

Вибір і обґрунтування способів термічної утилізації радіоактивно забрудненої деревини

- **Клюс Володимир Павлович**, канд. техн. наук, доц.
Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України, м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8536-3211>

Значні об'єми горілої та сухостійної деревини, які утворилися останніми роками внаслідок масштабних лісових пожеж на території Чорнобильської зони відчуження несуть потенційну загрозу вторинного забруднення чистих територій. Для усунення цієї загрози необхідно вирішити проблему утилізації великих об'ємів радіоактивно забрудненої деревини.

У статті виконано аналіз способів термічної утилізації радіоактивно забрудненої деревини. Метою утилізації є максимальна концентрація радіонуклідів у золі для її захоронення та зменшення міграції радіонуклідів в атмосферу з димовими газами.

Розглянуто основні методи термічної утилізації деревини: спалювання, піроліз та газифікація. У разі традиційного фільтраційного спалювання радіонукліди відкладаються на частках леткої золи розміром 0,3-0,5 мкм і виносяться в атмосферу з димовими газами, що потребує високоефективного очисного обладнання. Натомість у разі сухого піролізу деревини винос активності ^{137}Cs з піролізним газом становить не більше 10 %. Близький результат отримано і у разі газифікації деревини. Оскільки об'єми піролізного і генераторного газів менші за об'єм димових газів від спалювання, то навантаження на систему газоочищення буде значно меншим.

Зроблено висновок, що для промислової утилізації великих об'ємів забрудненої деревини варто використовувати сучасні технології газифікації. Генераторний газ придатний для виробництва електроенергії в газових турбінах або газопоршневих агрегатах. Електроенергія може подаватися в існуючу енергосистему Чорнобильської зони відчуження.

Запропоновано переробляти низькоактивну деревину способом окиснювального піролізу для виробництва біочару. Питома активність біочару повинна відповідати гігієнічному нормативу ГН 6.61-120-2005. Враховуючи міжнародний досвід використання біочару, передбачається проведення комплексних досліджень щодо ефективності сорбції радіонуклідів біочаром.

Ключові слова: біочар, виробництво електроенергії, газифікація, піроліз, радіоактивно забруднена деревина, спалювання.

© Клюс В. П., 2023

Вступ

Одним із важких наслідків аварії на Чорнобильській АЕС стало радіоактивне забруднення величезних площ з інтенсивним веденням лісокористування. Проте в Україні до цього часу залишається невирішеним питання поводження із радіоактивно забрудненою деревиною. Унаслідок масштабних лісових пожеж в Чорнобильській зоні відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення (ЧЗВ) у 2015 році утворилося близько 2 млн м³ горілої і сухостійної деревини. Зволікання з ухваленням рішення може привести до виникнення нових по-

жеж з непередбачуваними транскордонними наслідками [1]. З огляду на це виникає необхідність запровадження заходів з використання радіоактивно забруднених лісів і залучення їх до господарської діяльності. Притому необхідно забезпечити вилучення із біологічного циклу радіонуклідів, які переважно зосереджуються в корі, відходах переробки, гіллі. Основними способами термічної утилізації радіоактивно забрудненої деревини та її відходів є спалювання, піроліз та газифікація. Під час утилізації радіоактивно забруднених відходів потрібно уникати викидів радіонуклідів в атмосферу та концентрувати їх у золі для подальшого її захоронення.

Аналіз літературних даних

Більшість робіт щодо аналізу можливостей використання деревини з високим вмістом радіонуклідів присвячено вивченню напрямів застосування ділової деревини як сировини для подальшої переробки. А питання утилізації відходів, які утворюються у процесі первинної переробки деревини, не розглядаються. Також значна частина лісів унаслідок високої радіоактивної забрудненості не може перероблятися на пиломатеріали і тому повинна бути утилізована.

Утилізація способом захоронення. Проводити захоронення величезної кількості відходів деревообробки вважається економічно недоцільним і технічно нереальним. Наприклад, для захоронення так званого «рудого лісу» з ЧЗВ були вилучені з подальшого обороту значні площі сільськогосподарських угідь. Переробка термічними методами радіоактивних деревних відходів дозволяє в десятки разів зменшити об'єм відходів (золи), та отримати при тому теплову енергію. Установки з термічної утилізації деревних відходів потрібно розглядати як об'єкти відновлюваної енергетики, які працюють на радіоактивно забрудненому біопаливі.

Літературні дані щодо термічної утилізації радіоактивно забрудненої деревини у вільному доступі вкрай обмежені. Перші дослідження щодо спалювання радіоактивно забрудненої біомаси були проведені у США в Національних лабораторіях Сандія (Каліфорнія) на установці потужністю 250 кВт, а потім на котельній установці потужністю 90 МВт у місті Андерсон (Каліфорнія). Для моделювання радіонуклідів у систему подачі палива вводилися водні розчини сульфату цезію і нітрату стронцію [2].

