

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ВПЛИВУ НА КЛІМАТ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ НА ЕНЕРГІЮ НА ПРИКЛАДІ ТЕРМІЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ

Маркіна Л.М.¹, Власенко О.В.¹, Тодчук Д.В.¹, Ковтунов О.В.², Онопчук І.М.³

¹Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Дарницька районна в місті Києві державна адміністрація
вул. О. Кошиця, 11, 02068, м. Київ

³Бюджетна установа «Національний центр обліку викидів парникових газів»
вул. Митрополита Липківського, 35, 03035, м. Київ, Україна

Досліджено вплив накопичення твердих побутових відходів на клімат, а також різних технологій їх переробки, ключову роль в яких відіграють технології перетворення відходів у енергію (WtE). Серед них спалювання – найпоширеніший метод обробки. Технологія спалювання широко використовується на більшості сміттєспалювальних заводів. Такі технології дозволяють зменшити початкову масу твердих побутових відходів і виробляти теплову та електричну енергію у промислових масштабах. Спалювання сміття вважається ефективним способом поводження з відходами й отримання альтернативного палива. Подаються дані щодо внеску найважливіших секторів у загальні викиди, а також окремих категорій відходів у загальні викиди різних забруднюючих речовин від спалювання. У праці детально розглядається процес спалювання твердих побутових відходів. Також подається інформація про досвід країн, які активно використовують таку технологію, серед яких зокрема – Китай, США, Японія, Італія, Великобританія, Канада, Австралія та Індія. Досліджується управління впливом на кліматичну нейтральність процесу перетворення відходів на енергію на прикладі спалювання на різних етапах. Зазначена важливість котлової системи для максимізації відновлення енергії та генерації електроенергії в процесі WtE. Дослідження засвідчують, що вагомий аспект поводження з ТПВ – це його вплив на навколишнє середовище, який є ключовим фактором під час вибору конкретного методу управління відходами. Установки з переробки відходів у енергію головним чином впливають на навколишнє середовище через забруднення повітря та утворення твердих відходів, тоді як забруднення води, зазвичай, має менші значення. Наголошено на важливості поєднання інноваційних технологій з екологічною відповідальністю, а також основними завданнями сучасного суспільства є розвиток альтернативних методів переробки відходів та пошук нових способів використання відновлюваних джерел енергії. Відповідно впровадження технологій WtE та розвиток ефективних методів переробки відходів – це важливі кроки на шляху забезпечення сталого розвитку та збереження довкілля, що вимагає об'єднання наукових досліджень із практичними заходами для зменшення негативного впливу та кліматичну нейтральність. *Ключові слова:* викиди парникових газів, кліматична нейтральність, процеси управління, перетворення відходів у енергію, термічна деструкція, спалювання, відходи.

Management of climate impact processes of waste-to-energy technologies using the example of thermal destruction. Markina L., Vlasenko O., Todchuk D., Kovtunov O., Onopchuk I.

The article examines the impact of municipal solid waste accumulation on the climate, as well as various technologies for its treatment, with waste-to-energy (WtE) technologies playing a key role. Among them, incineration is the most common treatment method. Incineration technology is widely used in most waste incineration plants. These technologies reduce the initial mass of municipal solid waste and produce heat and electricity on an industrial scale. Incineration is considered an effective way to manage waste and produce alternative fuels. The paper presents data on the contribution of the most important sectors to total emissions and the contribution of incineration of a number of waste categories to total emissions of various pollutants from waste incineration. The article discusses in detail the process of incineration of municipal solid waste. It also describes the experience of countries that are actively using this technology, including China, the USA, Japan, Italy, the UK, Canada, Australia and India. The article examines the management of the impact on climate neutrality of the waste-to-energy process on the example of incineration at different stages.

The importance of the boiler system to maximise energy recovery and electricity generation in the WtE process is noted. Studies show that an important aspect of MSW management is its environmental impact, which is a key factor in choosing a specific waste management method. Waste-to-energy facilities mainly impact the environment through air pollution and solid waste generation, while water pollution is generally of lesser importance. The importance of combining innovative technologies with environmental responsibility is noted, and the main tasks of modern society are the development of alternative methods of waste processing and the search for new ways to use renewable energy sources. Accordingly, the introduction of WtE technologies and the development of efficient waste treatment methods are important steps to ensure sustainable development and environmental protection, and this requires combining scientific research with practical measures to reduce the negative impact and climate neutrality. *Key words:* greenhouse gas emissions, climate neutrality, management processes, waste-to-energy conversion, thermal destruction, incineration, waste.

Вступ. Тверді побутові відходи (ТПВ) є побічним продуктом зростання населення, швидкої урбанізації та економічного розвитку. Якщо їх не утилізувати належним чином, вони можуть залишатися в навколишньому середовищі як небезпечні. У 1950-х роках відкриті звалища були найпоширенішим методом утилізації ТПВ. Метан – основний побічний продуктом, що утворюється на відкритих звалищах ТПВ. Ця унікальна вуглецевмісна сполука має потенціал глобального потепління, що у 28 разів перевищує потенціал CO_2 [12]. Його короткостроковий вплив на клімат досить значний і може тривати майже століття, створюючи загрозу для виживання як людей, так і інших організмів. Швидке зростання викидів ТПВ стимулює стрімкий розвиток технологій їхньої переробки [8]. Тому перед людством стоїть завдання ефективно видаляти ТПВ найбільш економічно та екологічно чистими способами.

Протягом останніх років світ стикається з серйозною проблемою зміни клімату. Щоб зменшити негативний вплив викидів парникових газів (ПГ), міжнародне співтовариство впроваджує різноманітні заходи для боротьби зі зміною клімату, такі як Паризька угода, досягнення вуглецевої нейтральності та концепція чистого нуля [3]. Однак, реакції на зміну клімату є складними та різноманітними, і існує розрив між теорією та практикою [21, 22, 23]. Вуглецева нейтральність передбачає компенсацію викидів парникових газів шляхом їх поглинання. Концепція чистого нуля полягає в зведенні викидів ПГ до мінімуму. Обидві стратегії спрямовані на скорочення викидів ПГ, але відрізняються підходами до реалізації.

У цьому контексті технологія перетворення відходів у енергію (WtE) стала важливою темою досліджень щодо переробки ТПВ. Технологія WtE дозволяє виробляти електроенергію та тепло з перероблених відходів і є однією з найбільш передових технологій для управління ТПВ у всьому світі, не лише відновлюючи парникові гази, але й використовуючи їх для задоволення енергетичних потреб [11]. Багато країн визнали ТПВ як стійке, стабільне та відновлюване джерело енергії.

Поточні дослідження технології WtE, зазвичай, розглядаються з однієї точки зору, одні присвячуються обліку викидів вуглецю або оцінці життєвого циклу (LCA) існуючих технологій WtE [7], інші – використовують інноваційні технології WtE, наприклад, переробку сільськогосподарських або харчових відходів для отримання цінних альтернативних джерел енергії та зменшення викидів вуглецю [6]. Також існують дослідження, що узагальнюють технології WtE та аналізують їхні переваги й недоліки [1]. Однак лише незначна кількість дослідників систематично аналізує технології WtE з глобальної точки зору.

Виклад основного матеріалу. Основними способами одержання енергії з відходів є термо-хіміч-

ний (спалювання, газифікація, піроліз) і біохімічний (аеробне зброджування). Останній доцільно застосовувати до матеріалів із високим вологовмістом, це можуть бути харчові та рослинні відходи.

Із твердих матеріалів, які на 70–80% складаються із компонентів, що горять, зокрема, таких як папір, деревина, пластик тощо, – можливе виробництво енергії термохімічним способом. Завдяки наявності вказаних компонентів тверде побутове паливо розглядається як низькосортне тверде паливо з утворенням теплоти при згоранні 5–6 МДж/кг.

Спалювання є найпоширенішим методом обробки побутових відходів. Технологія спалювання з використанням рухомих колосникових решіток широко застосовується на більшості сміттєспалювальних заводів. Також існує метод спалювання відходів у печах з псевдозрідженим (киплячим) шаром, який досить популярний в Японії. У Європі є лише два таких заводи – в Іспанії та Німеччині.

Інноваційні технології спалювання дозволяють зменшити початкову масу твердих побутових відходів у 3–4 рази і виробляти теплову та електричну енергію у промислових масштабах. Тому в країнах із дефіцитом власних паливних ресурсів спалювання сміття є ефективним способом поводження з відходами і отримання альтернативного палива.

Відходи спалюються на спеціально побудованих сміттєспалювальних заводах, щоб зменшити їх обсяг і масу без використання додаткового палива. Як наслідок, під час спалювання утворюється близько 25–30% від початкової маси відходів у вигляді шлаку і 3,5–4% золи, що також потребують безпечної утилізації через наявність небезпечних компонентів. Температура в печах сміттєспалювальних заводів коливається від 850 до 1450 °С. Для поліпшення процесу спалювання додається кисень.

Відходи, що підлягають спаленню, мають мати калорійність вище 7 МДж/кг. Проте калорійність несортованих побутових відходів часто є нижчою за 7 МДж/кг, зважаючи на високий вміст органічних відходів з великою вологістю та наявністю інертних фракцій [20]. Під час спалювання відходів утворюється теплова енергія, яку можна використовувати для виробництва електроенергії, обігріву будівель або постачання гарячої пари для промислових потреб.

З середини 1990-х років сектор спалювання небезпечних відходів відповідав суворим ПЗВ колишньої Директиви про спалювання відходів (Директива 2000/76/ЕС), яка пізніше була внесена до Директиви про промислові викиди (2010/75/EU) щодо промислових викидів та комплексне запобігання та контроль забруднення.

У 28 країнах ЄС зростає кількість і частка ТПВ (твердих побутових відходів) спалюється для виробництва енергії. Останні доступні дані Євростату засвідчують, що близько 70 мільйонів тонн ТПВ було спалено в 2017 році, що на 118% більше, ніж у 1995 році [14].

У дослідженні для Європейського Союзу щодо відповідального спалювання та обробки спеціальних відходів (EURITS) оцінено частку спалювання відходів у загальних викидах забруднюючих речовин для ЄС-27, Сполученого Королівства та Фландрії (Бельгія).

Таблиця 1 відображає два сектори, у яких найбільший внесок у загальні викиди NO_x, SO₂, твердих частинок, CO, важких металів, PCDD/Fs для ЄС-27, а також частка від спалювання відходів.

Підтверджено, що основними викидами забруднювачів є транспорт, електроенергія та тепло, промисловість і сільське господарство. Частка загального спалювання відходів у викидах забруднюючих речовин є дуже низькою (<1%) для NO_x, SO₂ і твердих частинок, низькою (2%) для CO та помірною (13% і 26%) для важких металів і PCDD/Fs відповідно.

У таблиці 2 детально змальовані різні типи спалювання відходів, та їх внесок у загальні викиди від спалювання відходів для розглянутих забруднюючих речовин для ЄС-27. Розглядаються такі підкатегорії спалювання відходів:

- Небезпечні промислові відходи;
- Інші промислові відходи: промислові відходи, крім небезпечних; відходи + клінічні відходи;
- ТПВ;

• Інше: дрібномасштабне спалювання побутових і приватних відходів і кремація (без найсучасніших систем очищення димових газів).

З таблиці 2 видно, що спалювання ТПВ, яке досить добре контролюється та регулюється (сучасні заводи WtE), є незначним джерелом у категорії спалювання відходів. Внесок у забруднення повітря підкатегорій окремих промислових та інших відходів (немасштабне спалювання відходів + кремація без найсучасніших систем очищення димових газів) є значно вищим. Отже, найбільше викидів створюється від неконтрольованого спалювання (спалювання на задньому дворі, невелике спалювання відходів виробництва на місці).

Щоб забезпечити своєчасне досягнення цілей вуглецевої нейтральності та підтримати розвиток відновлюваної енергії, більшість розвинених країн на сьогодні значну увагу приділяють технологіям WtE та їх оптимізації. У 2019 році Сполучені Штати виробили 7143 ГВт-год електроенергії за допомогою технології WtE для обробки ТПВ [14]. Окрім того, кілька міст у США запровадили ініціативи з нульового відходу, перенаправляючи всі відходи зі звалищ та сміттєспалювальних заводів на повторне використання і переробку. У 2015 році німецькі заводи з переробки відходів виробили 225 ПДж тепла та

Таблиця 1

Внесок найважливіших секторів у загальні викиди NO₂, SO₂, PM, CO, важких металів та PCDD/F для ЄС-27

Забруднююча речовина	Джерело викидів	% викидів
PCDD/NO ₂	Транспорт	58%
PCDD/NO ₂	Енергія та тепло	47%
SO ₂	Промисловість	36%
SO ₂	Житлово-комунальне спалювання	35%
Тверді частинки (PM)	Сільське господарство	24%
PM	Спалювання відходів	13%
CO	Житлово-комунальне спалювання	39%
CO	Спалювання відходів	36%
Важкі метали (HM)	Спалювання відходів	26%
HM	Промисловість	24%
PCDD/Fs	Спалювання відходів	26%
PCDD/Fs	Транспорт	37%

Таблиця 2

Внесок окремих категорій відходів у загальні викиди різних забруднюючих речовин від спалювання

	NO ₂ %	SO ₂ %	PM %	CO %	HM %	PCDD/Fs, %
Небезпечні промислові відходи	4.9	2.1	0.06	0.02	0.6	0.12
Інші промислові відходи	15.7	52.2	34.8	5.8	81.5	24.2
Муніципальні тверді відходи	5.6	4.9	0.06	0.14	6.4	0.1
Інші відходи	73.8	40.7	65.1	94.0	11.5	75.6

90 ПДж електроенергії, що становить приблизно 3,7% від загального споживання енергії в країні. Німеччина постійно вдосконалює технології та обладнання, застосовуючи передові методи очищення відпрацьованих газів для зменшення шкідливих викидів, таких як SO_2 , NO_x та інші гази, спрямовані на скорочення викидів вуглецю [5].

Уряд Китаю нещодавно оголосив про свої цілі досягти піку викидів вуглецю до 2030 року та досягти вуглецевої нейтральності до 2060 року [10]. Влада посилює свої зусилля в боротьбі зі зміною клімату, що призвело до уповільнення зростання викидів вуглецю; у Китаї – 510 заводів WtE. За останні тридцять років близько 79% японських ТПВ було спалено на сміттєспалювальних заводах, де їх використовували для виробництва електроенергії, що дозволило скоротити ТПВ на 49×10^4 т CO_2 -еквіваленту у 2013 році завдяки технології WtE. Дослідження підтвердили твердження, що у місті Кавасакі, Японія, заміна вугілля на ТПВ для виробництва електроенергії призвела до значного скорочення викидів приблизно на 23×10^4 т CO_2 -еквіваленту.

У 2012 році був введений в експлуатацію завод, вартістю 8,2 мільярда доларів США, побудований в Абу-Дабі. Оскільки вже є освоєні та перевірені технології спалювання, Абу-Дабі і Шарджа обрали новий напрямок для обробки відходів шляхом поєднання газифікації і піролізу.

У 2013 році в Неаполі (Італія), був побудований сміттєспалювальний завод, здатний переробляти 650 000 тонн / рік. У Швеції і Данії, зважаючи на холодний клімат, є низка ТЕЦ, зокрема, Aros, Vartan, Herning і т. д., які виробляють понад 100 кВт-год енергії. Німеччина і Швеція, які є передовиками технології WtE, також відомі тим, що імпортують дефіцитні відходи з сусідніх країн.

Установка з газифікації Energos (входить в ENER-G) в Манчестері (Великобританія) забезпечує економічну заміну технології спалювання значної кількості WtE. Він має виробничу потужність з пропускною спроможністю до 78 000 тонн / рік.

У Канаді найстаріші установки утилізації використовують технологію спалювання, вони були вдосконалені для використання плазмової газифікації від Plasma Energy Group і Nevitus Plasma Inc. Нещодавно зведені об'єкти, зокрема, Nexterra Systems Corp. і Enerkem, використовують конверсію газифікації.

В Австралії установка плазмової газифікації Phoenix Energy Australia Pty Ltd. знаходиться в початковій стадії введення в експлуатацію в Квінлане (Австралія).

В Індії з 14 введених в експлуатацію установок тільки 4 (Jindal Coproils Management Company PVT Ltd, Organic Waste Recycling Systems Pvt, Rochem and Shalivahana (MSW) Green Energy Ltd) працюють в різних штатах (в яких використовується технологія RDF або суха AD). Проте, технологія сухої AD зда-

ється більш ефективною, і ще 4 були введені в експлуатацію нещодавно з використанням сухої AD.

Розглянемо як відбувається управління впливом на навколишнє середовище процесу перетворення відходів на енергію на прикладі спалювання на різних етапах.

Процес починається з прийому та обробки твердих побутових відходів. Сучасні установки WtE оснащені автоматизованими системами прийому відходів, які забезпечують ефективне та контрольоване надходження матеріалів. Це гарантує, що в камеру згоряння потрапляють тільки придатні для переробки відходи, що оптимізує процес відновлення енергії.

Камера згоряння та решітки. Центральним і найважливішим елементом заводу WtE є камера згоряння, де відбувається спалювання відходів. Важливими компонентами камери є рухомі решітки або псевдозріжені шари. Вони забезпечують стабільну платформу для спалювання відходів та сприяють їх переміщенню в процесі горіння. Решітки розроблені для підвищення ефективності згоряння та запобігання утворенню шкідливих побічних продуктів.

Важливий аспект поводження з ТПВ – це його вплив на навколишнє середовище, який є ключовим фактором під час вибору конкретного методу управління відходами. Установки з утилізації відходів в енергію (WTE) головним чином впливають на навколишнє середовище забрудненням повітря та утворенням твердих відходів, а забруднення води, як правило, має менше значення.

Приблизно до 1975 року очищення димових газів на сміттєспалювальних установках було зосереджене здебільшого на ретельному видаленні пилу; було докладено мало зусиль для видалення токсичних газів. Поступово визнавався негативний вплив забруднення повітря, викликаний сміттєспалювальними печами. Наприкінці 1970-х років стало зрозуміло, що поліхлоровані дібензодіоксини та дібензофурані (PCDD/Fs), відомі як діоксини, викидалися зі застарілих сміттєспалювальних установок. Оскільки такі стійкі хлорорганічні сполуки становлять серйозний ризик для здоров'я людини, вони викликали значне занепокоєння серед екологів і, згодом, серед широкої громадськості.

Ці занепокоєння призвели до впровадження все більш суворих норм щодо викидів та їхнього контролю. Відтак сміттєспалювальні установки були оснащені високоєфективним сучасним обладнанням для очищення димових газів. На сьогодні цілком можливо побудувати та експлуатувати сучасний завод з утилізації відходів в енергію (WTE), що відповідає суворим екологічним вимогам.

Наступний етап стосується котлу і виробництва пари: Тепло, що утворюється під час спалювання відходів, використовується в котлі. Він перетворює теплову енергію згоряння на пару високого тиску,

яка приводить в дію турбіни, з'єднані з генераторами для виробництва електроенергії. Ефективність котлової системи є ключовою для максимізації відновлення енергії та генерації електрики в процесі WtE.

Системи очищення димових газів: Під час спалювання відходів утворюються димові гази, які містять забруднювачі та тверді частки. Основні забруднюючі речовини, що викидаються установкою WTE, це: HCl, SO₂, SO₃, NO та NO₂ (які є результатом окислення хлору, сірки та азоту у відходах), а також CO та органічні сполуки (загальний вміст органічного вуглецю), окрім того ПХДД/Ф, смола та сажа (як наслідок неповного згоряння).

Крім того, токсичні метали (ртуть, сурма, кадмій, хром, кобальт, миш'як, свинець, нікель, ванадій, мідь, марганець, селен) можуть міститися в димових газах у твердих частинках (зола-винесення) або в газовій фазі. Викиди залежать від складу відходів, конструкції та умов роботи камери згоряння та очищення димових газів. Щоб мінімізувати викиди, необхідні відповідні умови горіння та ретельне очищення димових газів.

У найсучасніших камерах згоряння/установках WTE концентрації (виражені в мг/Нм³) відповідних забруднюючих речовин у димовому газі значно нижчі за ліміти викидів, як відображено в таблиці 3 для камер згоряння печі з колосниковою решіткою Indaver, з трьома лініями колосникових печей у Доелі, Бельгія (одна лінія колосникових печей показана на рисунку 1).

Для кожного забруднювача в таблиці наведено концентрацію викидів (2014), ПЗВ (Директива 2000/76/ЄС) і викиди у відсотках від ПЗВ. Усі розглянуті викиди близькі до або (суттєво) нижче 20% ПЗВ, за винятком NO_x, який становить близько 70% ПЗВ. Такі значення є типовими для найсучасніших установок WTE, з викидами NO_x, як правило, набагато нижчими, ніж відображені в таблиці.

Діоксини – це загальна назва поліхлорованих дибензо-п-діоксинів та дибензофуранів (ПХДД/Ф), що характеризуються високою хімічною та метаболічною стійкістю, які вміщують загалом 210 сполук (конгенерів), 75 з яких – ПХДД і 135 – ПХДФ. Такі сполуки ніколи не вироблялися навмисно як товарні

Таблиця 3

Викиди колосникової печі Indaver, Doel, Бельгія за 2018 рік (Indaver, 2019a) та граничні значення викидів (Директива 2000/76/ЄС)

