

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ ПРИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ПІРОЛІЗІ

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

<sup>2</sup>Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України

<sup>3</sup>Вінницький державний педагогічний університет ім. Михайла Коцюбинського

### Анотація

*Розглянуті та досліджені переваги та недоліки піролізної переробки промислових та побутових відходів. Показана перспективність використання цього термохімічного методу при переробці полімерних відходів. Встановлено інтегральний взаємозв'язок впливу соціального, економічного, екологічного та технологічного факторів на ефективність переробки ТПВ термохімічними методами.*

**Ключові слова:** низькотемпературний піроліз, полімерні відходи, екологія.

### Abstracts

*The advantages and disadvantages of pyrolysis processing of industrial and household waste have been considered and researched. The prospects of using this thermochemical method in the processing of polymer waste has been shown. The integral interrelation of influence of social, economic, ecological and technological factors on efficiency of processing of MSW by thermochemical methods has been established.*

**Keywords:** low-temperature pyrolysis, polymer waste, ecology.

### Вступ

Зусилля країн цивілізованого світу направлені на попередження та мінімізацію утворення ТПВ, а потім на їх рециркуляцію, вторинне використання і розробку ефективних технологій кінцевої їх переробки, знешкодження і кінцевого видалення; при цьому передбачається, що їх захоронення не буде призводити до забруднення довкілля. Означені технологічні рішення, безумовно, зменшують рівень негативного впливу ТПВ на довкілля, але не вирішують проблему прогресивного їх накопичення і, відповідно, вимагають розробки та впровадженню нових вискоелективних технологій. Одним із таких напрямків є метод низькотемпературного піролізу ТПВ. Важливим при цьому є інтегральний зв'язок впливу на ефективність переробки комплексу факторів, а саме соціального, економічного, екологічного та технологічного [1].

### Обговорення результатів досліджень

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 [2]. 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.

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 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. 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 [3]:

- 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. 1 наведені переваги і недоліки цього методу переробки відходів в рамках низькотемпературного піролізу.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки піролізної переробки відходів

| № п/п | Переваги   | № п/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 по переробці відходів у порівнянні із сміттєспалювальними заводами   |
| 3     | Незначні капіталовкладення при будівництві та експлуатації 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 [1] 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. Так, в роботі [4] 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 сумісно з активним використанням альтернативних джерел енергії зможуть корінним чином змінити негативну тенденцію на краще. На рис. 1 наведена інтегральна схема/взаємозв'язок різних факторів (I)-(IV), що впливають на ефективне вирішення проблеми переробки промислових і побутових відходів різними методами, включаючи і термічні.

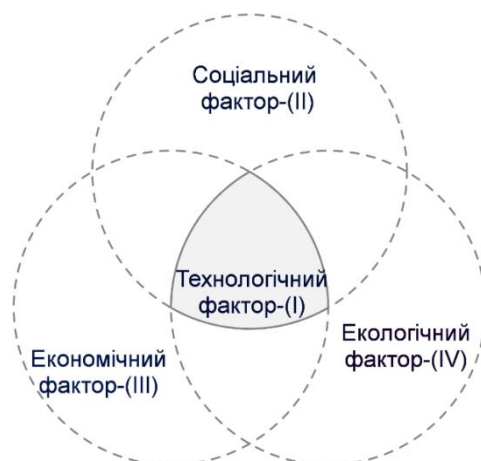


Рисунок 1 – Інтегральний взаємозв'язок впливу різних факторів на ефективність переробки ТПВ термохімічними методами

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 велика, обґрунтована занепокоєність людей величезними викидами CO<sub>2</sub> 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, при використанні 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 твердим та газоподібним продуктам 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 неоднаковий, 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. 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. Використання низькотемпературного піролізу (350–490 °C) в рамках циркулярної економіки дозволяє ефективно переробляти різноманітні органічні відходи з отриманням газової складової, синтез-нафти та пірокарбону.

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

3. 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. 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.
2. Б. В. Коріненко, О. С. Худоярова, М. В. Хутько, і А. П. Ранський, «Особенности термодеструкции вторичной полимерной сировини,» Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 1, с. 29-35, 2021.
3. 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.
4. Н. И. Пляскина, и В. Н. Харитоновна, «Плазменные технологии утилизации ТБО: продвижение инноваций на ры-нок,» *Інновації*, № 12(194), с. 67-79, 2014.

**Коріненко Богдан Валерійович** – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця; інженер I категорії відділу № 8 Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, e-mail: [b.korinenko.b@gmail.com](mailto:b.korinenko.b@gmail.com)

**Ранський Анатолій Петрович** – доктор хім. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Тітов Тарас Сергійович** – канд. хім. наук, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Гордієнко Ольга Анатоліївна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Сандул Ольга Миколаївна** – старший лаборант кафедри хімії та методики навчання хімії, Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця

**Bohdan V. Korinenko** – Postgraduate of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia; engineer of the I category of the Department № 8 of the V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: [b.korinenko.b@gmail.com](mailto:b.korinenko.b@gmail.com)

**Anatoliy P. Ranskiy** – Dr. Sc. (Chem.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Taras S. Titov** – Ph.D. (Chem.), Associate Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Olga A. Gordienko** – Ph.D., Docent, Associate Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

**Olga M. Sandul** – senior laboratory assistant of the Department of Chemistry and Methods of Chemistry Teaching, Vinnytsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnytsia