

Б. В. Коріненко<sup>1</sup>  
О. С. Худоярова<sup>2</sup>  
К. Ю. Гура<sup>1</sup>  
А. П. Ранський<sup>1</sup>

## ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА ТА ТЕРМОХІМІЧНА КОНВЕРСІЯ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського

*В рамках циркулярної та класичної лінійної економіки розглянуто основні термохімічні методи переробки твердих побутових відходів (ТПВ). Проаналізовано переваги та недоліки кожного з методів, перспективність їх промислового використання, а також наявність світових лідерів як з розробки технологій переробки промислових та побутових відходів, так і з виробництва необхідного промислового обладнання. Показано, що індустрія переробки відходів в енергію (ПВЕ), тобто спалювання відходів, не відповідає критеріям безпеки для здоров'я людей та навколишнього середовища, що були задекларовані Комітетом з інноваційної діяльності, конкурентоспроможності і державно-приватного партнерства Економічної і Соціальної Ради ООН у надрукованих «Керуючих принципах заохочення проектів державно-приватного партнерства на благо людей в галузі перетворення відходів в енергію в інтересах розвитку економіки замкненого циклу». Показана можливість та ефективність використання газифікації відходів з використанням сучасних плазмових технологій а також використання низькотемпературного (350...490 °С) піролізу. Встановлено, що високотехнологічний метод газифікації відходів є найперспективнішим, адже дозволяє в рамках циркулярної економіки використовувати синтез-газ для отримання синтетичних бензину та олів, а також як вихідну сировину в органічному синтезі. Акцентується увага на декарбонізації переробки органічних відходів в рамках циркулярної економіки а також на необхідності в перехідний період нового енергетичного устрою інтеграції, а не сегрегації існуючих технологій, як на технічному, так і на комерційному рівнях. Показано, що декарбонізація переробки органічних відходів в рамках циркулярної економіки пов'язана в першу чергу зі скороченням об'ємів їх спалювання та переробки іншими технологічними методами.*

**Ключові слова:** циркулярна економіка, термохімічна конверсія, спалювання, газифікація, плазма, піроліз, декарбонізація, відходи, екологія

### Вступ

Циркулярну економіку розглядають як нову економічну модель сучасного розвитку промисловості, яку в першу чергу пов'язують з ресурсними обмеженнями та негативним впливом виробництва на довкілля [1], [2]. Однак, у такому контексті відсутня об'єктивна інформація щодо сучасних науково-технічних аспектів розвитку традиційних ресурсо- та енергозберіжних технологій, а також розвитку нових відновлювальних джерел енергії. Відсутній також належний порівняльний аналіз рівня розвитку традиційних енерго- та енергозберіжних технологій та сучасних технологій відновлювальних джерел енергії, а також існуючих уже принципів стрімкого розвитку «чистих» технологій карбонізації твердих органічних відходів та біомаси, твердих промислових та побутових відходів, впровадження високотехнологічного обладнання, машин і механізмів з обробки, утилізації, переробки та знешкодження переробки відходів та вторинної промислової сировини [3]—[5].

Між тим, в листопаді 2020 року Комітет з інноваційної діяльності, конкурентоспроможності і державно-приватного партнерства Європейської економічної комісії Економічної і Соціальної Ради при ООН (ЄСР ООН) надрукував «Керуючі принципи заохочення проектів державно-приватного

партнерства на благо людей в галузі перетворення відходів в енергію, в інтересах розвитку економіки замкненого циклу» (далі КПЗП) [6]. Головний зміст надрукованих КПЗП полягає в такому:

- індустрія переробки відходів в енергію (ПВЕ), іншими словами індустрія спалювання, є пріоритетною альтернативою переробці або захороненню та складуванню твердих побутових відходів (ТПВ) на полігонах;

- Комітет з інноваційної діяльності, конкурентоспроможності і державно-приватного партнерства (ЄСР ООН) заохочує державно-приватних підприємців не займатись першочерговою розробкою та впровадженням нових технологій з переробки ТПВ, а віддати це переважно на відкуп сміттєспалювальної промисловості;

- спалювання ТПВ є частиною економіки замкненого циклу, яке дозволяє економити енергію, матеріальні ресурси та зменшувати екологічне навантаження на навколишнє середовище.

При цьому автори КПЗП аргументують свою позицію тим, що на сьогодні населення Землі складає 7,5 млрд осіб і збільшується кожного року на 80 млн [7]; використання енергії в 2018 році склало 14 282 млн т нафтового еквіваленту (млн ТНЕ), тоді як в 1971 році ця цифра складала лише 5 519 млн т (млн ТНЕ) [8], що в свою чергу відповідає об'ємам викиду в еквіваленті на  $\text{CO}_2$  36,6 млрд т в 2018 році та, відповідно, 15,4 млрд т  $\text{CO}_2$  в 1971 році [9]. Крім того, автори КПЗП констатують, що щорічні об'єми твердих побутових/муніципальних відходів складають біля 2,01 млрд т і їх очікувана цифра збільшиться до 2,2 млрд т в 2025 році та досягне 3,4 млрд т в 2050 році [10]. Дійсно, наведені авторами КПЗП цифри свідчать про те, що переробка ТПВ є гострою та нагальною проблемою людства, однак відношення до зазначеної величезної кількості відходів у світі в рамках циркулярної економіки повинно бути виваженим і керуватись не кон'юктурою ринку, а найефективнішими науково-технічними та технологічними досягненнями людства в цій важливій промисловій галузі. Альтернативою ПВЕ [6] повинна стати економіка замкнених циклів (циркулярна економіка), яка включає замкнені технології переробки відходів/вторинної сировини, подібно до природних замкнених циклів, наприклад, кругообігу води в світі. Очевидно, що циклічність перетворення величезної кількості видозмінених людиною природних ресурсів в іншу екологічно безпечну або затребувану форму, з огляду на їх масштабність, повинна відповідати наявним циклічним природним явищам і процесам. Тобто, в рамках циркулярної економіки різні за своєю природою відходи необхідно переробляти/використовувати як цінну вторинну сировину.

Необхідно зазначити, що на сьогодні відсутнє однозначне розуміння терміну «циркулярна економіка». Наприклад, терміни «економіка замкнених циклів», «циклічна економіка», «безвідходна економіка», «зелена економіка» використовують як синоніми зазначеної раніше нової економічної моделі. Так, експерти ООН з охорони навколишнього середовища (UNEP) використовують термін «циркулярна економіка»/«зелена економіка» в широкому сенсі, розглядаючи її як економічну діяльність, яка покращує добробут людей, забезпечує соціальну справедливість і суттєво знижує екологічні ризики та виснаження природи. У вузькому сенсі — це розробка, виробництво і експлуатація нових ресурсо- та енергозберігаючих технологій, а також відновлювальних джерел енергії, які забезпечують стале економічне зростання [11]. Сьогодні традиційний шлях розвитку енергетичної галузі шляхом нарощування потужностей, розширення кількісного складу енергетичного обладнання і збільшення добування природних ресурсів (нафта, газ, вугілля) поступається інтенсивному, інноваційному та проривному напрямку розвитку шляхом активного впровадження енергоефективного обладнання, передових енергетичних і інформаційно-комунікаційних технологій, відновлювальних джерел енергії, комплексних систем і сервісів інтелектуальної енергетики, побудованих на відкритій мережній архітектурі, що означає початок переходу до наступного енергетичного устрою [12]. Необхідно зазначити, що основним драйвером на перехідному етапі до нового енергетичного устрою стає не стільки економічна привабливість нових джерел енергії, скільки якісно новий їх фактор — декарбонізація і боротьба з глобальною зміною клімату.