У 1999 році було проведено спалювання забрудненої деревини ЧЗВ в реальних умовах на котельні потужністю 6 МВт у місті Річиця (республіка білорусь). За результатами випробувань було встановлено: леткі радіонукліди конденсуються на частках розміром 0,3-0,5 мкм; вміст ^{137}Cs у золі виносу в 4-7 разів більший ніж у подовій золі; високотемпературні рукавні фільтри та електрофільтр забезпечують ефективність очистки димових газів від радіонуклідів на рівні 99,9%. Питома активність тріски, яка використовувалася для спалювання, становила біля 109 Бк/кг, питома активність золи виносу в рукавних фільтрах – 10444 Бк/кг. Зауважимо, що зола виносу також відкладається та накопичується на теплообмінних поверхнях і газоходах котельного обладнання, тому з часом сама котельня може стати джерелом радіоактивного випромінювання.

Сучасний стан промислової термічної утилізації забрудненої деревини. Поставки ліквідної деревини із забруднених лісів (до 15 Ки/км²) відбуваються по всій території республіки білорусь [2]. Очевидним є факт, що використання такої дере-

вини призводить до неконтрольованого переносу активності із лісу в житлову зону під час спалювання деревинних відходів. Середня активність відходів, які поставляються із зони до 15 Ки/км² становить 200 Бк/кг. Загальна потужність котельних установок, які працюють на цих відходах, становить 25 МВт. Жодна з цих установок не обладнана ні системою газоочищення, ні механічним золовидаленням. Значна частка забрудненої деревини спалюється населенням, а зола використовується як добриво.

Актуальною є проблема спалювання забрудненої деревини населенням поліських областей України, лісові масиви яких зазнали найбільшого радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Так, у результаті досліджень деревної золи у приватних господарствах населених пунктів північних районів Житомирської області встановлено діапазон активності золи 170-32900 Бк/кг. Близько 8,5% від загальної кількості зразків золи класифікуються як низькоактивні радіоактивні відходи. Тобто забруднена зола є потенційним джерелом опромінення місцевого населення [3].

Утилізація твердих низькоактивних відходів, які утворюються на підприємствах та установах ядерного профілю в росії, відбувається, наприклад, на установці УСТ-50 способом спалювання. Продуктивність установки 50 кг/год, температура спалювання 700-800 °С. Отримана у процесі спалювання зола затарюється в бочки ємністю 200 л. Димові гази очищуються в рукавному фільтрі [4].

На Запорізькій АЕС працює установка комплексу з переробки радіоактивних відходів, яка призначена для спалювання регулярних твердих і рідких радіоактивних відходів. Такі ж установки планується спорудити і на Хмельницькій АЕС та Південноукраїнській АЕС [5].

В Інституті проблем Чорнобилю розроблено технологію пірогазифікаційного спалювання радіоактивних відходів та створено експериментальну установку потужністю 2 т/год. Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження технології для зменшення об'ємів радіоактивних відходів, які виникли під час дезактивації територій, забруднених внаслідок аварії АЕС «Фукусіма Даїчі» [6].

У м. Чорнобиль на котельні установлений інсертатор для спалювання радіоактивно забрудненої деревини. Він являє собою серійний котел КВМ (а) потужністю 1,75 МВт виробництва фірми «Крігер». Гаряча вода використовується на побутові цілі. Очистка димових газів відбувається в циклоні та рукавному фільтрі, зола затарюється в бочки ємністю 200 л. Температура спалювання 800 °С [7].

Отже, під час фільтраційного спалювання основна частина радіонуклідів виноситься з димовими газами, а тому необхідно зменшити вміст у них радіонуклідів. Цього можна досягнути використанням більш безпечних способів спалювання.

У роботах [8], [9] запропонована і експериментально перевірена нова технологія спалювання радіоактивно забрудненої деревини, яка полягає в пульсаційній подачі палива і повітря в камеру згоряння. При такому виді спалювання швидкість димових газів становила 0,1 м/с. Було виявлено, що в золі питома активність ^{137}Cs у декілька разів більша, ніж у золі, отриманій під час звичайного фільтраційного спалювання в шарових топках. Отримані дані свідчать про зменшення емісії ^{137}Cs з димовими газами. Близький результат був також отриманий під час низькотемпературного піролізу та газифікації забрудненої деревини. Так, під час сухого піролізу за температури 750 С винос активності ^{137}Cs з піролізним газом не перевищував 10 % від початкової активності деревини. Основна частка активності залишається в деревному вугіллі. У разі газифікації, 90 % активності концентрується в подовій золі і біля 15 % виноситься з аерозолями, які знаходяться в генераторному газі [10].

У роботі [11] була детально вивчена міграція радіонуклідів під час сухого піролізу берези. Зокрема встановлено, що радіонукліди ^{137}Cs і ^{90}Sr , які знаходяться в деревині, не впливають на фізико-хімічні характеристики деревинного вугілля, а вологість деревини не впливає на питому активність ^{137}Cs і ^{90}Sr у деревинному вугіллі. У процесі піролізу за кінцевої температури 820 °С питома активність ^{137}Cs і ^{90}Sr у деревинному вугіллі збільшується відповідно у 3,4 і 3,8 рази відповідно порівняно з питомою активністю деревини. У піролізному газі вміст ^{90}Sr становить 3-10 % від загальної кількості в деревині, а в рідких продуктах піролізу ^{137}Cs не виявлений.

Постановка завдання досліджень

Метою статті є вибір та обґрунтування нових способів термічної утилізації радіоактивно забрудненої деревини, які забезпечують максимальну концентрацію радіонуклідів у золі та зменшують їх міграцію в атмосферу, а також напрямів використання енергії термічного перетворення деревини.

За результатами огляду літературних матеріалів встановлено, що під час піролізу і газифікації в атмосферу потрапляє менша кількість радіонуклідів, ніж під час фільтраційного спалювання. Тому є необхідність більш детально розглянути ці технології для можливості їх використання в ЧЗВ.

Результати дослідження

Піроліз. Піроліз деревини відбувається у процесі її нагрівання до високих температур за відсутності кисню в реакторі. Цільовим продуктом піролізу є деревне вугілля із вмістом вуглецю понад 90 %, побічним – піролізний газ. Вважаємо, що в ЧЗВ піролізом

може перероблятися низькоактивна деревина. Так, відповідно до документа [12], гігієнічний норматив питомої активності дров паливних становить: $^{137}\text{Cs} \leq 600$ Бк/кг, $^{90}\text{Sr} \leq 60$ Бк/кг. Дрова паливні використовуються населенням, а зола захоронюється поза населеним пунктом. Відповідно в ЧЗВ може використовуватися і деревне вугілля з такими граничними нормами активності, як і для дров. Враховуючи, що під час піролізу деревини концентрація радіонуклідів у деревному вугіллі збільшується (^{137}Cs у 3,8 раза, а ^{90}Sr у 3,4 раза [11]), визначаємо орієнтовну активність деревини, яка може використовуватися для піролізу: $^{137}\text{Cs} \leq 158$ Бк/кг, $^{90}\text{Sr} \leq 18$ Бк/кг. Найбільш поширеним є сухий піроліз із зовнішнім нагріванням деревини через стінки реактора.

Для проведення сухого піролізу деревина повинна мати вологість не більше 20-25 %. Водночас вологість свіжозрізаної деревини сягає 45 %. Сушіння великих об'ємів деревини потребує багато часу і енергії. Тому для прискорення переробки і зменшення енергоємності необхідно використовувати нові способи термічної переробки деревини з високою природною вологістю. До таких способів належить і нова технологія окиснювального піролізу (часткової газифікації) твердого палива. Спочатку ця технологія була розроблена для виробництва коксу із викопного вугілля [13]. Надалі окиснювальний піроліз був поширений і на переробку біопалива. Зокрема, в роботі [14] досліджувалася переробка різних видів сухого біопалива, а в роботі [15] – біопалива з природною вологістю до 47,5 %. На рисунку 1 зображено принципову схему окиснювального піролізу та наведено основні хімічні реакції, які при тому відбуваються.

Принципова відмінність окиснювального піролізу від сухого полягає у способі нагрівання палива. У сухому піролізі паливо нагрівається нерівномірно через стінку реактора за допомогою теплопередачі, а у окиснювальному піролізі – за допомогою конвекції та випромінювання і, як наслідок, рівномірно. Швидкість руху піролізного газу становить 0,01-0,04 м/с, що у 2,5-10 разів менше ніж швидкість руху димових газів під час пульсаційного спалювання, що дозволяє мінімізувати вихід радіонуклідів з газом. Під час переробки волого біопалива відбувається активація виробленого деревного вугілля парогазами, які виділяються під час пірогенетичного розпаду деревини (рисунк 1). Вміст вуглецю в активованому вугіллі досягає 97 %. Пориста структура активованого вугілля утворюється в результаті хімічної взаємодії розпеченого до температури понад 800 °С вуглецю з вуглекислим газом і водяною парою. Унаслідок прогару вуглецю в ньому утворюються пори з великою внутрішньою питомою поверхнею (до 350 м²/г). Для порівняння, внутрішня питома поверхня деревного вугілля, отриманого сухим піролізом, становить до 120 м²/г.