Забруднювач	Викиди (мг/нм ³)	Граничне значення мг/нм ³)	Викиди у% від граничного значення
Пил	1.0	10	10.0
CO	9.2	50	18
TOC	0.4	10	4.0
HCl	0.5	10	5.0
SO ₂	1.1	50	2.2
NO _x	142	200	71
Cd, Tl	<0.0085	0.05	<17
Hg	0.0005	0.05	1.0
Метали	0.08	0.5	16
Діоксини (TEQ/нм ³)	0.0075	0.1	7.5

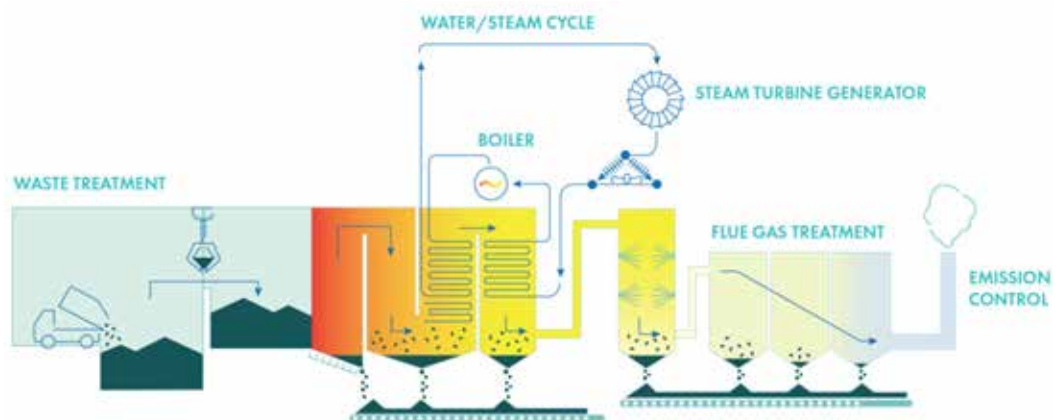


Рис. 1. Сучасна установка WtE

продукти, а утворюються під час промислових процесів та спалювання.

Важливі фізичні та хімічні властивості ПХДД/Ф :

1. Вони досить стійкі до (фото)хімічного та біологічного руйнування, тому є стійкими в навколишньому середовищі та належать до групи стійких органічних забруднювачів (СОЗ).

2. Розчинність у воді низька і зменшується зі ступенем хлорування, який коливається від 1 до 8.

3. Накопичуються в жировій тканині тварин, тому більш підвищені концентрації зустрічаються у видів, які знаходяться вище в харчовому ланцюгу (біомагніфікація).

4. Летючість низька і зменшується зі ступенем хлорування.

5. У навколишньому середовищі вони зустрічаються в повітрі, головним чином зв'язані з частинками (золи), а не в газовій фазі; у ґрунтових і поверхневих водах в основному зв'язані зваженими частинками, мулом і ґрунтом.

Зазвичай вважається, що ПХДД/Ф у вхідних відходах руйнуються під час згоряння, а нові ПХДД/Ф утворюються під час процесу охолодження димових газів. За останні 20 років багато досліджень було присвячено розкриттю механізмів утворення ПХДД/ПХДД/Ф на стадіях після згоряння в камерах спалювання відходів. Більшість досліджень здійснювалося в лабораторних установках. Було запропоновано три механізми їх утворення:

1) гомогенна (газ-газова фаза) конденсація молекул-попередників;

2) гетерогенна (газ-тверда фаза) конденсація молекул-попередників;

3) пряме утворення з вуглецю в частинках золи, що називається синтезом *de novo*.

Існує кілька методів запобігання або зменшення викидів ПХДД/Ф, зокрема:

- Утворенню можна запобігти шляхом видалення всіх відходів, що містять хлор, наприклад, полівінілхлорид, перед спалюванням. Однак, загалом, це не дуже ефективно, оскільки у відходах міститься багато джерел хлору.

- Час перебування за температури щонайменше 850°C має становити щонайменше 2 секунди, щоб забезпечити руйнування органічних сполук, включаючи PCDD/F, з відходів. Згодом димові гази слід швидко охолодити від 850°C до 200°C, щоб уникнути повторного утворення ПХДД/Ф.

- Під час очищення димових газів можна збирати ПХДД/Ф.

- На фільтрі при $T < 140$ °C.

- Шляхом введення активованого вугілля в димові гази для адсорбції ПХДД/Ф.

Не менш важливими є системи контролю впливу на повітря. Для підвищення екологічних характеристик заводи WtE використовують системи контролю впливу на повітря. Ці системи орієнтовані на конкретні забруднювачі – оксиди азоту (NOx) і діоксид

сірки (SO₂). Технології, зокрема селективне каталітичне відновлення (SCR) і мокрі скрубери, відіграють важливу роль у зменшенні впливу таких забруднювачів на якість повітря.