*Метою роботи* є визначення ефективності основних термохімічних методів конверсії твердих відходів в рамках циркулярної економіки.

Для досягнення поставленої мети розв'язувались такі задачі:

- встановлення особливостей спалювання, газифікації, низькотемпературної плазми та низькотемпературного піролізу при спалюванні/переробці твердих відходів;

- проведення всебічного аналізу та визначення переваг і недоліків основних термохімічних методів переробки твердих відходів;

- встановлення інтегрального зв'язку впливу різних факторів на ефективність переробки твердих побутових відходів термохімічними методами.

### Результати дослідження

В рамках циркулярної економіки повторне використання і утилізацію вторинних енергоресурсів/твердих відходів необхідно розглядати, виходячи з основних положень концепції «3R»: reduce (скорочення), reuse (повторне використання), recycle (переробка) [13]. В рамках цієї концепції стосовно до декарбонізації термохімічна конверсія вторинних енергоресурсів в сегменті скорочення (reduce) відноситься в своїй більшості до скорочення їх спалювання, що автоматично передбачає скорочення викидів CO<sub>2</sub>. Технологій, у яких поєднується декілька підходів, наприклад, повторне використання (reuse) і переробка (recycle) дуже мало [14], [15]. Подібні технології, де присутні всі елементи «3R», розробляються у суміжних галузях, таких як хімічна промисловість, виробництво синтетичного та відновлювального палива (біогаз, біодизель), машинобудування, будівництво та інші промислові галузі. На наш погляд, в перехідний період до нового енергетичного устрою важливим є інтеграція, а не сегрегація традиційної і відновлювальної енергетики, як на технічному, так і на комерційному рівнях. Основні технології такої інтеграції в процесі переробки твердих відходів показані на рис. 1. Так, для наведених на рис. 1 технологій термохімічної конверсії є характерними високі температури і швидкості перебігу процесів (за винятком піролізу), низька селективність і низька чутливість до складу вихідної сировини. Наприклад, крім твердих промислових і побутових відходів можна переробляти біовідходи: деревину, органічні відходи агропромислового комплексу, побутові та промислові харчові відходи, торф, відходи целюлозно-паперового виробництва.

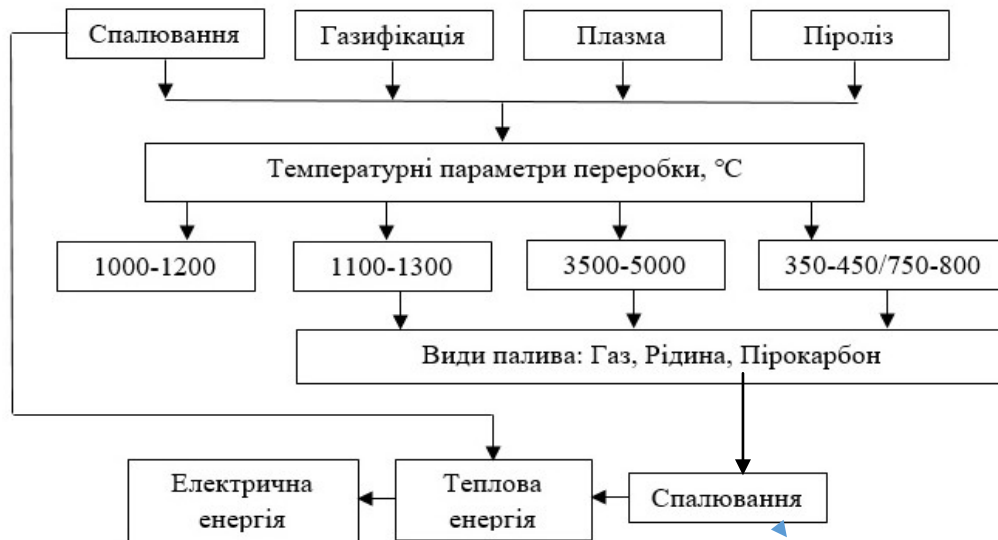


Рис. 1. Основні напрямки термохімічної конверсії твердих промислових і побутових відходів

При цьому необхідно зазначити, що спалювання з метою зменшення об'ємів відходів та утилізації тепла або часткового перетворення її в електричну енергію (рис. 1) не дозволяє утворювати замкнені промислові цикли і лише опосередковано має елементи циркулярної економіки. Цей висновок підтверджується і зіставленням класичних моделей лінійної та циркулярної економіки. Сучасна лінійна економіка включає такий ряд технологічних перетворень: корисні копаліни/*сировина* → вироблена *продукція*/енергія → промислові *відходи* → переробка, захоронення/*спалювання* відходів. Наведена модель розвитку сучасної світової економіки передбачає лише зменшення об'ємів промислових/енергетичних відходів за рахунок часткової їх переробки або спалювання і не вирішує глобальної проблеми їх накопичення в навколишньому середовищі. Це є суттєвим недоліком такої моделі розвитку суспільства, адже при цьому не вирішується найважливіша проблема сьогодення — скорочення використання природних та енергетичних ресурсів. На рис. 2 показана схема технологій переробки відходів полімерної промисловості, яка включає первинну (1), вторинну/механічну (2) і третинну/хімічну (3) переробку полімерних відходів в рамках циклічної економіки, їх захоронення на полігонах (4) та спалювання (5) в рамках лінійної економіки.

Тобто, можна констатувати, що технології переробки відходів в енергію (ПВЕ)/waster-to-energy (WTE), не мають нічого спільного з циклічними технологіями переробки відходів в рамках циркулярної економіки (рис. 2). Особливо наглядний в цьому контексті є процес хімічної переробки полімерних відходів, що наведений на прикладі поліетилентерефталату (ПЕТФ) (рис. 3).

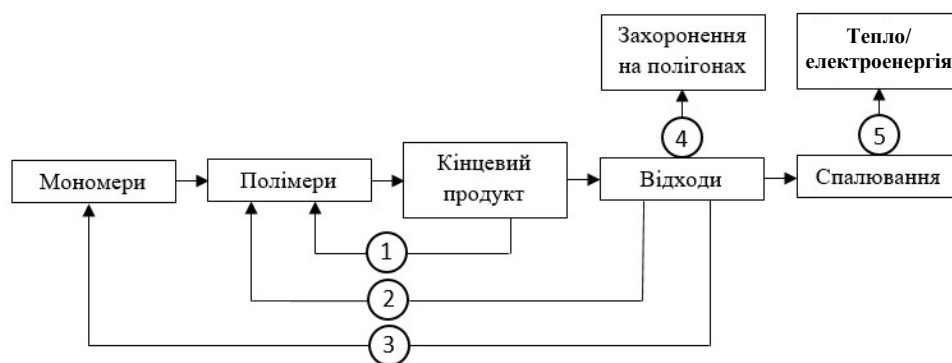


Рис. 2. Схема переробки відходів полімерної промисловості [16]

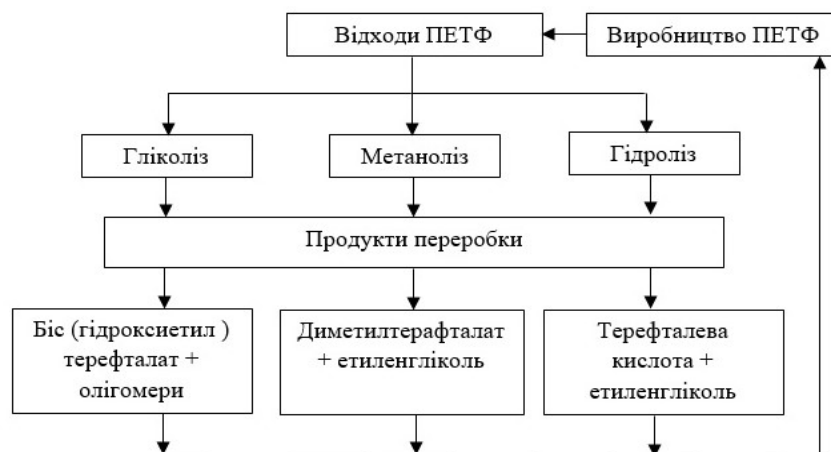
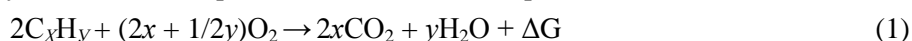


Рис. 3. Хімічна переробка відходів ПЕТФ в рамках циркулярної економіки [16]

При цьому різними хімічними методами можна переробити відходи ПЕТФ до початкових мономерів з подальшим їх використанням у повторному синтезі ПЕТФ (рис. 2). Тобто, однозначно зрозуміло, що спалювати полімерні відходи/ПЕТФ економічно не доцільно.

### Спалювання

*Спалювання* — контрольований процес окиснення твердих, пастоподібних або рідких органічних горючих відходів, який супроводжується виділенням значної кількості теплової енергії. Для найпростіших органічних вуглеводнів цей процес має таке нагальне рівняння:



В процесі горіння утворюється велика кількість вуглекислого/парникового газу  $CO_2$ , пари води та зола, як продукт неповного окиснення карбону. Сірка і азот, що входять до складу відходів, утворюють відповідні оксиди  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $NO_x$ , а хлор відновлюється до  $HCl$ . Крім газоподібних відходів під час згорання відходів утворюються і тверді частинки — метали, скло, шлаки тощо, які потребують подальшої утилізації або захоронення на полігонах. Дрібнодисперсні частинки оксидів та карбонатів металів, разом з токсичними  $Pb$ ,  $Cd$ ,  $Hg$ ,  $Zn$  тощо, що утворюються під час згорання та входять до складу топкових газів, уловлюються у «мокрих» скруберах або барботажних апаратах [17], [18]. Необхідно зазначити, що сучасний розвиток науки і техніки в процесі термічного знешкодження відходів забезпечує практично повне їх руйнування зі знешкодженням в зоні реакції, що досягається за допомогою високих температур (табл. 1, 1500...4000 °C). Навіть високотоксичні органічні сполуки з класу діоксинів і фуранів, перебуваючи в такій температурній зоні більше 2-х секунд, руйнуються більше ніж на 90 %. Однак, будь-який термічний процес при охолодженні/гартуванні димових газів супроводжується рекомбінацією утворених радикалів з утворенням первинних діоксинів і фуранів [19]. Такі зворотні перетворення мають місце в температурному інтервалі 350...560 °C [20]. Для очищення таких димових газів використовують рукавні фільтри спеціального призначення [21], які включають тріступеневу систему очищення. Перший ступінь передбачає очищення димових газів від кислих компонентів в абсорберах, нейтралізацією

їх вапном в присутності дрібнодисперсних водяних крапель. На другому ступені в рукавному фільтрі відбувається глибоке очищення газів від летючої золи, а також від важких металів і діоксинів під час їх послідовного проходження через вапно, активоване вугілля та фільтрувальну тканину. На третьому ступені відбувається відновлення оксидів азоту, присутніх в димових газах, до молекулярного азоту з використанням аміачної води. При цьому важкі метали, які після спалювання відходів зберігають свою високу токсичність і не знешкоджуються в багатоступеневій установці з очищення димових газів під час переробки залишків спалювання, повинні виділятися у концентрованій формі і окремо ізолюватися екологічно безпечними методами. Як зазначено вище, очищення димових газів сміттєспалювальних заводів є першочерговою задачею екологічно безпечної їх роботи. В технічному аспекті процес спалювання твердих відходів з дотриманням відповідних екологічних норм по твердих і газоподібних продуктах згоряння характеризується високою надійністю. Важливим при цьому є лише вибір технології, яка б забезпечувала максимальну теплотворну спроможність відходів в процесі їх згоряння. Так, в пошаровій топці можливе спалювання не-підготовлених ТПВ в широкому температурному діапазоні [22]. При цьому, найвідомішими є такі три принципові варіанти конструктивного рішення системи топка-решітка:

- фірми «Dentshe Babcock Aulagen GMSVi» з прямою тепловою подачею газів, що є найпридатнішим для спалювання сухих відходів з високою теплотворною здатністю 2800...3000 ккал/кг;
- фірми «Martin GMBH» зі зворотним по відношенню до матеріалу, що переміщується, газовим потоком, який використовується для спалювання вологих відходів з низькою температурною здатністю близько 1700 ккал/кг;
- фірми «Steinmuller» з середнім потоком газів, що використовується для спалювання відходів змінного складу і вологості.

Відмічені технології використовуються для спалювання великих об'ємів ТПВ на сміттєспалювальних заводах мегаполісів, однак не дивлячись на явні переваги цього методу, пов'язані, насамперед, зі зменшенням об'ємів відходів та можливістю утилізації теплової енергії, він має і свої суттєві недоліки, зазначені в табл. 1.

Таблиця 1

Переваги та недоліки технології спалювання ТПВ

№ з/п	Переваги	№ з/п	Недоліки
1	Процес універсальний проходить в автоматичному режимі, невибагливий до складу та вологості відходів	1	Індустрія ПВЕ/індустрія спалювання відходів пов'язана із викидами в атмосферу величезної кількості токсичних речовин і парникового газу CO <sub>2</sub> , що складає реальну екологічну загрозу зміни клімату Землі
2	Використовується для переробки великих об'ємів відходів мегаполісів проживання людей	2	Існує реальна потенційна загроза здоров'ю людей (онкологічні та інші захворювання) та забрудненню довкілля (повітря, вода, ґрунти) високотоксичними хімічними речовинами, канцерогенами/продуктами термічної переробки при недотриманні відповідних екологічних норм по твердим і газоподібним продуктам згоряння відходів
3	Утилізується тепла енергія, що виділяється, також можлива її трансформація в електричну енергію	3	Високі матеріальні та фінансові витрати на будівництво та експлуатацію сміттєспалювальних заводів з дотриманням екологічних норм по твердих і газоподібних продуктах згоряння
4	Відпрацьована загальна технологія спалювання відходів, наявне універсальне технічне обладнання та підготовлений інженерний склад для виконання процесу	4	Індустрія ПВЕ виступає серйозним бар'єром на шляху розробки нових безвідходних технологій переробки відходів в рамках нової економіки замкнених циклів
		5	Логістичні обмеження, пов'язані з обмеженими можливостями їх територіального розміщення лише в мегаполісах проживання людей та економічною недоцільністю у випадку переробки ТПВ середніх міст та селищ
		6	Небажання населення мати на своїх територіях сміттєспалювальні заводи, пов'язане з обґрунтованим занепокоєнням щодо шкідливого впливу викидів цих об'єктів на здоров'я людей
		7	Знижує зацікавленість громад невеликих міст та селищ в ретельному сортуванні ТПВ, та зменшенні їх об'ємів з метою не спалювання, а повторного їх використання та переробки

