

ПЕРЕРОБКА НЕБЕЗПЕЧНИХ І РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Жовтянський В.А.¹, Петров С.В.¹, Орлик В.М.¹,
Якимович М.В.¹, Вакилов І.М.¹, Назаренко В.Г.¹,
Вабищевич М.С.², Волошинюк І.М.³, Якубишин Ю.А.⁴

¹Інститут газу
Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, м. Київ
zhovt@ukr.net

²КП «Івано-Франківськводокотехпром»
вул. Ботанічна, 2, 76011, м. Івано-Франківськ
v.mykola@ukr.net

³ТОВ «ЕКО ІНДІГО»
вул. Максимовича, 15, 76009, м. Івано-Франківськ
vigor7748@gmail.com

⁴Консорціум «СИСТЕМА ЕКО ІННОВАЦІЙ»
вул. Максимовича, 15, 76009, м. Івано-Франківськ
sei777@ukr.net

Представлені напрацювання колективу розробників щодо енергоефективної та екологічно безпечної технології переробки донних мулів станцій аерації, які містять у своєму складі важкі метали, та радіоактивно забрудненої деревини. Її апаратна реалізація включає обладнання для попередньої підготовки донних мулів до кондицій гранульованої сировини та комплекс високотемпературної переробки для отримання висококалорійних продуктів газифікації та вітрифікованого зольного залишку, в якому залишаються інкорпорованими важкі метали, в тому числі радіоактивні. Після системи ретельного очищення охолоджені продукти газифікації можуть бути використані для виробництва електричної та/або теплової енергії чи як цінна хімічна сировина. У випадку переробки радіоактивно забрудненої деревини окремої іммобілізації вимагають залишки фільтрату системи очищення. *Ключові слова:* небезпечні відходи, радіоактивні відходи, газифікація, плазмові технології, синтез-газ, відходи в енергію, важкі метали, вітрифікація.

Жовтянский В.А., Петров С.В., Орлик В.М., Якимович М.В., Вакилов И.М., Назаренко В.Г., Вабищевич Н.С., Волошинюк И.М., Якубишин Ю.А. Представлены наработки коллектива разработчиков по энергоэффективной и экологически безопасной технологии переработки донных илов станций аэрации, которые содержат в своем составе тяжелые металлы, и радиоактивно загрязненной древесины. Ее аппаратная реализация включает оборудование для предварительной подготовки донных илов до кондиции гранулированного сырья и комплекс высокотемпературной переработки для получения высококалорийных продуктов газификации и витрификованого зольного остатка, в котором остаются инкорпорированными тяжелые металлы, в том числе радиоактивные). После системы тщательной очистки охлажденные продукты газификации могут быть использованы для производства электрической и / или тепловой энергии или как ценное химическое сырье. В случае переработки радиоактивно загрязненной древесины отдельной иммобилизации требуют излишки фильтрата системы очистки. *Ключевые слова:* опасные отходы, радиоактивные отходы, газификация, плазменные технологии, синтез-газ, отходы в энергию, тяжелые металлы, витрификация.

Processing of hazardous and radioactive waste with the use of plasma technologies. Zhovtianskyi V., Petrov S., Orlyk V., Yakymovych M., Vakilov I., Nazarenko V., Vabishchevych M., Voloshyniuk I., Yakubyshyn Yu. The work of the team of developers concerning energy-efficient and environmentally sound technology of processing of bottom mules of aeration stations containing heavy metals and radioactive contaminated wood is presented. Its hardware implementation includes equipment for preliminary preparation of bottom sediments for the conditions of granulated raw materials and a complex of high-temperature processing for the production of high-calorific products of gasification and the vitrification ash residue, in which heavy metals remain, including radioactive ones). After a thorough cleaning system, the cooled gasification products can be used for the production of electric and / or thermal energy or as a valuable chemical raw material. In the case of the reprocessing of radioactive contaminated wood, a separate immobilization requires a filtrate of the purification system. *Key words:* hazardous waste, radioactive waste, gasification, plasma technologies, synthesis gas, waste energy, heavy metals, vitrification.

Постановка проблеми. У 2007 р. Кабінет Міністрів України виділив кошти Національній академії наук України на реалізацію технологій переробки небезпечних відходів [1; 2]. Фізично така висо-

котехнологічна розробка була успішно виконана того ж року. Проте її доопрацювання вимагало ще багато років в умовах перманентного недофінансування інститутів НАН України [3–5]. Звісно, така складна і

ризикова розробка не могла фінансуватись бізнесом, як це відбувається і в країнах Заходу. На нинішньому етапі одна з основних задач авторів – наблизити розробку за показниками ефективності до рівня, максимально прийнятної для комерціалізації.

Виклад основного матеріалу. Небезпечні відходи та загальні вимоги до їх переробки. У початковому варіанті передбачалась переробка «класичних» небезпечних відходів, у першу чергу – хлорвмісних. Ще 20 років тому відповідною Директивою ЄС було чітко формалізовано як саме означення такого класу відходів, так і вимоги до технологій їхньої безпечної переробки [6]. До них відносяться будь-які відходи, які мають у своєму складі понад 1% мас. галогеновмісних органічних речовини в перерахунку на хлориди. В Україні це, в першу чергу, заборонені до застосування хімічні засоби захисту рослин, відходи гексахлорбензолу в зоні консервації Домбровського кар'єру (м. Калуш, Івано-Франківська область), медичні відходи (зважаючи на значний вміст у них поліхлорвінілових виробів), так звані поліхлоровані дифеніли (входять до складу синтетичних діелектричних рідин для трансформаторів та конденсаторів) і навіть звичайні несортовані тверді побутові відходи. Останнє зумовлене значною популярністю поліхлорвінілових виробів у будівельній сфері, а відтак ніхто не застрахований від згубного впливу діоксинів і фуранів, які активно утворюються в разі їхнього спалювання за умови звичайних температурах горіння. Згадані токсиканти відносяться до найбільш небезпечних; їх максимально допустимий викид в атмосферу в очищених продуктах не повинен перевищувати 10^{-10} г/м³ [6].

Ще один клас особливо небезпечних відходів – радіоактивні. Крім специфічних проблем власне ядерної промисловості [7], в Україні до них можуть бути віднесені, наприклад, залишки так званого Рудого лісу з Чорнобильської зони відчуження [8], який нещодавно нагадав про себе навіть у Києві великою пожежею.

Основна ідея переробки таких відходів полягає в тому, щоб мінімізувати об'єм власне радіоактивної компоненти та іммобілізувати її в розплаві золи в процесі газифікації, а вуглецевмісну складову відходів максимально використати для енергетичних потреб [7].

Під час переробки небезпечних хлорвмісних відходів відповідно до Директиви [6] температура повинна підтримуватися на рівні 1100°C, причому кожен локальний об'єм газу, що одержується під час їх переробки, повинен перебувати при цій температурі ≥ 2 с. У цих умовах згадані токсиканти повністю розкладаються, а хлор присутній у сполуці HCl; вона легко утворює солі в подальших процесах очищення. У подальшому здійснюється швидке заохолодження продуктів газифікації, щоб уникнути повторного утворення токсикантів в їхньому складі. Особливо небезпечною із цієї точки зору є область температур 200-650 °C із піковими показниками при температурі близько 300 °C [10]. Процес охолодження завершується пропусканням цих продуктів через вапняне молоко або розчин соди, в яких хлор зв'язується в стійкі хімічні сполуки.

Установка для переробки хлорвмісних медичних відходів була створена у варіанті газифікатора з використанням паро-плазмового дуття [2]. Її техно-

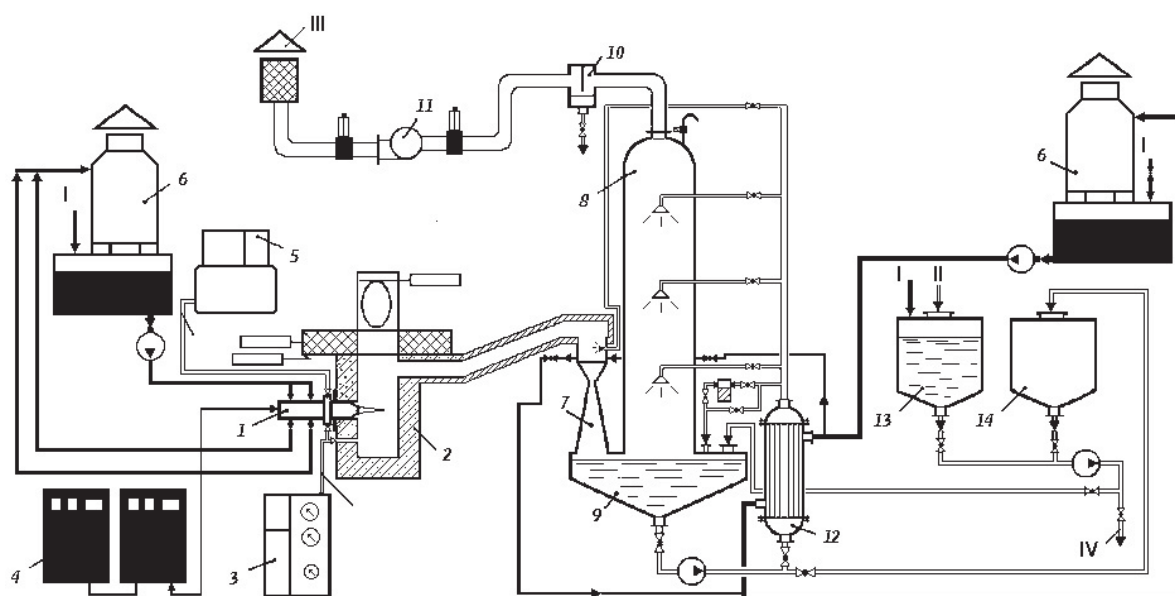


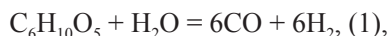
Рис. 1. Технологічна схема паро-плазмової установки: 1 – плазмотрон; 2 – модуль реактора паро-плазмовий; 3 – парогенератор; 4 – послідовно з'єднані джерела живлення «Плазма-2»; 5 – компресор; 6 – градирня; 7 – скруббер Вентурі; 8 – система загартування газів; 9 – підскруберна ємність; 10 – фільтр-краплевлочувач; 11 – вентилятор (димотяг); 12 – теплообмінник; 13 – бак содового розчину; 14 – бак зі шламом; I – подача води, II – сода, III – синтез-газ, IV – на утилізацію