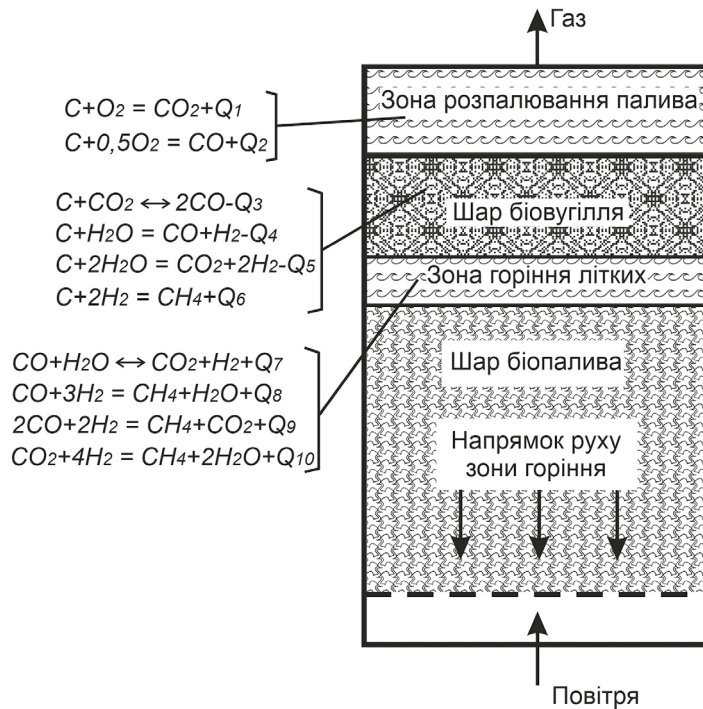


Рисунок 1 – Схема окиснювального піролізу

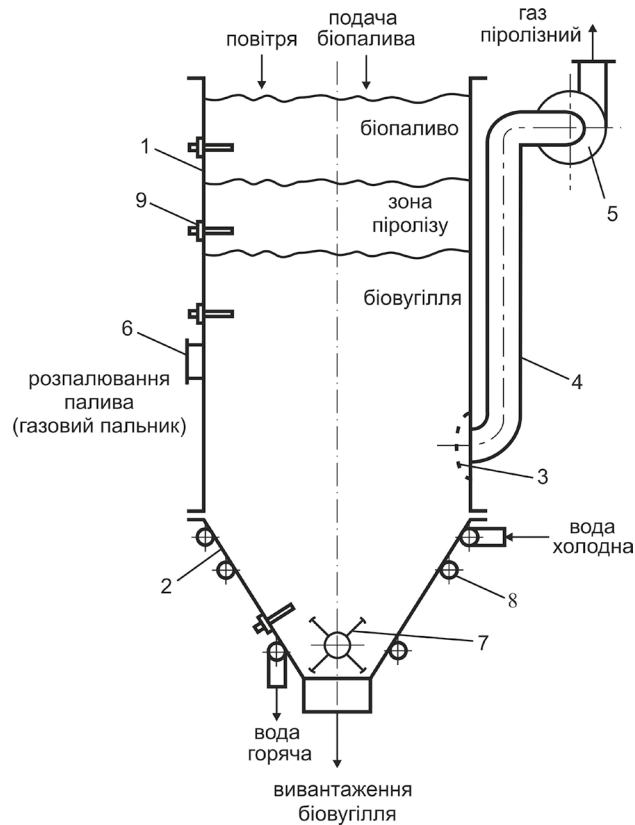
Розглянемо тепер можливість використання активованого деревного вугілля для сорбції радіонуклідів на території ЧЗВ. Так, наприкінці XX століття в басейні р. Амазонка були відкриті надзвичайно родючі землі, які отримали назву Terra Preta (Чорна земля). Проведені хімічні аналізи показали, що ці землі містять 10-30 % деревного вугілля віком близько 2000 років [16]. Наукова спільнота всього світу почала активно досліджувати це питання. Активоване вугілля, яке вноситься в ґрунт, отримало назву біочар (biochar). Зокрема було визначено, що питома внутрішня поверхня його повинна бути не менше $150 \text{ м}^2/\text{г}$ [17]. За останні 20 років внесення біочару під сільськогосподарські культури набуло широкого впровадження, завдяки суттєвому збільшенню врожайності [18]. За повідомленнями ЗМІ біочар також використовується у Японії для дезактивації забруднених земель навколо АЕС «Фукусіма Даїчі».

