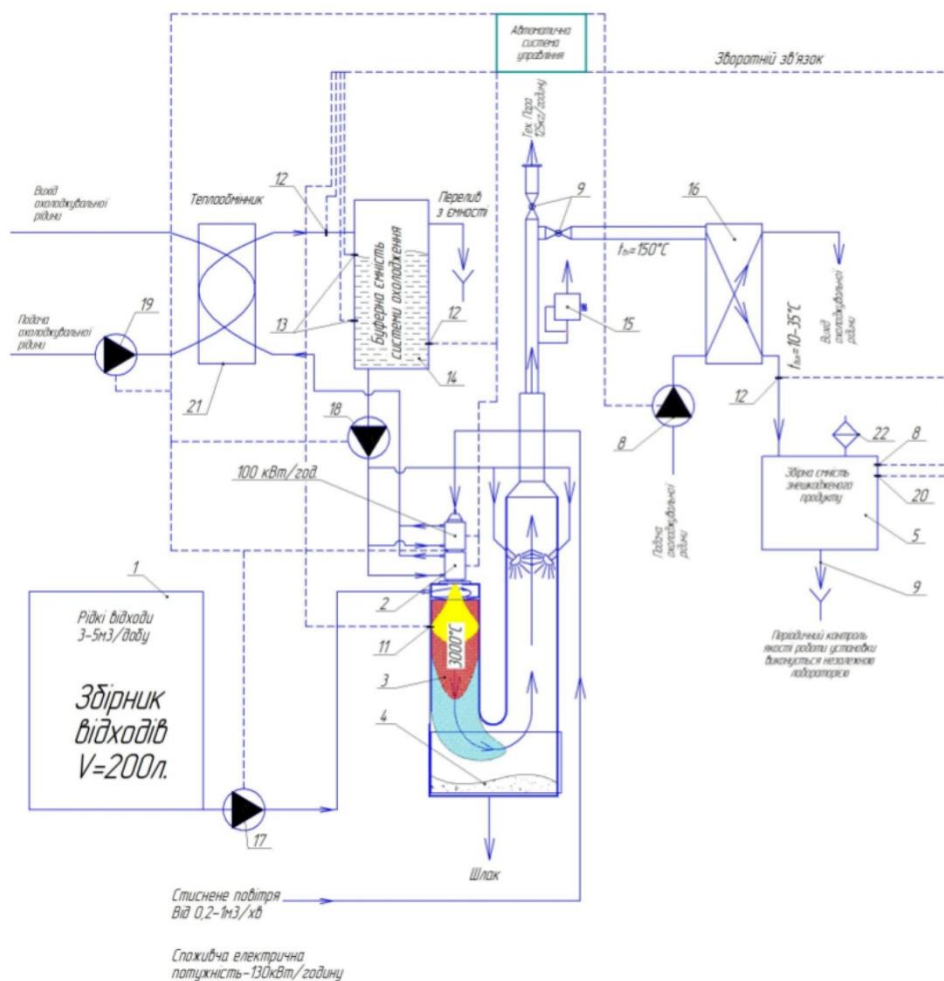


Рис. 3. Принципова схема плазмпіролізної установки Плазмон-3
 Fig. 3. Schematic diagram of the Plasmon-3 plasma pyrolysis unit

Вибір плазмогенератора. Плазмогенератор є центральним елементом кожної плазмпіролізної установки. Історично у перших генераторах плазми в 1960-х роках застосовувалися вугільні електроди. Але короткий робочий ресурс таких електродів блокував розвиток та поширення плазмохімічних піролізних технологій. В результаті подальших розробок і створення нових, ефективніших плазмогенераторів плазмові технології почали застосовуватися для екологізації процесів деструкції високотоксичних і тугоплавких сполук. В плазмохімічних реакторах почали обробляти тверді, газоподібні та рідкі речовини. При цьому потужне ультрафіолетове випромінювання в плазмовому струмені здатне дегідратувати органічний хлор. Подальший потужний імпульс для свого технологічного розвитку плазмогенератори отримали в результаті розвитку космічних технологій у 1960-х роках.

Конструктивно плазмогенератор являє собою електророзрядне джерело, через яке під тиском прокачується плазма утворюючий газ для утворення плазмового струменю, який з катодно-анодного простору плазмогенератора виводиться назовні. В електродугових плазмогенераторах плазмоутворюючі гази можна швидко нагрівати до тисяч і десятків тисяч градусів. Для охолодження конструкційних високотемпературних елементів плазмотрону використовують повітря або воду. І хоча водяне охолодження ускладнює конструкцію плазмотрона, зате воно підвищує робочий ресурс його катоду.

Дослідження, випробування та застосування плазмодугового нагрівання у світі почали швидко розвиватися у 1970-1980 роках плазмові установки вже експлуатувалися на великих промислових підприємствах.



Рис. 4. Загальний вигляд установки «Плазмон-3» для плазмохімічного піролізу медичних відходів
 Fig. 4. General view of the "Plasmon-3" installation for plasma chemical pyrolysis of medical waste

Плазмогенератори (ПГ) з температурою утворюваної ними плазми до $50000\text{ }^{\circ}\text{C}$ називаються низькотемпературними мають широке практичне застосування: зварювання, різання та напилювання металів; електродугова обробка поверхонь; нагрівання матеріалів в плазмових печах; підвищення хімічної чистоти металів і сплавів; наукові дослідження плазмових фізичних та плазмохімічних процесів; плавка металевого пилю; виробництво хімічно високо чистого кремнію і багато іншого. Вплив прямої дуги на оброблюваний об'єкт стає значно інтенсивнішим внаслідок нагрівання від дифузійного руху електронів та від ультрафіолетового випромінювання дугового розряду.

Історично впровадження плазмових технологій розпочалося в умовах недостатності детальних знань про хімічні особливості взаємодії плазми з різними матеріалами. Винятковим було застосування плазми в електрометалургії та при виготовленні оптоволокон.

Плазмогенератори із непрямою електродугою створюють високошвидкісний плазмовий потік з температурами $10\text{-}4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, в залежності від потужності плазмогенератора, від його конструкції та від типу плазмоутворюючого газу. При цьому $10\text{-}30\%$ електричної потужності струменю плазми витрачаються у водоохолоджувальній системі. Якщо ж, в певному діапазоні швидкостей частинок плазми для охолодження гарячого газоаерозольного потоку,

утвореного на виході з плазмопіролізного реактора, застосовувати фізичні аеродинамічні методи які, наприклад, можна реалізувати у вигляді сопла Лавваля, то теплові втрати стають значно меншими. Додатковим тепловим резервом для підвищення ефективності, стійкості та екологічної безпеки плазмопіролізу є утворення плазмопіролізного синтез-газу та його зворотне спрямування в плазмохімічні процеси, що протікають в плазмопіролізному/ плазмохімічному реакторі.

Стійку роботу плазмогенератора також часто забезпечують шляхом вихрового закручування плазмового факела поблизу холодного або точкового катода, затопленого у мідь. При цьому діаметр каналу, для виведення плазмового факелу з плазмогенератора назовні, повинен бути в п'ять-шість разів більшим за діаметр анода. За таких умов плазмові частинки матимуть середні значення швидкостей приблизно 200 м/с. Це надзвичайно важливий параметр який має конструктивне значення. За його значенням визначається довжина ефективної реагентної зони плазмопіролізного реактора.

Існують також електродугові печі для переробки відходів у яких спочатку використовують непряму дугу, а вже після утворення електропровідного середовища переключаються в режим прямої дуги для отримання інтенсивніших потоків теплової енергії.

Плазмогенератори з прямою та з непрямою електродугою застосовуються з термоємними або з "холодними" (водо охолоджуваними) катодами. Застосування спеціальних електродних сплавів для їх виготовлення збільшує їх робочий ресурс при роботі на відкритому повітрі більше як до 1000 годин.

Сучасні плазмо генератори, придатні для утилізації відходів, в основному працюють на постійному струмі для реалізації кращого контролю поведінки електричної дуги як в потоці, так і в точці анодної прив'язки. Ці плазмогенератори також знижують/скорочують процес корекції коефіцієнта потужності і встановлення фільтрів для захисту від завад від зовнішніх електромереж. Інколи з метою досягти великої напруги горіння електродуги для підвищення ККД плазмогенератора застосовують вуглекислий газ або азот.

Для гарантованого інтенсивного перемішування плазми та відходів в реагентному просторі реактора потрібні високі входні швидкості та малі діаметри сопла в реакторній камері змішування. Тоді такі плазмогенератори становляться придатними для переробки та утилізації газів та рідин.

Отже, дуже високі температури в плазмовому струмені роблять можливим застосування плазмогенераторів для переробки медичних та інших відходів з невідомим чи змінним складом. Надзвичайно короткий час протікання плазмохімічних реакцій в плазмохімічному реагентному просторі реактора створює певні проблеми з очищенням продуктів плазмового спалювання, утворюваних в швидкісному прямому чи турбулентному потоці заново утвореної газоаерозольної димової суміші, що підлягає її екологічному очищенню за допомогою складних і дорогих систем.

Іще одним методом забезпечення інтенсивного змішування є створення турбулентних плазмових струменів. При цьому відходи для переробки інжектуються в плазмохімічний реактор а не безпосередньо в зону навколо плазмового факелу.

Ідеальний плазмо утворюючий газ для спалювання медичних відходів та інших матеріалів не повинен створювати додаткові забруднення; не вимагати додаткової сепарації продуктів реакції та спеціальних запобіжних екологічних заходів; мати високу теплоємність; повинен підвищувати ефективність всього технологічного процесу спалювання; не збільшувати швидкість зношування електродів; не утворювати похідних токсичних сполук; збільшувати ефективність роботи реактора; бути доступним і дешевим.

В практичній площині жоден із існуючих плазмо утворюючих газів не відповідає повноті цих вимог. Наприклад, високий вміст азоту, який безпосередньо не бере участі в плазмохімічній деструкції, вже є технологічним та екологічним недоліком. Чистий кисень суттєво збільшує коефіцієнт деструкції, а сам кисень прискорює деградацію матеріалів обладнання. Утворюваний атомарний водень теж дуже сприяє деструкції галогенвуглецевих зв'язків та пришвидшує руйнування вуглеводнів.

Енергоефективність переробки відходів значно прискорюється при застосуванні водяної плазми. При цьому водяна пара грає велику роль у теплопереносі. Молекулярний водень має велику енергію зв'язку і тому його рекомбінація призводить до виділення великої кількості теплоти з утворенням хімічно високоактивного атомарного водню.

Деградації електродів у плазмогенераторі можна запобігти якщо застосовувати радіочастотний індукційний плазмохімічний реактор у якому складний плазмовий факел створюється струмом високої частоти в діапазоні 2-27 МГц, що протікає в котушці навколо робочої камери. Для такого плазмогенератора потрібен спеціальний спосіб введення відходів у де-струкційну камеру (згорання).

Радіочастотні плазмо генератори відомі як ВЧ-генератори плазми можуть ефективно руйнувати також небезпечні медичні рідини при їх впорскуванні в розрядний/реагентний простір. Рівень потужності ВЧ-плазмогенераторів може змінюватись в інтервалі 0.5 кВт - 1 МВт, а робоча частота в діапазоні від 9.6 кГц для потужностей менше 200 кВт - до 40 МГц. Найчастіше промислові джерела живлення з потужністю до 150 кВт мають робочу частоту 2.6 МГц.

В порівнянні з плазмотронами постійного струму тепловий ККД ВЧ-плазмогенераторів може мати значення 40-60%. При цьому основні втрати відбуваються на джерелі живлення. Також ще є втрати на індукцію між плазмою та індукційною котушкою, які є функцією відношення між радіусом плазми та радіусом індукційної котушки. Також є втрати при передачі енергії стінкам обмежувальної трубки. При одній і тій же величині втрат внутрішній діаметр ВЧ-плазмогенератора приблизно на порядок більший за діаметр газового тракту плазмогенератора постійного струму.

У ВЧ-плазмогенераторі значення робочих температур знаходяться в діапазоні 6000-10000 °К. У плазмогенераторах постійного струму – в діапазоні 7000-14000 °К. Швидкості плазми у ВЧ-плазмогенераторах не перевищують 100 м/с, що значно менше ніж у плазмогенераторах постійного струму.

Внаслідок скін-ефекту нагрівання головним чином здійснюється в поверхневому шарі плазми. При цьому електропровідність плазми пропорційна концентрації електронів і для більшості газів, окрім чистого гелію, провідність має суттєво зростає в температурному діапазоні 6000-7000 °С при нормальних значеннях атмосферного тиску.