логічна схема показана на рис. 1, а загальний вигляд паро-плазмового факела потужністю до 160 кВт, що вводиться в реактор, – на рис 2 (тут – у режимі випробувань поза реактором).



Рис. 2. Пароводяний плазмотрон потужністю 160 кВт у режимі налаштування

Значну частину установки, крім власне високотемпературного реактора, складають допоміжні системи – особливо важливою серед них є система очищення відхідних продуктивних газів. Вони утворюються згідно з реакцією

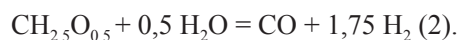


яка записана у варіанті газифікації целюлози – типового компонента медичних відходів або радіоактивно забрудненої деревини. Суміш цих компонентів – H_2 і CO – відома як синтез-газ. Він є цінним хімічним продуктом, у роки 2-ї світової війни масово використовувався для виробництва синтетичних моторних палив у Німеччині, а в пропонувані технології зазвичай спалюється в газодизельних електростанціях або використовується в парових турбінах. Електроенергія отримується для власних енергетичних потреб, а за умов достатньої ефективності процесу переробки – для постачання також зовнішнім споживачам, що сприяє комерціалізації технологій.

Установка з огляду на її специфіку (небезпечні відходи, горючі та отруйні гази) вимагає чіткої координації функціонування всіх її вузлів, що забезпечується системою автоматизації та комп'ютеризації (не показана на рисунку).

Особливості екологічно безпечної переробки донних мулів. Українська історія переробки власне донних мулів як небезпечних відходів розпочалась із семінару, проведеного в Київському національному університеті будівництва та архітектури на базі Інституту післядипломної освіти п'ять років тому, куди був запрошений один із авторів цих рядків. Спроможність плазмового струменя піддати деструкції донні мули із самого початку не викликала сумнівів. Адже температура ядра плазмового стру-

меня на виході плазмотрона складає тисячі градусів, і з точки зору енергетичної це не проблема. Вже перші експерименти дозволили встановити так звану брутто-формулу донних мулів та характер реакції їхньої газифікації [5] (найпростіший варіант):



Інша справа – економічна частина цієї проблеми. Дійсно, донні мули, якщо розглядати їх як некондиційне паливо, характеризуються високою зольністю (зазвичай на рівні 55%), що саме по собі не може не насторожувати з точки зору очікуваної ефективності процесу. Проте ця складова проблеми багатократно помножується значним вмістом важких металів (які є небезпечними токсикантами) в їхньому складі. Це особливо стосується «старих» відходів на Бортницькій станції аерації м. Києва [11]. Нині їх накопичено близько 9 млн. т; фактично це приклад відкладеної цивілізаційної проблеми. Адже в 70-80-х рр. у міську каналізацію скидалися без належного очищення відходи радіотехнічних та гальванічних виробництв. Тепер ця маса по суті «нависає» над Дніпром, створюючи екологічну загрозу отруєння основної водної артерії країни.

Саме з причин високого вмісту важких металів була відкинута також, як в Україні, так і в усьому світі, початкова ідея використовувати донні мули як сільськогосподарське добриво. В останні десятиліття загальноновизнаним стало технологічне рішення, яке передбачає так звану вітрифікацію зольного залишку після термічної переробки донних мулів [12]. Вона включає рідке шлаковидалення в процесі термічної переробки тих, чи інших відходів. Важкі метали залишаються інкорпорованими в лавоподібній масі цього розплаву після його охолодження, а відтак втрачають властивість вилугувуватися в доквілля. Цей матеріал може застосовуватися, наприклад, для відсіпки доріг, оскільки перестає бути екологічно небезпечним. Для процесу вітрифікації потрібен рівень температур понад 1400 °С.

Загалом кажучи, в західній науковій літературі є цілі пласти публікацій щодо переробки донних мулів, починаючи з 70-х рр. минулого століття, коли почалася наукова розробка цієї проблеми. Загальний підхід до їхньої та інших відходів переробки на Заході полягає в реалізації принципу «Waste-to-Energy» («Відходи – в енергію»). Оскільки згаданий вище оптимальний рівень температури для переробки відходів ($\geq 1100^\circ C$) є також оптимальним для проведення процесів газифікації твердих палив [13], то логіка розвитку технологій переробки небезпечних відходів полягає в тому, щоб, з одного боку, здійснювати її в режимах, наближених до газифікації, а з іншого – організувати цей процес таким чином, щоб небезпечні складники відходів перевести в стан, в якому вони є нейтральними по відношенню до навколишнього середовища. Якщо

дотримуватись також вже згаданого принципу «відходи – в енергію», отримуючи, наприклад, надлишкову понад власні потреби електричну енергію, то процес може стати комерційно привабливим.