## Газифікація

*Газифікація* — це високотемпературний термохімічний процес взаємодії органічних відходів, разом і з відходами деревообробної промисловості [23], з газифікуючими агентами (кисень/повітря, водяна пара, вуглекислий газ або їх суміші) за температури 1100...1300 °С з отриманням генераторного/синтез-газу (CO + H<sub>2</sub>) [24]. Склад і кількість продуктів термічної газифікації органічних відходів залежить від їх органічної природи (пластмаса, органічні синтетичні та натуральні відходи, деревина, тощо), температури, довготривалості та відповідного апаратного оформлення процесу. Хімізм та механізм процесу досконально не вивчений, однак з наявного фактичного матеріалу можна виділити головні стадії процесу, подані у табл. 2.

Таблиця 2

Стадії газифікації ТБО

№ з/п	Стадія процесу	Температура, °С	Продукти процесу
1	висушування	120...150	пара води
2	початок розкладання	250...275	CO, CO <sub>2</sub> , вуглеводні
3	розкладання органічних речовин, що утворилися	275...450	CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CH <sub>3</sub> OH, вуглеводні
4	прожарювання карбону та вилучення легких речовин/карбонізація	450...550	парогазова суміш: (CO + CO <sub>2</sub> + CH <sub>3</sub> OH, вуглеводні) + C/карбон
5	неповне та повне згоряння/конверсія	1100...1300	CO + H <sub>2</sub>
6	зона відновлення	~ 800	CO + H <sub>2</sub>

Необхідно зазначити, що процес газифікації потребує постійного нагрівання та чіткого підтримання температурного діапазону на кожній стадії процесу. В іншому випадку процес буде нестабільним. Початок розкладання органічних відходів без доступу кисню повітря в температурному інтервалі 250...275 та 275...450 °С супроводжується утворенням оксидів CO, CO<sub>2</sub> та органічних речовин з малою молекулярною масою — CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, інші вуглеводні. В процесі карбонізації продуктів розкладу в температурному інтервалі 450...550 °С відбувається відділення легких органічних та неорганічних речовин від карбону. Неповне та повне згоряння карбону в температурному інтервалі 1100...1300 °С наведено реакціями



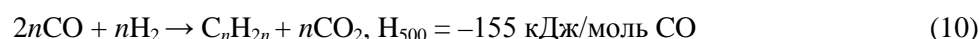
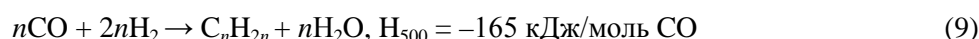
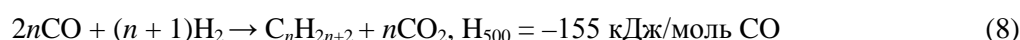
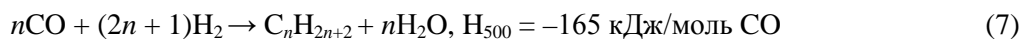
а головні реакції відновлення за температури ~ 800 °С з утворенням кінцевого синтез-газу рівняннями



Підсумувавши рівняння (2)—(5), отримуємо загальне рівняння газифікації ТБО, що відбувається за стехіометричної недостачі окисника/O<sub>2</sub>:



Крім синтез-газу, який утворюється за реакціями (2)—(6) у разі газифікації відбуваються реакції утворення парафінових (7)—(8) та олефінових (9)—(10) вуглеводнів [25]:



Розгонка утвореної суміші алкан-алкенових вуглеводнів дозволяє отримувати в невеликих об'ємах рідке синтетичне паливо для двигунів внутрішнього згорання.

Наведені реакції (2)—(10) вказують на те, що газифікація є технологічнішим методом переробки ТПВ, у порівнянні з найпоширенішим у світі методом їх спалювання у сміттєспалювальних печах. Утворені при цьому продукти термохімічної конверсії використовуються в хімічній технології [26]:

– синтез-газ (CO + H<sub>2</sub>) за реакцією Фішера-Тропша для виробництва вуглеводнів бензинового ряду [27];

– синтез-газ за реакцією Фішера-Тропша для виробництва базових олив на основі технології GTL [28].

Крім того, хімічні продукти газифікації ТПВ використовують безпосередньо для отримання теплової або електричної енергії на промислових газогенераторних міні-ТЕС, що об'єднані в єдиний енергетичний блок: паровий котел + газотурбінна установка.

Таким чином, газифікація серед сучасних технологій термічної конверсії ТПВ має найвищий ступінь полігенеративності. Сама установка включає вузол підготовки сировини, установку розділення повітря у випадку використання кисню як газифікуючого агента, газифікатор та комплексну установку очищення синтез-газу від побічних продуктів реакцій термолізу. Необхідно зазначити, що метод газифікації ТПВ успішно може застосовуватись в невеликих селищах і містах. При цьому використовується технологія пакетного окиснення, що розроблена компанією Waste to Energy Canada Inc/ (WTEC) [29]. Вагомим позитивом зазначеної технології є можливість переробки ТПВ без їх сортування та попередньої підготовки в не упакованому або упакованому стані на мобільних пересувних установках. Крім цього, необхідно відмітити компанії Nippon Steel, Thermoselect, Alstrom/Ebara, Entech, які активно використовують технології газифікації ТПВ з нерухомим або киплячим шаром. Технології газифікації ТПВ мають, як переваги, так і недоліки, що зведені у табл. 3.

Таблиця 3

Переваги та недоліки технології газифікації ТПВ

№ з/п	Переваги	№ з/п	Недоліки
1	Високотехнологічний метод переробки ТПВ, який в рамках циклічної економіки дозволяє отримати синтез-газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), а також широкий спектр побічних продуктів реакції	1	Необхідність у сортуванні та попередній підготовці сировини/відходів для отримання якісного складу продуктів газифікації
2	Використання отриманого газу для виробництва теплової або електричної енергії	2	Додаткове очищення синтез-газу у разі його використання у реакціях Фішера-Тропша
3	Отримання за реакцією Фішера-Тропша синтетичного пального для ДВЗ або базових олив на основі технологій GTL	3	Використання для утилізації високотоксичних речовин (Японія) рукавних фільтрів для додаткового очищення газоподібних продуктів процесу
4	Переробка відходів з використанням механізованих та автоматизованих систем контролю і виробництва на всіх стадіях технологічного процесу	4	Недостатнє дослідження окремих головних стадій газифікації відходів та екологічно чистого спалювання низькотемпературного вологого засмоленого газу
5	Використання в процесі газифікації відходів дешевих газифікувальних агентів (повітря; повітря + водяна пара; $\text{O}_2$ + водяна пара)	5	Суттєво менша потужність установок з переробки відходів у порівнянні зі сміттєспалювальними заводами
6	Використання технології переробки відходів у невеликих селищах та містах		
7	Переробка медичних відходів, відходів біомаси, полімерів, що використовуються для виготовлення автомобільних шин		

### Плазмові технології

Плазмові технології переробки відходів відносяться до їх термохімічної конверсії, зазвичай це анаеробний процес за температур 1500...1700 °C [30]. Тобто, цей метод низькотемпературної плазми (дугової або високочастотної) використовується, в основному, для отримання продуктів газифікації відходів. Звісно, з технічної точки зору витримувати температуру 3500...5000 °C (рис. 1) в енергетичній зоні плазмотрону для газифікації відходів немає ніякого сенсу. Крім того, температурний інтервал у використанні терміну «плазмові технології» має досить умовне значення. Очевидно, в цьому випадку йдеться про температурний інтервал деструкції/конверсії відходів та утворення плазмогенерованої газової суміші. Адже перебування відходів (простих або складних хімічних речовин) в зоні плазми передбачає глибше їх перетворення з утворенням іонізованого газу (електронів, вільних катіонів і аніонів з сумарним нульовим зарядом), що свідчить про майже повну відсутність серйозних наукових досліджень у цій галузі. Однак, отриманий склад кінцевої газової суміші плазмової газогенерації відходів:  $\text{H}_2 : \text{CO} = 45...50 \% : 25...30 \%$  в температурному інтервалі 1500...1700 °C протягом короткого часу їх перебування у плазмотроні дозволяє у першому наближенні використати для пояснення цих процесів наведені раніше реакції (2)—(10). Виходячи з кінцевих даних по газифікації ТПВ, розглянуті методи «класичної» і плазмової газифікації відрі-

наються один від одного лише первинними джерелами енергії [30]. Такий підхід спрощує проведення об'єктивного аналізу переваг і недоліків цих різних за технологією методів переробки відходів, які наведені у табл. 3 (газифікація) та у табл. 4 (плазмова газогенерація).

Таблиця 4

**Переваги та недоліки технології плазмової газогенерації відходів**

№ з/п	Переваги	№ з/п	Недоліки
1	Плазмова газифікація на сьогодні є найперспективнішим в технологічному відношенні методом переробки відходів, частка якої збільшується з кожним роком	1	Високі енергетичні затрати (0,5...20,0 кВт·год/кг відходів) при експлуатації плазмотронів. Необхідно констатувати, що нам на сьогодні не вистачає єдиної системи сучасних плазмотронів та геніальних генеруючих ідей Ніколи Тесли
2	Використання мобільних міні-установок для знешкодження та знезараження високотоксичних відходів та речовин	2	Висока вартість експлуатації плазмових установок з переробки ТПВ
3	Отримання висококалорійного синтез-газу в установках низькотемпературного піролізу передбачає хімічні перетворення за розглянутими раніше реакціями (2)—(10) при «класичній» газифікації ТПВ. Виходячи з цього, переваги «класичної» газифікації, наведені в п.п. 2—6 (табл. 3), будуть відповідати перевагам низькотемпературної плазмової газифікації, відповідно, п.п. 3—7 (табл. 4)	3	Відсутність підготовленого інженерного персоналу для експлуатації установок
		4	Для отримання якісного синтез-газу ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ) необхідність у подрібненні відходів (< 100 мм)
		5	Суттєво менша потужність установок з переробки відходів у порівнянні зі сміттєспалювальними заводами
		6	Додаткове очищення продуктів газоутворення рукавними фільтрами для знешкодження високотоксичних речовин

Високотемпературна плазмова газифікація (до 5000 °С) передбачає повну (> 99 %) деструкцію всіх компонентів ТБО в інертній атмосфері з утворенням газової складової та склоподібного шламового компаунда. Так, з 1 т відходів, що складались з: 73 % — ТБО, 7 % — відпрацьовані автомобільні шини, 20 % — кам'яне вугілля, отримано 0,04 т смоли та 2000 м<sup>3</sup> вологого піролізного газу. Серед світових лідерів, що займаються розробкою технологій плазмової переробки ТПВ необхідно відмітити фірми: Allter NRG [31], що об'єдналась в 2007 році з фірмою Westinghase Plasma Corporation (США) [32]; Plasco Energy Group Inc. (Канада); Europlasma (Бельгія) і СНО Power (Франція).

## Піроліз

*Піроліз* в широкому сенсі — це хімічна деструкція/конверсія твердих або рідких відходів різного походження під дією різних температур (350...490 °С, 750...800 °С, 900...1200 °С), незначному надлишковому тиску в інертному середовищі. Наведені різні температурні інтервали процесу не збігаються з існуючими значеннями низькотемпературного (< 500 °С) і високотемпературного (750...800 °С) піролізу, що більш за все визначається насамперед не хімізмом реакцій, а проведенням процесу з технологічно обґрунтованими параметрами для отримання конкретних кінцевих продуктів: газової складової (до 70 %), синтез-нафти (вихід до 80 % від маси сухої сировини) та пірокарбону (до 35 %).

З хімічної точки зору низькотемпературний піроліз (350...490 °С), наприклад вторинних полімерів (ПЕВТ, ПЕНТ, ПП, ПС) відбувається за класичним радикально-ланцюговим механізмом, супроводжується значним зменшенням молекулярної маси полімерів та утворенням газової суміші, синтез-нафти та пірокарбону [33]. Найперспективнішим є проведення низькотемпературного піролізу ретельно сортованої полімерної вторинної сировини (ПЕВТ, ПЕНТ, ПП, ПС), яка не має у своєму складі атомів галогену (F, Cl, Br). Низький температурний інтервал (350...490 °С) а також відсутність кисню повітря унеможливають утворення високотоксичних речовин з класу фуранів та діоксинів, що значно здешевлює технологію їх переробки за відсутності потреби додаткового очищення піролізних газів рукавними фільтрами. Зменшити час піролізу та температурний інтервал хімічних перетворень можна використанням селективних каталізаторів процесу [16].

Підвищення температури у піролізері до температури > 800 °С змінює процес піролізу на «класичну» або плазмову (900...1200 °С) газифікацію відходів. Якщо проводити такі процеси у спеціальному піролізері шахтного типу, то процес газифікації буде відбуватися за двостадійною схемою. На першій стадії напівкокс з робочої камери піролізера надходить до технологічної топки, у якій за рахунок часткового спалювання (реакція (2)) у нададіабатичному режимі пилогазовий потік



нагрівається до температури 1300 °С. В топку подається кисень повітря і водяна пара. Потім в циклоні розжарені тверді частинки золи та коксу, як рухомий теплоносії, надходять до камери термічного піролізу. Пилогазовий потік з циклона подається на другу стадію термоокислювального піролізу, де повністю згорає за рахунок подачі додаткового кисню (реакція (6)). Легко бачити, що в такому контексті за своїм хімізмом це «класичний» метод газифікації, який проходить лише в піролізній камері. Необхідно зазначити, що метод піролізної переробки відходів не знайшов широкого практичного використання. Однак, в рамках циркулярної економіки отримані продукти низькотемпературного піролізу є важливими елементами відновлювальної енергетики [34]:

- піролізний газ з теплотворною здатністю 5,0...15,0 МДж/м<sup>3</sup>;
- синтез-нафта, як компонент пічного палива;
- піролізний кокс/пірокарбон, як основний компонент паливних брикетів.