Утворення NOx під час спалюванні відходів відбувається через сполуки азоту, присутні у відходах. Стандарти викидів коливаються від 35 до 125 мг/Нм³ в Японії та 200 мг/Нм³ у більшості країн ЄС. З викидів, наведених у таблиці 3, видно, що NOx має найвищий відсоток ПЗВ серед усіх регульованих викидів у WTE.

Як зазначалось вище, NOx можна і потрібно видаляти з димових газів шляхом селективного каталітичного відновлення (SCR) або селективного некаталітичного відновлення (SNCR), щоб відповідати фактичному ПЗВ 200 мг/Нм. На початку 1990-х років для достатньої ефективності руйнування NOx була потрібна температура 300–400 °C, але лише через кілька років низькотемпературні каталізatori досягли 90% ефективності видалення тільки за 160 °C.

Нижчі температури зменшують втрати енергії під час повторного нагрівання димових газів; однак варто подбати про те, щоб солі аміаку не конденсувалися на каталізatori та не засмічували чи отруювали його. Заміна SNCR на SCR зазвичай знижує значення NOx зі 110 мг/Нм³ до 44 мг/Нм³. Поліпшення SNCR із меншим ковзанням NH₃ також можна досягти шляхом ретельної оптимізації SNCR.

Ван Канегем та інші дослідники порівнюють SCR і SNCR з точки зору інтегрованого запобігання та контролю забруднення, оцінюючи загальний вплив на навколишнє середовище в різних категоріях впливу [11]. Вихідними положеннями дослідження були:

- Ефективність зменшення викидів NOx за допомогою SCR, до 90% у хвостовій конфігурації, перевищує ефективність SNCR, зазвичай, становить 50% [12].

- Виробництво, будівництво та експлуатація установок SCR також спричиняє непрямі (тобто не в процесі згоряння, а на інших етапах життєвого циклу) викиди забруднюючих речовин та споживання ресурсів.

Висновок полягав у тому, що заміна SNCR на SCR у хвостовій частині зменшує прямий вплив камери згоряння на навколишнє середовище, тобто вплив на навколишнє середовище NOx, що викидається в трубу в категоріях впливу підкислення, евтрофікації та утворення фотоокислювачів, як очікується від нижчі викиди NOx у випадку SCR. Однак SCR передбачає більші непрямі впливи (тобто пов'язані з виробництвом та роботою каталітичної установки), ніж SNCR у всіх категоріях впливу, головним чином, як необхідність повторного нагріву газу, що випалює.

Окрім виробництва електроенергії, установок WtE часто мають системи рекуперації тепла для

максимального використання енергії. Такі системи відловлюють надлишкове тепло від процесу згоряння та використовують його для централізованого опалення, забезпечуючи додаткові енергетичні вигоди для місцевих громад. Системи комбінованого виробництва тепла та електроенергії, або когенераційні системи, демонструють синергію між спалюванням відходів та сталим централізованим теплопостачанням.

Після згоряння залишаються зола та негорючі матеріали, які проходять подальшу обробку. Сучасні системи обробки відходів відсортовують чорні та кольорові метали та мінерали для вторинної переробки, забезпечуючи відновлення цінних матеріалів із потоку відходів. Окрім того, нові технології очищення залишків димових газів можуть стати джерелом циркулярної сировини. Зола, що залишається, часто переробляється для безпечної утилізації або корисного використання, замикаючи цикл утилізації відходів.

Висновки. Технології використання енергії з відходів (WtE) відіграють важливу роль у досягненні цілей вуглецевої нейтральності та розвитку відновлюваної енергії. Вони дозволяють ефективно використовувати відходи для виробництва електро-

енергії та тепла, сприяючи зменшенню викидів парникових газів.

Сучасні сміттєспалювальні установки оснащені високоєфективним обладнанням для очищення димових газів, що дозволяє знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Важливою є ефективність котлової системи для максимізації відновлення енергії та генерації електроенергії в процесі WtE.

Дослідження засвідчують, що спалювання відходів може бути ефективним методом переробки відходів і отримання альтернативного палива. Проте необхідно враховувати комплексність управління викидами та утилізації шлаку та золи для забезпечення безпечної обробки відходів.