Нині ситуація в Україні щодо переробки відходів характеризується глибокою кризою, що, власне, не вимагає особливих обґрунтувань. Проте навіть у цих умовах авторам невідомі приклади успішного використання для цієї мети в нашій державі західних технологій, хоча вони розроблені відповідно до вже згаданого принципу «Відходи – в енергію» і є доволі ефективними у своїх країнах. Ключова проблема полягає в тому, що висока початкова вартість обладнання (600 – 750 USD на тону річної переробки відходів [14]) вимагатиме того ж рівня оплати за переробку цього ресурсу в Україні, що й у західних країнах. Це нині є не підйомним для середньостатистичної української сім'ї.

Як обґрунтування цього твердження авторами виконаний аналіз показників потенційного використання в українських умовах кількох характерних західних технологій:

1) одна з найпростіших – розробка під умовною назвою «Енергія – 2» [15], яка є наступним поколінням сміттєспалювального заводу «Енергія», що донині все ще функціонує в Києві. Циркулює інформація, що в Києві передбачається подальше впровадження саме цієї технології;

2) середнього класу – плазмова технологія переробки відходів відносно невисокої потужності [16];

3) плазмова технологія переробки відходів високої потужності [17];

4) плазмова технологія переробки відходів невисокої потужності розробки Інституту газу НАН України.

Результати цього порівняння зведені в таблиці 1. У ній послідовно для кожної з технологій зверху-вниз визначається, скільки років потрібно для того, щоб за рахунок виробництва електричної енергії для зовнішніх споживачів (з урахуванням українського тарифу на постачання енергії в електричній мережі 1 грн./кВт·год.) потрібно для того, щоб компенсувати початкові інвестиції на будівництво відповідного заводу з переробки відходів. Як впливає з даних останнього рядка, ця величина складає від 62 до 20 років для технологій 1) – 3) навіть без урахування операційних витрат на функціонування заводу. Термін цієї окупності є надто великим, щоб можна було вести мову про їхню ефективність в українських умовах.

Вихід полягає у створенні такого вітчизняного обладнання, яке було б дешевшим, ніж західне, а його енергетична ефективність, навпаки, – більша. Це дозволить компенсувати основну його вартість у процесі експлуатації виробництвом додаткової енергії за рахунок вуглецевмісної компоненти відходів для зовнішніх споживачів (або для інших виробничих потреб).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика технологій переробки відходів

Показник	Технологія			
	«Енергія-2» (Брно, Чехія)	Integrated Multifuel Gasification technology (IMG) компанії Bellwether Ltd	Westinghouse Plasma Corporation – AlterNRG Corp.	Інститут газу НАН України
Річний обсяг переробки відходів, тис. т	224	100	534	4
Вироблення та передача електричної енергії споживачам	63 тис. МВт·год/рік	68 тис. МВт·год/рік	427000 МВт·год/рік	4200 МВт·год/рік
Інвестиції	130 млн. €	65 млн. €	307,5 млн. дол. США	1,2 млн. дол. США
Приведені інвестиції, USD на 1 т річної переробки	580	650	575	300
Передача електричної енергії споживачам, кВт на 1 т річної переробки відходів	240	680	800	1050
Окупність (у відсутність операційних витрат), років	61,9	28,7	20	8

Щодо цінового фактора особливих сумнівів не виникає, оскільки в Україні заробітна плата навіть висококваліфікованих науковців (як розробників технології) є на порядок меншою порівняно із середньою заробітною платою в Німеччині.

Для оптимізації енергетичної ефективності був проведений цикл спеціальних термодинамічних досліджень [9], з якого випливає, що найбільш енергетично вигідним є такий режим газифікації відходів, в якому основним джерелом енергії для проведення цього процесу служить вуглеводнева компонента самих відходів у нестехіометричному режимі (їх детальний виклад виходить за межі цієї публікації).

Колектив науковців-розробників цієї технології виграв у 2016–2017 рр. конкурсний науково-технічний проект за державним замовленням «Розроблення паро-плазмової технології переробки донних мулів станцій аерації», який фінансувався Міністерством освіти та науки України. Основним його завданням була розробка проектно-конструкторської документації на низку вузлів обладнання для паро-плазмової переробки небезпечних відходів, у першу чергу – високотемпературної теплоізоляції реактора та вузла видалення шлаків, отримуваних у процесі переробки.

Технологічна лінія для переробки донних мулів створена на базі установки для переробки медичних відходів і, як і в попередньому варіанті, включає у свій склад два основних блоки апаратури: високотемпературний реактор для газифікації донних мулів на основі плазмо-паро-кисневої технології та систему очищення продуктивних газів. Остання з них вимагала лише незначного вдосконалення.

На відміну від цього, конструкція високотемпературного реактора для газифікації вуглецевмісної сировини зазнала істотних змін. У першу чергу це стосується температурного режиму: для забезпечення режиму вітрифікації зольного залишку під

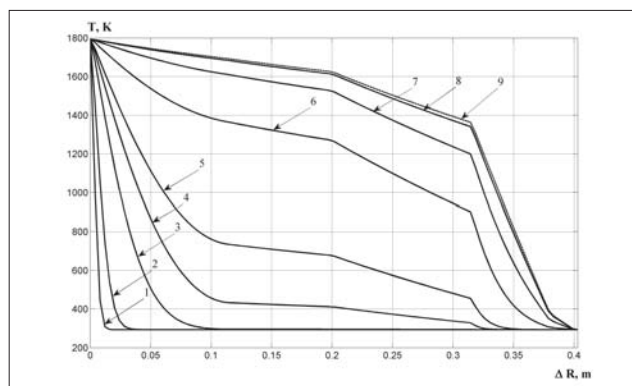
час переробки донних мулів температура в нижній частині реактора повинна сягати понад 1400°C (це забезпечує вітрифікацію зольного залишку під час переробки відходів, які містять важкі метали). Для одночасного забезпечення високої температури відхідних газів понад 1100°C, необхідної для уникнення утворення діоксинів та фуранів під час переробки хлорвмісних відходів, завантаження донних мулів у реактор здійснюється через його бокову стінку. З урахуванням недоліків попередньої розробки [4] істотних змін зазнала також конструкція футерівки, яка повинна забезпечувати надійну теплоізоляцію в широкому діапазоні температур та одночасно механічну стійкість.

Загальний вигляд установки для плазмо-парової переробки вуглецевмісних відходів із боку системи очищення відхідних газів – найбільш важливої для екологічно безпечної роботи установки – показаний на рис. 3.

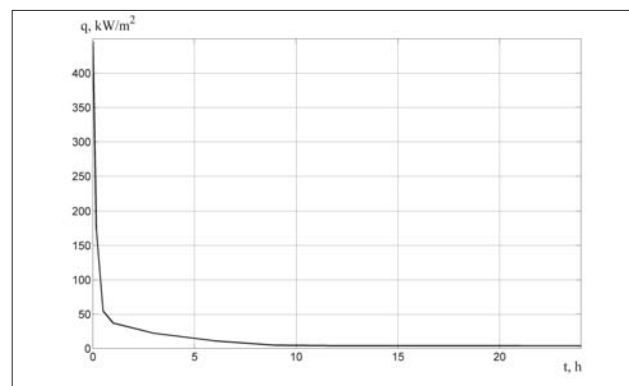


Рис. 3. Загальний вигляд установки для переробки донних мулів із боку системи очищення відхідних газів у процесі випробувань

У цілому ж футерівка прогрівається до стаціонарних значень її температурного просторового розподілу майже добу. Відповідно, значна частина теплової енергії, яка акумулюється в об'ємі реактора, витрачається на цю потребу. Особливо великі зна-



а



б

Рис. 4. Динаміка зміни температури в товщі футерівки реактора в послідовні проміжки часу від 10 с до 24 год після початку її нагрівання (а) та густина потоку енергії з об'єму реактора на внутрішню стінку реактора, що забезпечує нагрівання футерівки в процесі її відпалювання (б)

чення теплового потоку через внутрішню поверхню футерівки фіксуються протягом першої години процесу нагрівання (див. 4,б). У відсутність плазмотрона це означало б, що значна частина теплової енергії в процесі газифікації витрачалась би на нагрівання саме футерівки, а відтак необхідний рівень температури відхідних газів (понад 1100°C) досягався б дуже повільно. Відповідно, не можна було б гарантувати екологічну безпеку переробки відходів у цей початковий перехідний період із точки зору утворення діоксинів та фуранів.

Спеціальна підготовка донних мулів до переробки. Першими зразками відходів із Бортницької станції аерації для переробки були водомулова суміш у вигляді рідкої суспензії темного кольору з вологістю на рівні 95% та донний мул, який за консистенцією мав торфоподібний вигляд. За даними роботи [11], найбільш небезпечними їхніми компонентами є важкі метали. Із початку складування (1973 р.) мулів Бортницької станції аерації вміст цинку виріс у 2400 разів, хрому – 3500, марганцю – 4000, свинцю – 7000 разів. Ці дослідження підтверджують високу забрудненість ґрунтів важкими металами.

Разом із тим вони мають значний вміст вуглецю. Дійсно, суха речовина сирих осадів має такий склад (% маси сухої речовини осаду) [11]: 35,4-87,8 С; 4,5-8,7 Н; 0,2-2,7 S; 1,8-8,0 N; 7,6-35,4 O; суха речовина активного мулу містить, %: 44,0-75,8 С; 5,0-8,2 Н; 0,9-2,7 S; 3,3-9,8 N; 12,5-43,2 O. Зольність цих мулів складала 44%. Після сушіння в лабораторних умовах до рівня вологості 9,5 % мас. вони газифікувались за допомогою пароводяного плазмотрона невеликої потужності [5]. Результати газифікації будуть представлені нижче.