Сьогодні на світовому ринку практично усі плазмо-дугові установки мають плазмогенератори постійного струму. Зокрема, в Україні в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона також виготовлявся універсальний плазмогенератор ПУН-1, і саме його було вибрано для наших установок «Плазмон-1,2,3». В даному плазмо генераторі можна збільшити робочий ресурс електродів якщо за допомогою магнітного поля обернути анодний кінець електричної дуги.

Особливості процесів плазмохімічного піролізу.

В результаті плазмохімічного піролізу в реакторі в процесі згорання відходів утворюються молекули CO, H₂ та вуглеводні. Згорання утворених синтезованих горючих газів у реагентній зоні реактора дозволяє підтримувати стабільну температуру вище 1100 °С. А для того, щоб блокувати виникнення плазмохімічних реакцій рекомбінації газоподібних молекул, які призводять до утворення діоксинів і фуранів, гарячі плазмопіролізні гази охолоджують приблизно до 500°-70 °С. І тоді, як показують результати газового аналізу, кількість токсичних газів в димових залишках, перебуває в межах норм дозволених для атмосферних викидів.

У якості плазмоутворюючого газу можна використовувати молекулярний азот N₂. У первинній камері температура згорання МВ досить швидко може досягти значення 900°С. А піролізні гази спалюються у вторинній камері допалювання в умовах додаткового продування через неї повітря. В результаті піролізні гази згоряють, утворюючи довгий вогневий факел.

Після плазмохімічної високотемпературної плазмової обробки в високотемпературній первинній камері лікарняних відходів-імітаторів (суміш бавовни та пластику в пропорції

2:1) відбувається розкладання полімерів та виділення низькомолекулярних газів. Гарячі гази, що виходять з вторинної камери, пропускаються через гасник-скрублер з лужним водяним розчином ($pH = 12$) для зниження їх температури до 80°C і менше.

В результаті плазмохімічного піролізу хлорованих відходів утворюються молекули хлоридної кислоти (HCl) які присутні в газоподібній суміші. Для очищення суміші від них здійснюють гасіння лужним розчином, який блокує рекомбінаційні молекулярні процеси і значно знижує кількість заново утворених токсичних хімічних сполук. Залишкові газоерозольні димові гази видуваються вентилятором в атмосферу через димову трубу.

Високотемпературне плазмове середовище також повністю знищує всі види бактерій про що свідчать результати бактеріальних аналізів на присутність в димових залишках мікроорганізмів *Bacillus stearothermophilus* і *Bacillus subtilis* спеціально вирощених в лабораторії на полосках з нержавіючої сталі і які потім пропускалися через високотемпературне плазмове середовище в первинній камері.

Проблема практичного комерційного використання утвореного в плазмохімічному реакторі горючого синтез-газу, наприклад, для виробництва теплової та електричної енергії, полягає в тому, що цей газ повинен пройти через складну систему його очищення від корозійно-активних та токсичних речовин. Простіше і ефективніше використовувати цей синтез-газ в неочищеному вигляді для власних потреб плазмопіролізної установки з метою стабілізації високої температури та одночасного допалювання вже утворених небезпечних речовин.

Правила, методи та вимоги щодо безпечної утилізації медичних відходів регулюються як державними, так і міжнародними нормами [11-15].

Польова утилізація воєнних медичних відходів, утворених в результаті ведення війн, також потребує нових методів, підходів і технологій, тому що значна їх частина «закопується в землю» та спалюється.

В Афганістані, Іраку військові медичні та військові побутові відходи обливали токсичним авіаційним паливом і спалювали. В результаті утворювані канцерогенні продукти згоряння відходів призвели до масових захворювань військовослужбовців, включаючи й інфекційні захворювання. Тому у 2012 році Конгрес США вимушено прийняв законопроект про створення реєстру військових, які постраждали внаслідок такого спалювання медичних відходів. У 2014 році в реєстрі значилось більше як 90000 хворих. Цей досвід наглядно свідчить про масштабну небезпеку відкритого спалювання військових медичних та інших небезпечних відходів у разі недотримання температурних умов при відсутності відповідної системи нейтралізації та очищення димових та зольних продуктів згоряння.