Такий підхід до піролізної переробки відходів є перспективним і залишає для нього вільну нішу (температурний інтервал в 350...550 °С для термохімічної конверсії великої кількості вторинної органічної сировини). В табл. 5 наведені переваги і недоліки цього методу переробки відходів в рамках низькотемпературного піролізу.

Таблиця 5

Переваги та недоліки піролізної переробки відходів

№ з/п	Переваги	№ з/п	Недоліки
1	Виробництво альтернативних, відновлювальних видів теплової енергії та її конверсія у електричну енергію	1	Необхідність у сортуванні та попередній підготовці вторинної сировини/відходів для отримання якісного складу газової складової або синтез-нафти
2	Ефективне використання піролізної технології у невеликих селищах і містах	2	Суттєво менша потужність установки з переробки відходів у порівнянні із сміттєспалювальними заводами
3	Незначні капіталовкладення у будівництво та експлуатацію міні-заводів у невеликих селищах і містах	3	Відсутність підготовленого інженерного складу для ефективного обслуговування установок
4	Підвищена екологічна безпечність термохімічної деструкції відходів у порівнянні з іншими термічними методами	4	Висока вартість обладнання, його експлуатації та обслуговування
5	Переробка твердих залишків комунальних водоочисних споруд/полів фільтрації	5	Недостатні наукові дослідження окремих етапів термохімічної конверсії відходів в рамках теорії ансамблів гетерогенного каталізу
6	Переробка відходів з використанням механізованих та автоматизованих систем контролю і виробництва на всіх стадіях технологічного процесу		

На сьогодні більшість існуючих установок є дослідними зразками. Світовий ринок представлений лише установкою «Мюллер» (Франція), а ринок РФ установкою «ЄЧУТО». За деякими джерелами [35] в Данії, США, Німеччині та Японії побудовані заводи з переробки відходів піролізним методом, які через високі фінансові витрати були закриті.

Світова масштабність та незворотність необхідності переробки відходів повинна вирішуватись з урахуванням таких основних складових: технологічних, екологічних, економічних та соціальних.

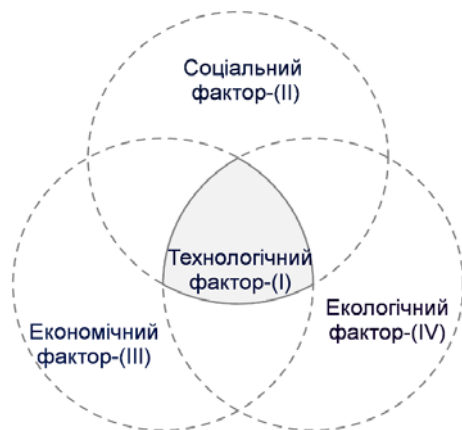


Рис. 4. Інтегральний взаємозв'язок впливу різних факторів на ефективність переробки ТПВ термічними методами

Так, в роботі [36] частково розглянуті еколого-економічні проблеми плазмових технологій переробки ТПВ. Автори наголошують, що визначальним є економічні, екологічні і соціальні фактори, а технологічні аспекти проблеми переробки ТПВ є лише дотичними, тобто другорядними при вирішенні зазначених проблем. Однак, саме удосконалення існуючих технологій переробки ТПВ та розробки нових технологій разом з активним використанням альтернативних джерел енергії зможуть докорінно змінити негативну тенденцію на краще. На рис. 4 показана інтегральна схема — взаємозв'язок різних факторів (I)—(IV), що впливають на ефективне вирішення проблеми переробки промислових і побутових відходів різними методами, включно з термічними. Цілком закономірно, що загальною платформою, на базі якої вирішуються проблеми переробки відходів і яка має безпосереднє відношення до соціальних

(II), економічних (III) і екологічних (IV) проблем є технологічний фактор – (I). Так, фактор – (II) є дуже важливим, тому що враховує соціальні ризики та потенційні загрози здоров'ю людей при тотальному використанні спалювання відходів на сміттєспалювальних заводах, а також не дотриманні при цьому екологічних норм по твердим і газоподібним продуктам згорання. Загальноприйнятним фактом є також велике, обґрунтоване занепокоєння людей величезними викидами  $\text{CO}_2$  в атмосферу, які складають реальну екологічну загрозу зміні клімату Землі та забрудненню її поверхні, річок, озер та ґрунтових вод. Ці недоліки викликають великі соціальні проблеми при проектуванні/відведенні землі, будівництві та експлуатації сміттєспалювальних заводів різних держав. Подібного соціального напруження немає, або воно мінімальне, у разі використання методів газифікації відходів, низькотемпературної плазми та низькотемпературного піролізу переробки відходів.

Фактор – (III) є важливим, адже саме він визначає фінансові витрати на проведення наукових досліджень у цій галузі, проектуванні і розробці нових технологічних модулів переробки відходів, будівництві та експлуатації нових промислових об'єктів.

За усередненими даними 30...40 % загальних фінансових витрат складають витрати на дотримання екологічних норм по твердих та газоподібних продуктах згорання або переробки. У випадку плазмової або піролізної переробки відходів ці витрати значно менші, адже у цьому випадку це може стосуватись виготовлення і експлуатації не стаціонарних а пересувних міні-заводів.

Фактор – (IV) для різних країн не однаковий. Адже це стосується стабільної роботи промисловості, фінансових і державно-управлінських секторів, а також рівня життя населення, розвитку демократичних і соціальних інститутів, разом з екологічною свідомістю населення конкретної країни. Ці базові речі дозволяють використовувати найефективніші і креативні технології (I) з обов'язковим врахуванням економічних (III) і соціальних (II) факторів. Таким чином, обов'язкове дотримання екологічних норм (IV) є реальним запобіжником і показником безпечного проживання людей (II) на основі ефективного використання запропонованих технологій (I) в рамках економічно (III) обґрунтованого проекту заводу або підприємства з переробки ТПВ. Високий економічний рівень розвитку конкретної країни дозволяє використовувати найкращі технології переробки відходів. Однак, навіть цей важливий фактор передбачає обов'язкове науково обґрунтоване використання різних термохімічних методів переробки відходів з урахуванням їх переваг і недоліків, що подані в табл. 1, 3—5. На погляд авторів, навіть в межах однієї країни повинні ефективно використовуватись різні технології переробки відходів з урахуванням їхнього складу та місць можливого розташування заводів з переробки відходів.

## Висновки

1. Спалювання відходів є універсальним термохімічним методом зменшення їх об'ємів до 10 % та утилізації теплової або виробництва електричної енергії. Однак, суттєві недоліки цього процесу, пов'язані з реальною загрозою здоров'ю людей, викидами в атмосферу великої кількості  $\text{CO}_2$  та інших токсичних речовин, екологічним навантаженням на довкілля, вказує на необхідність розробки нових, ефективніших методів переробки ТПВ.