В Україні ще у 2002 році був запропонований спосіб очистки ґрунту від радіонуклідів за допомогою вуглецевих сорбентів [19]. Проте він залишився маловідомим, тому що в роботі [16] стверджується, що вплив біочару на рослини в радіоактивно забруднених екосистемах не було досліджено. Наведена вище інформація стосується біочару, виготовленого з чистої сировини. Нами вперше пропонується виготовлення біочару із низькоактивної деревини за технологією окиснювального піролізу і використання його в ЧЗВ. Технологія окиснювального піролізу періодичної дії реалізована в промислових масштабах для карбонізації бурого вугілля у місті Красноярськ і в Україні для карбонізації пелет із деревини [13], [14].

В Інституті відновлюваної енергетики НАН України розроблено установку безперервної дії (рисунок 2) [20]. Технологія безперервного окиснювального піролізу була випробувана на експериментальній установці. Як біопаливо використовували пелети, деревну тріску, тріску верби енергетичної. За результатами випробувань встановлено, що продуктивність установки у 2 рази більша ніж аналогічної періодичної дії. Отриманий безсольний піролізний газ можна спалювати не лише в котельній, а і у двигунах внутрішнього згоряння для виробництва електроенергії.

Газифікація радіоактивно забрудненої деревини. Наразі відомо декілька десятків способів газифікації твердого палива. Найбільш простим є спосіб прямої газифікації із зустрічними потоками палива і повітря у вертикальному реакторі. Упродовж багатьох років газогенератори прямого процесу газифікації показали високу надійність роботи. Але вони малопродуктивні, а генераторний газ містить багато смоли, і його рекомендується спалювати у гарячому стані, щоб уникнути конденсації смоли. Калорійність генераторного газу невисока ($5-7 \text{ МДж}/\text{м}^3$) унаслідок наявності в ньому біля 50 % азоту, який входить до складу повітря дуття.

Розвиток сучасних технологій газифікації біомаси переважно відбувається за напрямом виробництва безсольного генераторного газу для генерації електроенергії в турбінах та двигунах внутрішнього згоряння і за напрямом перетворення генераторного газу в синтетичний природний газ (СПГ) для подачі в газотранспортну систему.



1 – корпус; 2 – конічна царга; 3 – газопідбірна решітка; 4 – труба; 5 – димосос;
6 – люк для розпалювання; 7 – шлюзовий затвор; 8 – водяний змішувач; 9 – термореле

Рисунок 2 – Реактор піролізний безперервної дії під розрідженням

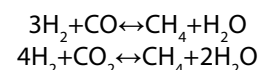
Фірма «ТММ»-ТОВ пропонує проводити утилізацію радіоактивно забрудненої деревини за технологією газифікації британської фірми «Tetronics». Отриманий генераторний газ планується переробляти в біометанол, мінеральні добрива, засоби захисту рослин та інше [1].

Одним з найбільш успішних проєктів є установка газифікації тріски, яка побудована в маленькому австрійському місті Гюссінг [21]. В установці використана технологія киплячого шару біомаси, розроблена у Віденському технічному університеті під керівництвом Германа Хофбауера. Установка виробляє 2 МВт електричної і 4,5 МВт теплової енергії. Наразі установка працювала понад 90000 годин у штатному режимі. Крім цієї, в окрузі Гюссінг працюють ще 27 автономних електростанцій на трісці. Завдяки своїй стабільній роботі установка в Гюссінгу стала центром випробувань нових технологій, зокрема метанування генераторного газу для отримання СПГ з параметрами, які відповідають природному газу. Так, після модернізації і комплектування додатковим обладнанням установка стала виробляти СПГ. Випробування показали, що з 300 кг тріски можна отримати 120 м³ СПГ. Загальна потужність установки з СПГ

1 МВт. Починаючи з 2003 року установка забезпечує електроенергією і теплом частину м. Гюссінг з населенням 4000 жителів.

Перший великий проєкт виробництва СПГ потужністю 20 МВт із деревини був реалізований у шведському місті Гетеборг у 2014 році. Проєкт отримав назву COBIGAS і базується на використанні технології газифікації, яка успішно себе зарекомендувала у місті Гюссінг. До складу COBIGAS входять установка парової газифікації тріски, установка очистки газу від смоли і домішок, установка метанування.

Найбільш складним елементом технології є процес утворення СПГ із компонентів генераторного газу за реакціями Сабатьє:



Метанування оксидів вуглецю відбувається в реакторі під тиском 1-5 бар і температурі 300-450 °С в присутності каталізатора. Процес метанування подібний процесу синтезу аміаку, який використовується в хімічній промисловості понад 100 років.