Для забезпечення сталого розвитку та збереження навколишнього середовища важливо поєднувати технологічні інновації з екологічною відповідальністю. Розвиток альтернативних методів утилізації відходів та пошук нових шляхів використання відновлюваних джерел енергії є ключовими завданнями для сучасного суспільства.

Отже, впровадження технологій WtE та розвиток ефективних методів утилізації відходів є важливими напрямками на шляху забезпечення сталого розвитку та збереження чистого довкілля України.

Література

1. Dastjerdi, B. et al. A systematic review on life cycle assessment of different waste-to-energy valorization technologies. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 290, Article 125932.
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj> (дата звернення: 01.06.2024).
3. Drooge, S. The Paris Agreement 2015: turning point for the international climate regime. 2016.
4. How our trash contributes to climate change Clean Air Task Force. 2022. URL: <https://www.catf.us/2022/09/how-our-trash-contributes-to-climate-change/> (дата звернення: 01.06.2024).
5. IEA, Energy Statistics Data Browser. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>. IEA, Paris, 2022.
6. Istrate, I. R., et al. Review of life-cycle environmental consequences of waste-to-energy solutions on the municipal solid waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 157, 14.
7. Jia, Z., & Lin, B. How to achieve the first step of the carbon-neutrality 2060 target in China: the coal substitution perspective. *Energy*, 2021, 233, Article 121179.
8. Makarichi, L., et al. The evolution of waste-to-energy incineration: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91, 812–821.
9. Malav, L. C., et al. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: current practices, challenges, and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 277.
10. Mühle S., et al. Comparison of carbon emissions associated with municipal solid waste management in Germany and the UK. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2010, 54, pp. 793–801.
11. Mukherjee, C., et al. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 119, 17.
12. Pachauri R.K., et al., Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2015
13. Potential benefits and drawbacks of waste-to-energy conversion: a reflection on the environmental impact, economic viability, and social implications ResearchGate. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/376812042_POTENTIAL_BENEFITS_AND_DRAWBACKS_OF_WASTE-TO-ENERGY_CONVERSION_A_REFLECTION_ON_THE_ENVIRONMENTAL_IMPACT_ECONOMIC_VIABILITY_AND_SOCIAL_IMPLICATIONS (дата звернення: 25.05.2024).
14. The impact of Waste-to-Energy incineration on Climate policy briefing. Zero Waste Europe. URL: https://zerowasteurope.eu/wp-content/uploads/edd/2019/09/ZWE_Policy-briefing_The-impact-of-Waste-to-Energy-incineration-on-Climate.pdf (дата звернення: 01.05.2024).
15. The potential contribution of waste management to a low carbon economy Zero Waste Europe. 2020. URL: <https://zerowasteurope.eu/library/the-potential-contribution-of-waste-management-to-a-low-carbon-economy/> (дата звернення: 01.05.2024).

16. Van Caneghem, J., De Greef, J., Block, C., Van de castele, C. NO_x reduction in waste incinerators by selective catalytic reduction (SCR) instead of selective non-catalytic reduction (SNCR) compared from a life cycle perspective: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112, 4452–4460.
17. Van de castele, C., Wauters, G., Arickx, S., Jaspers, M., Van Gerven, T., Integrated municipal solid waste treatment using a grate furnace incinerator: The Indaver case. *Waste Management*, 2007, 27, 1366–1375.
18. Villani, K., De Greef, J., Goethals, J., Montauban, I., Van Langenhove, H., Exploring the performance limits of non-catalytic de-NO_x in waste-to-energy plants. In *Proceedings Venice 2012, 4th International Symposium on Energy from Biomass and Waste*. 2012, CISA Publisher, Italy.
19. Waste-to-energy technologies: Impact on environment (A. Tabasová, J. Kropáč, V. Kermes, A. Nemet, P. Stehlík, *Energy*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544212000199> (дата звернення: 25.05.2024).
20. Маркіна Л.М., Власенко О.В., Ковтунов О.В. Визначення характеристик відходів для використання їх як сировини для отримання енергії. *Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. К. : Видавничий дім «Гельветика», 2023. № 5(50). 214 с. С. 179–187. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.26>*
21. Ritchie H., Roser M., Rosado P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. 2020. URL: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> (дата звернення: 03.05.2024).
22. United Nations: Climate Action. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition> (дата звернення: 03.05.2024).
23. ClimateActionTracker, CountryAssessments. December 2021. URL: <https://climateactiontracker.org/countries/ukraine/2021-12-13/> (дата звернення: 01.05.2024).