2. Проведений аналіз основних термохімічних методів конверсії відходів в рамках циркулярної економіки вказує на те, що спалювання відходів не відповідає задекларованим авторами КПЗП критеріям щодо його безпеки для здоров'я людей та навколишнього середовища. Крім того, спалювання відходів і утилізацію тепла або електричної енергії необхідно розглядати як кінцеву стадію сучасної лінійної економіки, що не має прямого відношення до циркулярної економіки.

3. Газифікацію відходів (1100...1300 °C) або їх низькотемпературну плазмову переробку (1500...1700 °C) необхідно розглядати як подібний технологічний процес отримання синтез-газу ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) з використанням різного апаратурного устаткування. Високотехнологічний метод газифікації відходів є найперспективнішим, адже окрім газової суміші, як теплоносія, дозволяє в рамках циркулярної економіки використовувати синтез-газ для отримання синтетичних бензину та олів, а також як вихідну сировину в органічному синтезі.

4. Використання низькотемпературного піролізу (350...490 °C) в рамках циркулярної економіки дозволяє ефективно переробляти різноманітні органічні відходи з отриманням газової складової, синтез-нафти та пірокарбону.

5. Показано, що декарбонізація переробки органічних відходів в рамках циркулярної економіки пов'язана насамперед зі скороченням об'ємів їх спалювання та переробки іншими технологічними методами.

6. На перехідному етапі до нового енергетичного устрою показана можливість інтеграції/доповнення а не сегрегації різних технологічних методів переробки промислових та побутових відходів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A. Murray, K. Skene, and K. Haynes, "The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context," *Journal of Business Ethics*, vol. 140, pp. 369-380, 2017.
- [2] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppala, "Circular Economy: The Concept and its Limitations," *Ecological Economics*, vol. 143, pp. 37-46, 2018.
- [3] К. Г. Гомонов, П. О. Сипакова, и А. П. Чапурная, «Внедрение микрогенерации и энергосберегающих технологий в рамках концепции зеленой экономики: зарубежной опыт и Россия,» *Вестник РУДН. Серия: Экономика*, Т. 27(3), с. 442-454, 2019.
- [4] А. Н. Дудник, и др., «Карбонизация твердых органических отходов с использованием никелевого и железного катализаторов». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/343398593>.
- [5] Е. А. Сысоев, «Циркулярная экономика в контексте устойчивого развития,» *Проблемы современной экономики. Экономика и экология*, т. 70(2), с. 199-204, 2019.
- [6] ООН. Экономический и Социальный Совет. Руководящие принципы поощрения проектов государственно-частных партнерств на благо людей в области преобразования отходов в энергию, в интересах развития экономики замкнутого цикла, Женева, 1-2 декабря 2020 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://unecce.org/sites/default/files/2021-05/2102093R\\_0.pdf](https://unecce.org/sites/default/files/2021-05/2102093R_0.pdf).
- [7] The World Bank. [Electronic resource]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>.
- [8] ICA. [Electronic resource]. Available: <https://www.ica.org/reports/world-energy-balances-overview>.
- [9] The World Bank. [Electronic resource]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.COZE.KT>.
- [10] The World Bank. [Electronic resource]. Available: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>.
- [11] Y. Ataliru, et al., "A review on green economy and development of green roads and highways using carbon neutral materials," *Rene Wable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 301-311, 2019. <https://doi.org/10.1016/l.rser.2018.11.036>.
- [12] V. Matynshok, B. Sergio, S. Balashova, and K. Gomonomov, "Influence of smart grid and renewable energy sources on energy efficiency: foreign experience," *Run Journal of Economics*, vol. 25 (4), pp. 583-598, 2017. <https://doi.org/10.22363/2313-2329-2017-25-4-583-598>.
- [13] "Planet. The Circular Carbon Economy," *ARAMCO*. [Electronic resource]. Available: <https://www.aramco.com/en/making-a-difference/planet/the-circular-carbon-economy>.
- [14] O. Khudoyarova, O. Gordienko, A. Blazhko, T. Sydoruk, and A. Ranskiy, "Desulfurization of Industrial Water-Alkaline Solutions and Receiving New Plastic Oils," *J. Ecological Engineering*, vol. 21 (6), pp. 61-66, 2020.
- [15] A. Ranskiy, et al., "Integration of Technological Cycles of Industrial Waste Processing," *J. Ecological Engineering*, vol. 22 (6), pp. 209-213, 2021.
- [16] S. Dimitris Achilias et al., "Recent Advances in the Chemical Recycling of Polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA)", *Saloniki: In Tech*, 2012, 406 p.
- [17] А. Г. Ершов, и В. Л. Шубников, «Термическое обезвреживание отходов: теория и практика, мифы и легенды,» *Журнал ТБО*, № 5, с. 47-52, 2014.
- [18] А. Г. Ершов, В. Л. Шубников, и Л. А. Шульц, «Термическое обезвреживание отходов: теория и практика, мифы и легенды,» *Журнал ТБО*, № 6, с. 54-60, 2014.
- [19] А. П. Ранский, и др., «Термическое обезвреживание непригодных пестицидных препаратов,» *Вопросы химии и химической технологии*, № 12, с. 198-205, 2008.
- [20] О. В. Гайдицей, «Комплексная переработка экологически опасных хлорсодержащих пестицидных препаратов,» дис. канд. техн. наук, спец. 21.06.01 «Экологическая безопасность», Днепропетровск, 2003, 202 с.
- [21] К. В. Лодыгин, Н. Д. Осветицкая, и Ю. А. Рахманов, «К вопросу предварительной оценки и методов снижения содержания диоксинов в отходах установок термоокислительного обезвреживания медицинских отходов,» *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент*, № 1, с. 40-44, 2014.
- [22] *Оценка различных методов термической переработки ТБО*, [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://zbtb.ru/o-tbo/lit/tehnologii-otxodov/ocenka-razlichnix-metodov-termicheskoy-pererabotki-tbo>.
- [23] В. А. Рыжов, А. Н. Кислицын, Е. С. Рыжова, и В. П. Короткий, «Газификация древесины – актуальное направление развития лесопромышленного комплекса России,» *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*, т. 20, 2014, с. 2501-2505. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://e-Koncept.ru/2014/54764.htm>.
- [24] В. Я. Браверман, и В. В. Власюк, «Технологии утилизации твердых бытовых отходов как источник получения альтернативных энергетических ресурсов на примере Одесской области (Обзор),» *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, № 1, с. 54-59, 2017.
- [25] Р. Ш. Загруднинов, В. Н. Негуторов, Д. Г. Малыхин, П. К. Сеначин, М. С. Никишанин, и С. А. Филипченко, «Подготовка и газификация твердых бытовых отходов в двухзонных газогенераторах прямого процесса, работающих в составе мини-ТЭЦ и комплексов по производству синтетических жидких топлив,» *Ползуновский вестник*, № 4/3, с. 47-62, 2013.
- [26] А. Л. Лapidус, и А. Ю. Крылова, «О механизме образования жидких углеводородов из CO и H<sub>2</sub> на кобальтовых катализаторах,» *Рос. хим. Журнал*, т. XLIV, № 1, с. 43-56, 2000.
- [27] А. А. Степачева, И. И. Мутовкина, А. В. Гавриленко, М. Г. Сульман, и Ю. В. Луговой, «Синтез Фишера-Тропша для производства углеводородов бензинового ряда,» *Вестник ТвГУ. Серия «Химия»*, № 3, с. 90-94, 2015.
- [28] А. А. Кононенко, и М. Х. Сосна, «Особенности осуществления процесса Фишера-Тропша в радиальных реакторах,» *Химические технологии и продукты*, № 3-4, с. 31-34, 2019.
- [29] *WTEC "Sistema paketnogo okilenija BOS"*, [Electronic resource]. Available: <http://wteccanada.com>.
- [30] И. А. Шарина, Л. Н. Перепечко, и А. С. Аньшаков, «Перспективы использования плазменной технологии для переработки/уничтожения техногенных отходов,» *Российский экономический журнал ЭКО*, № 12, с. 44-47, 2016.