У квітні 2017 року проєкт був зупинений через високу вартість СПГ. Нині вартість природного газу в Європі є рекордно високою і тому можна сподіватися на продовження другої стадії проєкту – спорудження установки потужністю 80-100 МВт.

Висновки

Зараз на об'єктах атомної енергетики України для утилізації порівняно незначних об'ємів радіоактивно забруднених матеріалів використовується фільтраційне спалювання. Водночас для утилізації великих об'ємів забрудненої деревини розглядається можливість впровадження сучасних технологій газифікації, які розроблені і впроваджені в Європі. Зокрема, парова газифікація в установках киплячого шару, які виробляють чистий безсольний газ, придатний для спалювання в газових турбінах та газопоршневих електростанціях середньої потужності. У ЧЗВ наявні діючі лінії електропередачі, приєднані до енергосистеми України. Враховуючи величезний потенціал деревини в ЧЗВ (загальна площа лісів 246000 га), а також 40000 га сільгоспугідь, придатних для вирощування енергетичних культур, ЧЗВ може стати найбільшим в Україні об'єктом з виробництва «зеленої» електроенергії з біомаси, причому сталої, на відміну від сонячної та вітрової. У більш віддаленій перспективі генераторний газ може бути перетворений у СПГ або хімічну продукцію.

Новим перспективним напрямом є окислювальний піроліз низько активної деревини для виробництва біочару. Вміст радіонуклідів у біочарі повинен відповідати гігієнічним нормативам ($^{137}\text{Cs} \leq 600$ Бк/кг, $^{90}\text{Sr} \leq 60$ Бк/кг). Для реалізації цього напрямку потрібно налагодити виробництво біочару та провести комплекс досліджень щодо ефективності його використання на території ЧЗВ.

Список використаної літератури

1. Толмачов М. Г. Утилізація радіоактивно-забрудненої деревини методом газифікації. *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 21)* : зб. матеріалів VI Міжнародної конференції, м. Славутич, 27–29 квітня 2021 р. Чернівці : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 288–290.
2. Соловьев В. Н., Гребеньков А. Ж., Плещанков И. Г., Щекина С. Г., Якушев А. П. Реабилитация лесных территорий, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС. *Ядерные технологии XXI века: критерии существования и решения* : материалы Междунар. научн. конф., г. Минск, 24–26 окт. 2012. Минск, 2012. С. 129–151.

3. Лазарев М.М., Ландін В. П., Косарчук О. В., Поліщук С. В., Левчук С. Є. Радіоекологічна оцінка деревної золи в населених пунктах півночі Житомирського Полісся. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 4. С. 29–36.

4. Серебряков В. В., Мамонов А. В., Давидов В. В., Розживин С. Г., Гордеев В. П. Оценка эффективности переработки радиоактивных отходов на установке сжигания. *Охрана окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами научно-промышленных центров, вывод из эксплуатации ЯРОО*: материалы Междунар. научн.-практ. конф., м. Сергиев-Посад, 23–24 сент. Сергиев-Посад, 2020. С. 120–123.

5. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом»: звіт. Київ : ДП «НАЕК «Енергоатом», 2021. 76 с.

6. Верюжський Ю. В., Гринько О. М., Токаревський В. В. Радіаційна безпека спалювання радіоактивних відходів, забруднених цезієм. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 1. С. 66–72. doi: 10.32918/nrs.2017.1(73).12.

7. Котельня (інсинератор) для спалювання радіоактивно-забрудненої деревини: URL: <https://uar.kiev.ua/archives/projects/котельня-інсинератор-для-спалювання>.

8. Полежаев Ю. В., Гешеле В. Д., Стоник О. Г., Раскатов И. П., Соловьев В. Н., Плещанков И. Г., Бида Л. А., Левчук А. С., Фокина Г. И. Снижение эмиссии ^{137}Cs в атмосферу при сжигании загрязненного радионуклидами твердого топлива в условиях возбуждения термоакустических автоколебаний и газодинамических пульсаций. *Инженерно-физический журнал*. 2015. Т. 88, № 2. С. 364–370.

9. Полежаев Ю. В., Гешеле В. Д., Раскатов И. П., Соловьев В. Н., Плещанков И. Г., Бида Л. А., Левчук А. С., Фокина Г. И. Вибрационное горение как перспектива утилизации загрязненного радиоцезием древесного топлива. *Инженерно-физический журнал*. 2013. Т. 86, № 1. С. 145–151.

10. Соловьев В. Н., Бида Л. А., Хилько Л. И., Фокина Г. И. Экспериментальное исследование распределение изотопов ^{137}Cs в продуктах пиролиза и газификации древесных радиоактивных отходов. *Вестник Национальной академии наук Белоруссии. Серия «физ.-тех. науки»*. 2000. № 3. С. 130–135.