На сьогодні у країнах НАТО вже існують санітарні вимоги для поводження з медичними відходами військових медичних підрозділів/закладів [16]. В російській окупаційній армії теж впроваджено багатофункціональний серійний мобільний інсинератор УУМО-01 з жорсткими екологічними характеристиками, що відповідають вимогам євростандартів для знезараження та для вимог екологічної безпеки [17].

Вихідними умовами та даними для розробки, конструювання та створення мобільних польових плазмопіролізних установок для знищення медичних військових відходів в їх основу зокрема доцільно покласти вимоги STANAG 2982. Згідно з положеннями цих вимог, за умови розгортання нестационарних медичних підрозділів слід дотримуватися спеціальних конкретних санітарних вимог при поводженні з твердими медичними відходами:

1) дотримуватися загальних правил безпеки праці при наданні медичної допомоги пораненим/хворим, та при поводженні з відходами, при цьому накопичуються рукавички, маски, фартухи, та інші, що перешкоджають передачі трансмісивних захворювань від пацієнтів - найчастіше такі предмети класифікують як загальні не медичні відходи.

2) сортувати/відокремлювати медичні відходи сортуються від загальних відходів на місці розташування медичного підрозділу/закладу та не змішувати медичні відходи з іншими загальними відходами;

3) зберігати медичні відходи в спеціальних червоних сумках/контейнерах стійких до проколів та витоків рідин або у відповідно маркованих сумках для відходів забруднених/просяклих кров'ю, або із слідами запеченої крові. Якщо використовуються сумки/контейнери не червоного кольору, то інший колір повинен бути чітко зазначений на них, і на сумках (контейнерах) повинно бути зазначено «Небезпечні медичні відходи»;

4) гострі предмети - шприци, голки, скальпелі, вироби із скла слід збирати в спеціальні міцні, стійкі до проколів та протікання рідин, пластмасові/металеві контейнери/відра з кришкою. При цьому забороняється: випорожнювати контейнери меншого розміру в контейнер більшого розміру, ламати голки - їх необхідно поміщати прямо в контейнери для гострих предметів. При від'єднанні голки від шприца дотримуватися правил техніки безпеки;

5) зібрані медичні відходи спалюються чи стерилізуються з їх подальшим захороненням або утилізуються іншими альтернативними технологіями. Попіл спалених МВ засипають у відкритий циліндричний 200 літровий контейнер який після заповнення евакуюють на санітарне звалище, обладнане відповідно до національних стандартів. Якщо в попелі немає гострих медичних голок, лез скальпелів і т.п., то попіл може вважатися загальним сміттям і його захоронення можливе у спеціально визначеному місці в оперативній зоні.

У разі неможливості спалювання медичних відходів рекомендується їх стерилізація в автоклавах та парових стерилізаторах після чого МВ теж розцінюються як загальне сміття, що видаляється згідно з встановленим порядком та з дотриманням техніки безпеки при поводженні з гострими предметами. Забороняється використовувати польові хірургічні або стоматологічні стерилізатори для автоклавування медичних відходів. За відсутності способів видалення медичних відходів на місці (в оперативній зоні), вони евакуюються за межі оперативної зони. Найменш бажаним варіантом видалення медичних відходів є їх захоронення на місцевому санітарному звалищі після погодження з місцевими представниками охорони здоров'я.

У польових воєнних умовах найбільш актуальною, чисельною і небезпечною групою відходів є відходи групи В. Виходячи з відповідних вимог даного наказу зрозуміло, що при таких умовах можливе лише збирання, сортування та маркування відходів у відповідні ємності та їх подальша евакуація за межі оперативної зони згідно з рекомендаціями [18].

5. Висновки.

1. Електродуговий процес плазмохімічного піролізу відповідає всім технічним вимогам що стосуються обробки небезпечних медичних відходів і його легко підтримувати в реакторному реагентному безкисневому середовищі. Також можна змінювати плазмоутворюючий газ, що подається в плазмогенератор і, тим самим, змінювати хімічні особливості процесів, що протікають в реагентному середовищі плазмохімічного реактора.