Нині спеціалістами в м. Івано-Франківську вирішена проблема спеціальної підготовки донних мулів до переробки. Вона включає зневоднення осаду мулу стічних вод, використовуючи інфрачервоні (ІЧ) сушильні лінії, та подальшу переробку зневоднених осадів у паливні брикети або гра-

нули. Основою технології зневоднення є здатність молекул води активно поглинати певний спектр ІЧ випромінювання. Воно переважно вибірково поглинається водою, що міститься в сировині. Це дозволяє створити технологію зневоднення з високим ККД [18; 19], яка реалізована в ІЧ-сушильній лінії ЛІСБ-Б «Індіго» (рис. 5). У ній передбачена можливість виробництва як брикетів, так і гранул, а також можливість роботи в мобільному варіанті. Передбачене її масштабування залежно від вимог продуктивності. Додатковому підвищенню ККД сприяє мінімізація теплових втрат на основі рекуперації відпрацьованого повітря.

Серед її переваг: відсутність викидів в атмосферу CO₂ та канцерогенних речовин від згоряння палива (димові гази); знищується патогенна мікрофлора (протеолітичні бактерії та плісняві гриби). Спеціальний дезінтегратор розбиває сировину на мікрочастинки з розмірами 0,04... 0,1 мм, що збільшує твердість брикетів, а відповідно, і їхню теплотворність.

Гранули, продуковані цією лінією, показані на рис. 6,а; їхній діаметр складає 7 мм. Зольність мулів станції водоочищення м. Івано-Франківська є ще вищою, ніж у випадку Бортницької станції аерації, досягаючи 57%. Їхня вологість після місячного зберігання в неопалюваному приміщенні складала 23%.

Результати плазмо-парової газифікації окремих зразків донних мулів наведені в таблиці 2. Із результатів експериментів випливає, що якість горючої компоненти синтез-газу задовольняє передбачуваним показникам згідно з реакцією (2); це є доброю передумовою для досягнення високої енергетичної ефективності процесу газифікації донних мулів.

Привертає увагу той факт, що у випадку донного мулу, отриманого зі станції водоочищення м. Івано-Франківськ, у складі продуктів газифікації присутня значна кількість азоту. Це пояснюється тимчасовим ручним режимом роботи завантаження сировини, в якому «захоплюється» відносно велика частина



Рис. 5. Сушильна лінія ЛІСБ-Б «Індіго»: вузол завантаження сировини (ліворуч) та загальний вигляд (праворуч)

Склад продуктів газифікації донних мулів

Походження сировини		Склад сухого газу, об. %				
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂
Бортницька станція аерації	Водомулова суміш	68,9	4,8	25,8	0,5	-
	Донний мул	71,8	3,1	24,7	0,4	-
Донний мул станції водоочищення м. Ів.-Франківська	Проба 1	34,7	19,4	11,6	4,9	29,2
	Проба 2	39,7	20	9,6	8,3	22,3

атмосферного повітря. Склад очищених продуктів газифікації донних мулів Бортницької станції аерації дещо переобтяжений високим вмістом CO₂ унаслідок технологічних особливостей самої лабораторної установки.

Рисунок 6,б наочно ілюструє ефект вітрифікації донних мулів у процесі газифікації.

Таким чином, результати досліджень свідчать, що в продуктах газифікації цих відходів визначальною компонентою є синтез-газ, істотно збагачений воднем.

Перспектива переробки радіоактивних відходів. Перспектива такої переробки оцінюється тут авторами у зв'язку з недавньою пожежею в Чорнобильській зоні, яка пов'язувалась із горінням радіоактивно забрудненої деревини походженням із Рудого лісу і викликала неабияке занепокоєння киян [8]. Після цього було роз'яснення, що цього лісу як такого вже немає, а спилена деревина захоронена

в ґрунті. Так чи інакше, такий варіант нейтралізації впливу Рудого лісу на довкілля пов'язаний із процесами гниття, а відтак – попадання радіоактивної компоненти в ґрунтові води з наступним забрудненням, знову ж таки, Дніпра.

Переробка радіоактивних відходів, як уже акцентувалось, спрямована на вирішення двох головних завдань: очищення основної маси відходів від радіонуклідів і концентрування останніх у мінімальному обсязі, зручному для подальшої локалізації. Шахтна технологія високотемпературної переробки радіоактивних відходів із використанням плазмових джерел нагрівання була створена для їхньої переробки на Нововоронезької АЕС у зв'язку з виведенням із експлуатації її енергоблоків після вироблення терміну служби [7]. Вона забезпечує газифікацію органічних компонентів. Неорганічна ж частина плавиться з подальшим видаленням із зони переробки у вигляді рідкого шлаку, що утворює під час застигання склоподібну масу. В останній інкорпуються шкідливі неорганічні компоненти; вона має здатність зберігати цілісність під час подальшого поховання в ґрунті на тривалий період часу, що досягає сотень



а



б

Рис. 6. Зразки гранул донних мулів станції водоочищення м. Івано-Франківська до переробки (а) та після їх газифікації та оплавлення (б)

і тисяч років. У результаті випробувань встановлено, що вміст суми діоксинів і фуранів у газах на виході системи газоочистки в п'ять разів нижчий від наведеного вище європейського нормативу для установок спалювання відходів [6; 10]. Концентрація важких металів у технологічних газових викидах в атмосферу також нижча, ніж визначено нормативами в країнах Західної Європи. Публікація [7] є найкращою відповіддю скептикам, які ставлять під сумнів, зокрема, екологічні переваги способів переробки небезпечних відходів із застосуванням плазмових технологій.