11. Сидоров А. Ю. Пирогенетическая переработка древесины березы, подвергнутой радионуклидному загрязнению: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.21.00. Красноярск, 2012. 23 с.

12. Гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у деревині та продукції з деревини: Гігієнічний норматив ГН 6.61 -120-2005. Видання офіційне. К., 2005. 12 с.

13. Исламов С.Р. Энерготехнологическая переработка углей. Красноярск : Поликор, 2010. 224 с.

14. Кремнева Е. В., Губинский М. В., Шевченко Г. Л., Адаменко Д. С., Шишко Ю.В. Исследование термического разложения биомассы в режиме фильтрационного горения. *Металлургическая теплотехника*. 2009. Вып. 1(16). С. 126–136.

15. Ключ С. В. Експериментальні дослідження процесів енерготехнологічного перетворення біомаси в реакторах щільного шару палива. *Відновлювана енергетика*. 2015. № 3(42). С. 85-92.

16. Мандро Ю. Н., Давидова І. В. Перспективи застосування деревного вугілля (біоچارу) як ефективногого контрзаходу для радіоактивно забруднених і деградованих лісових екосистем. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020. Т. 30, № 4, С. 92-98.

17. Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C.; van der Velde M.; Diafas, I. Biochar Application to Soils. A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions; JRC Scientific and Technical Reports; European Commission: Luxembourg, 2010.

18. Материалы международного научного семинара «Биоуголь: свойства, применение в сельском хозяйстве, влияние на почвы, растения и окружающую среду» ФГБНУ АФИ, С. Петер. Россия, 08 дек. 2020 г. 123 с.

19. Спосіб очистки ґрунту від радіонуклідів: пат. Україна. № 46182; G21F 9/34; заявл. 11.10.1999; опубл. 15.05.2002, Бюл. № 5. 3 с.

20. Реактор піролізний: пат. 143271 Україна. № ч 201911093; заявл. 12.11.2019; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 4. 3 с.

21. Синтетический природный газ из угля, сухой биомассы и применение в газоэнергетике / под ред. Тильмана Дж. Шильдауэра, Сержа М. А. Биоллаза. Нур-Султан: Инст. П. Шерра, 2019. 242 с.

6. Veriuzhsky, Yu., Hrynko, O., Tokarevsky, V. (2017). Radiation safety of burning radioactive waste contaminated with cesium. *Nuclear and Radiation Safety*, 1. 66-72. doi: 10.32918/nrs.2017.1(73).12.

7. Boiler room (incinerator) for burning radioactively contaminated wood. (2016). Official site of Corporation "Ukrainian Atomic Devices and Systems". Retrieved from <https://uap.kiev.ua/>.

8. Polezhaiev, Yu., Geshele, V., Stonik, O., Raskatov, I., Solovyov, V., Pleshchankov, I., Bida, L., Levchuk, A., Fokina, G. (2015). Reduction of ¹³⁷Cs emission into the atmosphere in combustion of a radionuclide-contaminated solid fuel under conditions involving excitation of thermoacoustic self-oscillations and gas-dynamical pulsations. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 88(2), 364-370.

9. Polezhaiev, Yu. Geshele, V., Raskatov, I., Solovyov, V., Pleshchankov, I., Bida, L., Levchuk, A., Fokina, G. (2013). Vibration combustion as a prospect for utilizing firewood contaminated with radiocesium. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86(1), 145-151.

10. Solovyov, V., Bida, L., Khilko, L., Fokina, G. (2000). Experimental study of the distribution of ¹³⁷Cs isotopes in the products of pyrolysis and gasification of wood radioactive waste. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus, series "Physical Technical Science"*, 3, 130-135.

11. Sidorov, A. (2012). Pyrogenetic processing of birch wood subjected to radionuclide contamination. Extended abstract of candidate's thesis, 05.21.00. Krasnoyarsk Siberian State Technological University, Krasnoyarsk.

12. Health and safety standard for specific activity of radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in wood and wood products, health and safety standard GN 6.61-120-2005. Official publication, Kyiv, 2005, 12 p.

13. Islamov, S. (2010). Energy technology processing of coal. Krasnoyarsk, Polikor, 2010, 224 p.

14. Kremneva, E., Gubinsky, M., Shevchenko, G., Adamenko, D., Shishko, Yu. (2009). Investigation of thermal decomposition of biomass in the mode of filtration combustion. *Metallurgical Heat Engineering*, 1 (16), 126-136.