2. Технологія плазмохімічного піролізу усуває практично всі недоліки інших існуючих технологій утилізації відходів і являє собою комплексне рішення для безпечної утилізації медичних відходів з конверсією органічної маси в газ понад 99% і не потребує сегрегації хлорованих вуглеводнів. Після згоряння відходів токсичні гази на виході з установки присутні в незначній кількості та відповідають нормативним екологічним вимогам. При цьому висока температура та УФ-випромінювання плазмового струменю, повністю знищують бактерії/мікроорганізми.

3. В процесі плазмохімічного піролізу лікарняних відходів-імітаторів було визначено, що без попереднього підігріву первинної камери в ній відбувається забарвлення білого кольору залишкової димової газоаерозольної суміші на виході з димової труби. Утворення білого диму або іншого не чорного кольору відбувається в результаті зменшення температури в реакторі. Білий дим може утворюватися в результаті випаровування вуглеводнів, які конденсуються в рідкий аерозоль і який, у разі наявності домішок у вигляді твердих часточок [19]. Після попереднього прогрівання відходів утворюється сіро-чорний дим, що означає наявність протікання реакцій плазмопіролізу з утворенням стабільних темних частинок. В реакторі також утворюється частинки сажі з розмірами кластерів від 300 до 600 нм, зразки якої досліджувалися на електронному мікроскопі.

4. Отримуваний в результаті плазмопіролізу синтез-газ можна спалювати для власних потреб в реагентній зоні установки, що дає можливість економії електроенергії від зовнішніх джерел.

5. Результати порівняльного аналізу, існуючих на сьогодні технології утилізації комунальних, медичних та інших муніципальних і промислових відходів демонструють переваги плазмохімічного піролізу і роблять його поза конкурентним при утилізації небезпечних токсичних відходів, і, на відміну від димових аналогів, їх викиди в довкілля токсичних діоксинів і фуранів значно нижчі за прийняті стандарти, і не вимагає розділення небезпечних відходів. При цьому патогенні мікроорганізми знищуються повністю.

6. Доцільним і вигідним повинна бути розробка та створення автономних мобільних модульних плазмопіролізних установок потужністю 50-100 кВт на базі вітчизняних плазмогенераторів ПУН-1 з оптимальною витратою плазмоутворюючих газів, перш за все повітря, в кількості 2-15 м³/годину, при мінімальних витратах технічної води для охолодження плазмогенератора від 150 до 200 г/с при КККД до 70 %, та при оптимальній температурі плазмового струменю на виході із сопла плазмотрона від 4300 до 5000 °К, що підтверджується експериментальними вимірюваннями.

7. Для очищення залишкових димових газів може застосовуватися комбінація вихрового скрубера та спеціальних фільтрів з додатковими системами в разі необхідності. А для досягнення повного спалювання медичних відходів та їх модельних сумішей необхідно передбачити можливість додаткової подачі повітря до 1300 м³/годину з тиском приблизно в 0,1 МПа.

Список використаних джерел.

1. Наказ МОЗ України № 325 від 08.06.2015 «Про затвердження Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами»
2. Базельська конвенція, Директиви ЄС, наказ МОЗ України від 08.06.2015 № 325
3. Наказ №1602 від 06.09.2022 "Про затвердження Змін до Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами"
4. Krajcsovics, F., Pocsy, F., Emho, L. And Puskas, Zs. In Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment (ed. Abbou, R.), Elsevier, Amsterdam, 1988, pp. 1609–1614.
5. Cretenot, D., Vanrenterghem, J., Labrot, M. and Pineau, D., EPRI Symposium on Industrial and Environmental Applications of Plasma, Palo Alto, California, 7–9 March 1990.
6. S.K. Nema, K.S. Ganeshprasand. Plasma pyrolysis of medical waste. – Current Science, vol. 83, No. 3, 10 August 2002, p. 271-278
7. Патент на корисну модель № 154899 Установка для плазмової деструкції відходів, - Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі", - Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 27.12.2023.
8. Жовтянський В.А. Петров С.В. Орлик В.М. Якимович М.В. Вакілов І.М. Назаренко В.Г. Вабіщевич М.С. Волошинюк І.М. Якубишин Ю.А., та ін. Переробка небезпечних і радіоактивних відходів із використанням плазмових технологій, - Екологічні науки, - 2018, - №2(21), - с. 49-58.
9. Керівні принципи для найкращих існуючих методів і попередні вказівки для найкращих видів природоохоронної діяльності застосовано до статті 5 та додатку до Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі UNEPS/POPS/COP.1/INF/7.205. 371 р.
10. Семерак М.М., Лис С.С., Коваленко Т.П. Аналіз процесу плазмової переробки радіоактивних відходів, - Ядерна та радіаційна безпека, - 1(81), 2019Ю – с. 23-29.
11. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР // Відомості Верховної Ради України від 25.09.1998. – 1998. – № 36. – С. 242].
12. Закон України «Про приєднання України до Базельської конвенції про контроль за транскордонними перевезеннями небезпечних відходів та їх видаленням» - <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=803-14>.
13. Директива ЄС 2000/76/WE від 04.12.2000 «Про спалювання»].
14. Наказ МОЗ України від 08.06.2015 № 325 «Про затвердження Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами»
15. Офіційний вісник України від 08.09.2015 – 2015 р. – № 69. – С. 297, ст. 2298, код акту 78316/2015.

16. STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements» - Дотримання санітарно-гігієнічних вимог у польових умовах.
17. О.В. Горішна, Ю.М. Депутат, О.М. Іванько, А.А. Кожокару, В.А. Баркевич, В.В. Нарожнов. Проблема утилізації відходів медичних відходів у польових умовах, - Інфекційні хвороби, - 2018, - 91, - с. 40 – 45.
18. STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements» – Дотримання санітарно-гігієнічних вимог у польових умовах) [STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements».
19. Brunner, C. R., Hazardous Air Emissions from Incineration, Chapman and Hall, New York, 1986, p. 45.

References.

1. Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 325 dated 08.06.2015 "On Approval of the State Sanitary and Anti-Epidemic Rules and Regulations on Medical Waste Management"
2. The Basel Convention, EU Directives, Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 325 of June 08, 2015
3. Order No. 1602 of 06.09.2022 "On Approval of Amendments to the State Sanitary and Anti-Epidemic Rules and Regulations on Medical Waste Management"
4. Krajcsovics, F., Pocsy, F., Emho, L. And Puskas, Zs. In Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment (ed. Abbou, R.), Elsevier, Amsterdam, 1988, pp. 1609-1614.
5. Cretenot, D., Vanrenterghem, J., Labrot, M. and Pineau, D., EPRI Symposium on Industrial and Environmental Applications of Plasma, Palo Alto, California, March 7-9, 1990.
6. S.K. Nema, K.S. Ganeshprasand. "Plasma pyrolysis of medical waste." - Current Science, vol. 83, No. 3, August 10, 2002, p. 271-278.
7. Utility model patent No. 154899 Installation for plasma destruction of waste, - Issued in accordance with the Law of Ukraine "On Protection of Rights to Inventions and Utility Models", - Registered in the State Register of Utility Models of Ukraine on 27.12.2023
8. 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.
9. Guidelines for Best Available Techniques and Preliminary Guidance for Best Environmental Practices applied to Article 5 and Annex to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants UNEPS/POPS/COP.1/INF/7.205. 371 p.
10. Semerak M.M., Lis S.S., Kovalenko T.P. Analysis of the process of plasma processing of radioactive waste, - Nuclear and Radiation Safety, - 1(81), 2019Y - pp. 23-29.
11. Law of Ukraine "On Waste" of 05.03.1998 No. 187/98-BP // Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine of 25.09.1998 - 1998. - No. 36. - P. 242].
12. The Law of Ukraine "On Accession of Ukraine to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal" -<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=803-14>
13. EU Directive 2000/76/WE of December 04, 2000 on incineration].
14. Order of the Ministry of Health of Ukraine of 08.06.2015 No. 325 "On Approval of the State Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations on Medical Waste Management"
15. Official Gazette of Ukraine of 08.09.2015 - 2015 - No. 69 - P. 297, Article 2298, Code of Act 78316/2015.
16. STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements" - Compliance with sanitary and hygienic requirements in the field.
17. Horishna O.V., Deputat Y.M., Ivanko O.M., Kozhokaru A.A., Barkevych V.A., Narozhnov V.V.. Problem of utilization of medical waste in the field, - Infectious diseases, - 2018, - 91, - pp. 40 – 45.
18. STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements" [STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements"].
19. Brunner, C. R., Hazardous Air Emissions from Incineration, Chapman and Hall, New York, 1986, p. 45.