На відміну від технології [7] для переробки радіоактивної деревини, необхідно забезпечити також іммобілізацію фільтрату системи очищення відхідних газів (див. рис. 1), в якому накопичуватимуться «леткі» радіоактивні компоненти у вигляді тих чи інших сполук.

Проте якщо в умовах атомної електростанції вартість такої переробки не є надто критичною, то для переробки значних масивів радіоактивно забрудненої деревини вона стає істотним фактором. Дійсно, приймаючи, за даними загальнодоступної Вікіпедії, площу цього лісу на рівні 10 000 га з урахуванням середнього запасу деревини на 1 га 240 м³ [20], ідеться про переробку 2,4 млн. м³ «палива». Якщо його вдасться комерціалізувати, то можна сподіватися, що проблема буде вирішеною в досяжному майбутньому. Авторам відомо, що нині ця проблема не є першочерговою для Чорнобильської зони, проте у випадку її успішного вирішення можна було б за допомогою такої ж технології почати паралельно переробку численних на території зони необладнаних стихійних звалищ, що містять радіоактивні відходи.

Повертаючись до Рудого лісу, нагадаємо, що визначальною тут є теплотворність деревини, яка має доволі високе середнє значення порівняно з теплотворністю донних мулів – при вологості деревини 10-12% вона складає 3850 кал/кг або 16 МДж/кг. Це дещо менше, ніж на суху беззолну масу донних мулів, яка складає 22 МДж/кг [9 (част. 3)]. Проте донні мули як паливо мають значний недолік – високу зольність на рівні 50%. Вітрифікація значної маси мінерального залишку (іншими словами – золи) вимагає значних же витрат енергії, величину якої можна оцінити з емпіричного співвідношення [9 (част. 2), 22]:

$$M \text{ (кг)} = 0,35 P \text{ (кВт} \cdot \text{ год)}, \quad (3)$$

де M – маса вітрифікованого продукту, а P – споживана електрична енергія. Вона дозволяє визначити енерговитрати, необхідні для процесу вітрифікації, незалежно від термодинамічних розрахунків, пов'язаних із газифікацією вуглецевмісної сировини.

Отже, процес вітрифікації значних обсягів мінеральної маси, оскільки він пов'язаний зі зміною

фазового стану речовини (її плавленням), вимагає значних витрат електричної енергії. В умовах запропонованої технології ці витрати відносяться на власні потреби установки, що зменшує її комерційну привабливість. Переробка деревини, зольність якої складає всього на рівні 3%, згаданого переобтяження власних енергетичних витрат практично позбавлена.

Головні висновки. Створений авторами комплект апаратури є єдиним в Україні повномасштабним пілотним зразком технологічної лінії для переробки небезпечних відходів із дотриманням найвищих екологічних стандартів. Детальний термодинамічний аналіз процесів переробки небезпечних відходів із використанням плазмових технологій дозволив забезпечити також найвищі показники енергетичної ефективності процесу газифікації, що створює хороші передумови його комерціалізації.

Пропонована технологія дозволяє також переробляти прострочені пестициди та інші отрутохімікати. Оскільки нині вартість їх переробки за кордоном складає 500-600 Євро/т, то окупність такої вітчизняної технології складе два-три роки.

Попередні оцінки свідчать, що така технологія може бути використаною також для переробки радіоактивних відходів, зокрема радіоактивно забрудненої сировини походженням із Рудого лісу Чорнобильської зони та супутніх необладнаних стихійних звалищ, що містять радіоактивні відходи. В Україні доцільно було б провести додаткові дослідження із цього питання.

Перспективи використання. Основною проблемою щодо перспектив впровадження розробки є відсутність в Україні механізмів фінансування високо-вартісних дослідно-конструкторських робіт (ДКР). До цього часу авторам при загальній оціночній вартості установки на рівні 50 млн. грн. вдавалось вигравати проекти обсягом на рівні одного мільйона по лінії МОН України, які дозволяли фінансувати ДКР на розробку окремих вузлів. Проте створення робочої конструкторської документації вимагатиме її фінансування в повному обсязі.

Автори висловлюють вдячність за корисні консультації директору Інституту проблем безпеки атомних електростанцій НАН України чл.-кор. НАН України, д-ру техн. наук, проф. Носовському А.В.