- [31] *Alter NRG Corp. (USA)*. [Electronic resource]. Available: <http://www.alternrg.com> .
- [32] *LETAL International Inc (USA)*, [Electronic resource]. Available: <http://www.lennox.com> .
- [33] Б. В. Коріненко, О. С. Худоярова, М. В. Хутько, і А. П. Ранський, «Особливості термодеструкції вторинної полімерної сировини,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 29-35, 2021.
- [34] И. В. Васильев, П. А. Капустенко, А. Ю. Перевертайленко, И. О. Илюнин, С. И. Бухкало, и О. П. Арсеньева, «Проблемы и перспективы некоторых современных технологий термической конверсии твердых бытовых отходов,» *Інтегровані технології та енергозбереження*, № 2, с. 91-95, 2013.
- [35] А. Ф. Малышевский, Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2012, 350 с.
- [36] Н. И. Пляскина, и В. Н. Харитонова, «Плазменные технологии утилизации ТБО: продвижение инноваций на рынок,» *Інновації*, № 12(194), с. 67-79, 2014.

Рекомендована кафедрою хімії та хімічної технології ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.07.2021

**Коріненко Богдан Валерійович** — аспірант кафедри хімії та хімічної технології;  
**Гура Костянтин Юрійович** — аспірант кафедри екології та екологічної безпеки;  
**Ранський Анатолій Петрович** — д-р хім. наук, професор, завідувач кафедри хімії та хімічної технології, e-mail: ranskiy@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Худоярова Ольга Степанівна** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри хімії та методики навчання хімії, e-mail: helgakhudoyarova@gmail.com .

Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Вінниця

**B. V. Korinenko**<sup>1</sup>  
**O. S. Khudoyarova**<sup>2</sup>  
**K. Yu. Hura**<sup>1</sup>  
**A. P. Ranskiy**<sup>1</sup>

## Circular Economics and Thermochemical Conversion of Solid Waste

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University;

<sup>2</sup>Vinnitsia Mykhailo Kotsiubynskiy State Pedagogical University

*The basic thermochemical methods of solid waste processing (SWP) have been considered within the framework of circular and classical linear economy. The advantages and disadvantages of each of the methods, the prospects of their industrial use and the presence of world leaders in the development of technologies for processing industrial and household waste, and in the production of necessary industrial equipment were analyzed. It has been shown that the energy recycling industry (ERI), namely waste incineration, does not meet the criteria for safety for human health and the environment, which were declared by the Committee on Innovation, Competitiveness and Public-Private Partnership of the UN Economic and Social Council in published "Guidelines for the Promotion of Public-Private Partnership Projects for the Benefit of People in the Field of Converting Waste into Energy in the Interests of Closed-Cycle Economy Development". The possibility and efficiency of using gasification of waste with the use of modern plasma technologies in the use of low-temperature (350...490 °C) pyrolysis has been shown. It has been established that the high-tech method of gasification of waste is the most promising, because it allows in the circular economy to use synthesis gas to produce synthetic gasoline and oils, as well as raw materials in organic synthesis. Emphasis is placed on the decarbonization of organic waste recycling in a circular economy, as well as on the need for integration in the transition period to a new energy system, rather than segregation of existing technologies, both at the technical and commercial levels. It has been shown that the decarbonization of the processing of organic waste in the circular economy is primarily associated with a reduction in their incineration and recycling by other more technological methods.*

**Keywords:** circular economy, thermochemical conversion, combustion, gasification, plasma, pyrolysis, decarbonization, waste, ecology.

**Korinenko Bohdan V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Chemistry and Chemical Technology;  
**Khudoyarova Olga S.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior lecturer of the Chair of Chemistry and Methods of Chemistry Teaching, e-mail: helgakhudoyarova@gmail.com ;  
**Hura Konstantin Yu.** — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology and Environmental Safety;  
**Ranskiy Anatoliy P.** — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Head of the Chair of Chemistry and Chemical Technology, e-mail: ranskiy@gmail.com

**Б. В. Кориненко**<sup>1</sup>  
**О. С. Худоярова**<sup>2</sup>  
**К. Ю. Гура**<sup>1</sup>  
**А. П. Ранский**<sup>1</sup>

## **Циркулярная экономика и термохимическая конверсия твердых отходов**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет;

<sup>2</sup>Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського

*В рамках циркулярной и классической линейной экономики рассмотрены основные термохимические методы переработки твердых бытовых отходов (ТБО). Проанализированы преимущества и недостатки каждого из методов, перспективность их промышленного использования а также наличие мировых лидеров как по разработке технологий переработки промышленных и бытовых отходов, так и по производству необходимого промышленного оборудования. Показано, что индустрия переработки отходов в энергию (ПОЭ), то есть сжигание отходов, не соответствует критериям безопасности для здоровья людей и окружающей среды, которые были задекларированы Комитетом по инновационной деятельности, конкурентоспособности и государственно-частному партнерству Экономического и Социального Совета ООН в напечатанных «Управляющих принципах поощрения проектов государственно-частного партнерства на благо людей в области преобразования отходов в энергию в интересах развития экономики замкнутого цикла». Показана возможность и эффективность использования газификации отходов с использованием современных плазменных технологий в также использование низкотемпературного (350...490 °С) пиролиза. Установлено, что высокотехнологичный метод газификации отходов является наиболее перспективным, поскольку позволяет в рамках циркулярной экономики использовать синтез-газ для получения синтетических бензина и масел, а также в качестве исходного сырья в органическом синтезе. Акцентируется внимание на декарбонизации переработки органических отходов в рамках циркулярной экономики, а также необходимость в переходный период нового энергетического устройства интеграции, а не сегрегации существующих технологий, как на техническом, так и на коммерческом уровнях. Показано, что декарбонизация переработки органических отходов в рамках циркулярной экономики связана в первую очередь с сокращением объемов их сжигания и переработки другими более технологичными методами.*

**Ключевые слова:** циркулярная экономика, термохимическая конверсия, сжигание, газификация, плазма, пиролиз, декарбонизация, отходы, экология.

*Кориненко Богдан Валерьевич* — аспирант кафедры химии и химической технологии;

*Худоярова Ольга Степановна* — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры химии и методики обучения химии, e-mail: helgakhudoyarova@gmail.com ;

*Гура Константин Юрьевич* — аспирант кафедры экологии и экологической безопасности;

*Ранский Анатолий Петрович* — д-р. хим. наук, профессор, заведующий кафедрой химии и химической технологии, e-mail: ranskiy@gmail.com