15. Klius, S. (2015). Experimental studies of processes of energy-technological transformation for biomass in dense fuel bed reactors. *Renewable Energy*, 3 (42), 85-92.

16. Mandro, Y., Davydova, I. (2020). Prospects for the use of charcoal (biochar) as an effective countermeasure for radioactively contaminated and degraded forest ecosystems. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 30 (4), 92-98.

17. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A., C., van der Velde, M., Diafas, I. (2010). Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. JRC scientific and technical reports, European Commission.

18. Materials of the international scientific seminar "Biocharcoal: properties, application in agriculture, impact on soils, plants and the environment". FGBNU AFI, St. Petersburg, Russia, 08 December 2020, 123 p.

19. Strielko, V., Openko N., Diiuk, O., Shvets, D., Hlushachenko, O. (2002). The method of soil cleaning from radionuclides, patent No. 46182, Ukraine: G21F 9/34, statement of 11 October 1999, published on 15 May 2002, Bulletin No. 5, 3 p.

References

1. Tolmachov, M. (2021). Utilization of radioactively contaminated wood by the gasification method. Problems of decommissioning nuclear energy facilities and environmental restoration (INUDECO 21), collection of theses and reports of the VI International Conference. Slavutych, 27-29 April 2021, Chernihiv, Chernihiv Polytechnic University, 288 -289.

2. Solovyov, V., Grebenkov, A., Pleshchankov, I., Shchekina, S., Yakushev, A. (2012). Rehabilitation of forest areas contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *Nuclear technologies of the XX century: criteria for existence and decision*. Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, 24-26 October, 129-151.

3. Lazarev, M., Landin, V., Kosarchuk, O., Polishchuk, S., Levchuk, S. (2017). Radioecological assessment of wood ash in the settlements of the north of Zhytomyr Polissia. *Agroecological Journal*, 4, 29-36.

4. Serebryakov, V., Mamonov, A., Davidov, V., Rozzhivin, S., Gordeev, V. (2020). Evaluation of the efficiency of radioactive waste processing at an incinerator. *Environmental protection and radioactive waste management of scientific and industrial centers, decommissioning of NRHF*. Proceedings of the International Conference, Sergiev Posad, 23-24 September 2020, 120-123.

5. Management of radioactive waste during the operation of the NPPs of the SE NNEGC Energoatom. (2021). Report. Kyiv, NNEGC Energoatom.

20. Klius, V., Klius, S. (2020). Pyrolysis reactor, patent No. 143271, Ukraine, C10J3/60, C10J1/207, C10B53/02, F23B80/02. No. u 201911093; statement of 12 November 2019, published on 27 July 2020, Bulletin No. 14, 3 p.

21. Tilman, J., Schildhauer, Serge, M., A., Biollaz. (2019). Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and power-to-gas applications. Edited by Tilman J. Schildhauer, Serge M. A. Biollaz, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 242 p.

Selection and Justification of Methods for Thermal Disposal of Radioactively Contaminated Wood

V. Klius

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Significant amounts of burnt and dead wood, which have formed in recent years as a result of large-scale forest fires in the territory of the Chernobyl exclusion zone, pose a potential threat of secondary contamination for clean areas. To eliminate this threat, it is necessary to solve the issue of disposal for large amounts of radioactively contaminated wood. The paper analyzes methods for thermal disposal of radioactively contaminated wood. The goal of disposal is the maximum concentration of radionuclides in the ash for its disposal and the reduction of radionuclide migration into the atmosphere with flue gases. The main methods of wood thermal disposal are considered: burning, pyrolysis and gasification. With traditional filter incineration, radionuclides are deposited on fly ash particles with a size of 0.3-0.5 microns and are carried into the atmosphere with flue gases, which requires highly efficient cleaning equipment. On the other

hand, during dry pyrolysis of wood, the removal of ^{137}Cs activity with pyrolysis gas is not more than 10%. A similar result was obtained during the gasification of wood. Since the volume of pyrolysis and generator gases are smaller than the volume of flue gases resulting from combustion, the load on the gas treatment system will be much smaller.

It was concluded that modern gasification technologies should be used for the industrial disposal of large amounts of contaminated wood. Generator gas is suitable for power generation in gas turbines or gas piston units. Electricity can be supplied to the existing power system of the Chernobyl exclusion zone.

It is proposed to process low-activity wood by the method of oxidative pyrolysis for the production of biochar. Biochar specific activity must comply with health and safety standard GN 6.61-120-2005. Taking into account the international experience of using biochar, it is planned to carry out comprehensive studies regarding the effectiveness of radionuclide sorption by biochar.

Keywords: biochar, burning, electricity production, gasification, pyrolysis, radioactively contaminated wood.

Отримано 28.11.2022