У поточному році продовження цієї розробки підтримане Міністерством освіти і науки України в рамках конкурсу науково-технічних (експериментальних) розробок за державним замовленням (проект «Розроблення робочої конструкторської документації на виготовлення вузлів установки для паро-плазмової переробки небезпечних відходів») та Державним фондом фундаментальних досліджень (проект 55214 «Дослідження процесів сумісної газифікації різних видів небезпечних відходів із використанням плазмових технологій»).

Література

1. Патон Б.Е., Чернец А.В., Маринский Г.С., Коржик В.Н., Петров С.В. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов. Ч. I и II. Современная электрометаллургия. 2005. № 3. С. 54–63. № 4. С. 52–60.
2. Жовтянский В.А., Петров С.В., Коржик В.Н., Маринский Г.С. Применение электродуговой плазмы для конверсии углеродсодержащих материалов // Тез. докл. междунар. научно-практич. конф. «Энергоэффективность-2007» (Киев, 15 – 17 октября 2007 г.). К.: Ин-т газа НАНУ, 2007. С. 49–51.
3. O V Chernets, V M Korzhyk, G S Marynsky, S V Petrov and V A Zhovtyansky. Electric arc steam plasma conversion of medicine waste and carbon containing materials // XVII Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications (7th – 12th September 2008, Cardiff, Wales). Proceedings / Ed. J.E.Jones. Cardiff: Cardiff University, 2008. P. 465–468.
4. Жовтянский В.А., Петров С.В., Колесник В.В. и др. Конверсия углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2012. № 5. С. 15–32.
5. Жовтянский В.А., Дудник О.М., Якимович М.В. Одержання синтез-газу з бурого вугілля та мулу з використанням парового плазмотрона. Новини енергетики. 2015. № 4. С. 26–28.
6. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration waste. Official Journal of the European Communities L 332, 28/12/2000. P. 91–111.
7. Полканов М.А. Установка «Плутон»: Плазменно-пиролитическая переработка твердых РАО. 2013. С. 5. URL: www.radon.ru/files/images/plazma.pdf.
8. Про радіаційну ситуацію в зоні відчуження в районі пожежі / Інформаційне повідомлення. 2018. URL: <https://menr.gov.ua/news/32442.html>.
9. Жовтянский В.А., Орлик В.М., Петров С.В., Якимович М.В. Загальні принципи переробки відходів з вилученням їхнього енергетичного потенціалу на основі плазмових технологій. Ч. 1–3. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2015. № 4. С. 24–46. 2016. № 3. С. 25–42. 2018. № 2. С. 16–31.
10. Руководящие принципы по наилучшим имеющимся методам и предварительные указания по наилучшим видам природоохранной деятельности применительно к статье 5 и Приложению Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях. UNEP/POPS/COP.1/INF/7. 2005. 371 p.
11. Бондар О.І., Лозовіцький П.С., Машков О.А., Лозовіцький А.П. Екологічний стан накопичених осадів стічних вод м. Києва // Екологічні науки. К.: ДЕА. 2014 № 7. С. 38–53.
12. Cedzynska K., Kolacinski Z., Izydorczyk M. and Sroczynski W. Plasma vitrification of waste incinerator ashes. International Ash Utilization Symposium. Centre for Applied Energy Research. 1999. 5 p.
13. Шиллинг Г.-Д., Бонн Б., Краус У. Газификация угля. М.: Недра, 1986. 175 с.
14. Ducharne C. Technical and economic analysis of Plasma-assisted Waste-to-Energy processes. Earth Engineering Centre: Columbia University, 2010. 79 p.
15. Technical Overview of the Waste-to-Energy Plant in Brno, Plant for Region with 2 mil. people. 2017. URL: <http://www.sako.cz/page/en/607/waste-to-energy/>.
16. Integrated Multifuel Gasification technology (IMG) of Bellwether Recuperative Gasification Ltd. 2017. URL: <http://bwrs.eu/>.
17. Технология плазменной газификации Westinghouse Plasma Corporation. 2016. URL: http://www.cleandex.ru/articles/2016/03/07/zavody_po_pererabotke_othodov_proizvodstva_i_potrebleniya_v_elektroenergiyu.
18. Волошинюк І.М. Блок нагрівальний інфрачервоний електричний «Індіго» // Патент України № 82659 від 12.08.2013, МПК H05B 3/00.
19. Волошинюк І.М. Сушильна камера барабанного типу з нагрівними інфрачервоними елементами «Індіго» // Патент України № 83222 від 27.08.2013, МПК F26B 11/00, F27B 7/00.
20. Савущик М.П., Попков М.Ю., Полякова Л.В. Особливості лісового фонду державного комітету лісового господарства України. 2003. URL: <https://www.lisportal.org.ua/82/>.
21. Теплотворна здатність дров. 2018. 2 с. URL: <https://bio.ukrbio.com/ua/articles/3335/>.
22. E. Leal-Quiros. Plasma Processing of Municipal Solid Waste. Brazilian Journal of Physics. 2004. 34, № 4B. P. 1587–1593.