

Вінницький національний технічний університет

ПІРОЛІЗНІ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З ОТРИМАННЯМ КОРИСНИХ РЕЧОВИН

Анотація

У роботі розглянуто можливості застосування піролізних технологій для утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) з одержанням корисних енергетичних і матеріальних продуктів. Проаналізовано особливості термічного розкладання органічної складової ТПВ у безкисневому середовищі та вплив основних технологічних параметрів процесу на вихід синтез-газу, піролізної оливи і твердого вуглецевого залишку. Показано екологічні та енергетичні переваги піролізу порівняно з традиційними методами поводження з відходами. Визначено перспективи впровадження піролізних установок в Україні з урахуванням сучасного стану системи управління відходами.

Ключові слова: піроліз, тверді побутові відходи, синтез-газ, піролізна олива, вторинні ресурси, екологічна безпека.

Abstract

The paper considers the application of pyrolysis technologies for municipal solid waste utilization with the production of valuable energy and material products. The features of thermal decomposition of the organic fraction of MSW in an oxygen-free environment and the influence of key operating parameters on the yield of syngas, pyrolysis oil, and solid carbon residue are analyzed. Environmental and energy advantages of pyrolysis compared to conventional waste management methods are shown. Prospects for the implementation of pyrolysis facilities in Ukraine are outlined.

Key words: pyrolysis, municipal solid waste, syngas, pyrolysis oil, secondary resources, environmental safety.

Вступ

Проблема утворення, накопичення та утилізації твердих побутових відходів залишається однією з найбільш гострих екологічних і соціально-економічних проблем сучасних урбанізованих територій. Інтенсифікація виробництва, зростання рівня споживання та урбанізації призводять до постійного збільшення обсягів ТПВ, що створює значне навантаження на існуючі системи поводження з відходами. Обмеженість полігонних потужностей, їх фізичне та моральне зношення, а також негативний вплив захоронення відходів на компоненти довкілля зумовлюють необхідність пошуку та впровадження більш ефективних і екологічно безпечних технологій переробки ТПВ [1].

Традиційні методи поводження з твердими побутовими відходами, такі як захоронення на полігонах і пряме спалювання, не забезпечують комплексного вирішення проблеми та супроводжуються значними екологічними ризиками. Захоронення відходів призводить до утворення фільтрату, що може забруднювати ґрунти та підземні води, а також до викидів метану — одного з найбільш небезпечних парникових газів. Пряме спалювання ТПВ, у свою чергу, пов'язане з утворенням токсичних газоподібних сполук, золи та шлаків, які потребують подальшого захоронення або утилізації [1, 5]. У зв'язку з цим актуальним є перехід від лінійної моделі поводження з відходами до принципів циркулярної економіки, що передбачає максимальне залучення вторинних ресурсів у господарський обіг.

У цьому контексті піроліз розглядається як перспективний метод термохімічної переробки твердих побутових відходів, що дозволяє здійснювати розкладання органічної складової сировини в умовах відсутності кисню з утворенням газоподібних, рідких і твердих продуктів [2]. На відміну від традиційних технологій утилізації, піроліз забезпечує можливість цілеспрямованого регулювання складу та властивостей кінцевих продуктів шляхом зміни температурного режиму, швидкості нагрівання та часу перебування сировини в реакторі. Це створює передумови для адаптації піролізних установок до різного морфологічного складу ТПВ та конкретних умов експлуатації.

Суттєвою перевагою піролізних технологій є можливість одержання енергетично цінних продуктів, зокрема синтез-газу та піролізної оливи, які можуть бути використані як альтернативні джерела енергії або сировина для подальшої хімічної переробки [3, 4]. Окрім цього, твердий вуглецевий залишок, що утворюється в процесі піролізу, може застосовуватися як вторинний матеріал або паливо, що сприяє зменшенню кількості відходів, які підлягають остаточному захороненню.

Для України проблема утилізації твердих побутових відходів є особливо актуальною у зв'язку з високим рівнем захоронення відходів, недостатнім розвитком інфраструктури переробки та зростаючими вимогами до екологічної безпеки. У цих умовах впровадження піролізних технологій може стати важливим елементом модернізації системи управління відходами, сприяти підвищенню енергетичної незалежності регіонів та наближенню вітчизняних практик до європейських стандартів у сфері поводження з відходами [6].

Таким чином, дослідження можливостей застосування піролізних технологій для утилізації твердих побутових відходів є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на вирішення екологічних, енергетичних та ресурсних проблем сучасного суспільства.

Аналіз відомих публікацій

Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючий інтерес до використання піролізних технологій для переробки твердих побутових відходів. У роботах [3, 4] зазначається, що ефективність процесу значною мірою визначається морфологічним складом ТПВ, ступенем їх попередньої підготовки та температурним режимом піролізу. Підвищення температури сприяє зростанню виходу газоподібних продуктів, тоді як за нижчих температур переважає утворення піролізної оливи.

Дослідження [5] показують, що синтез-газ, отриманий у процесі піролізу ТПВ, має достатню теплотворну здатність для використання в енергетичних установках. Водночас твердий вуглецевий залишок після відповідної обробки може застосовуватися як вторинний матеріал або компонент твердого палива [6].

Мета і завдання досліджень

Метою роботи є аналіз можливостей застосування піролізних технологій для утилізації твердих побутових відходів з отриманням корисних продуктів.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан розвитку піролізних технологій переробки ТПВ;
- оцінити вплив основних технологічних параметрів на вихід продуктів піролізу;
- визначити екологічні та енергетичні переваги піролізу порівняно з традиційними методами утилізації;
- окреслити перспективи впровадження піролізних установок в Україні.

Основний матеріал досліджень

Піроліз твердих побутових відходів є складним термохімічним процесом, що полягає в нагріванні органічної складової сировини за відсутності або суттєвого обмеження доступу кисню. У таких умовах відбувається послідовний розклад полімерних і біогенних компонентів ТПВ з утворенням газоподібних, рідких і твердих продуктів. Ефективність процесу значною мірою визначається

морфологічним складом відходів, ступенем їх попередньої підготовки, а також режимними параметрами роботи піролізної установки [3, 4].

Відомо, що тверді побутові відходи характеризуються високою неоднорідністю складу, що ускладнює забезпечення стабільності піролізного процесу. Тому важливим етапом є попередня механічна та, за необхідності, термічна підготовка ТПВ, яка включає сортування, подрібнення та зниження вологості. Як зазначено в роботах [1, 5], зменшення вмісту вологи в сировині позитивно впливає на тепловий баланс установки та підвищує вихід газоподібних продуктів.

Основним технологічним параметром, що визначає напрям перебігу піролізних реакцій, є температура процесу. За даними літературних джерел [4], оптимальний температурний інтервал піролізу ТПВ становить 400–700 °С. У нижній частині цього діапазону переважає утворення піролізної оливи, тоді як підвищення температури сприяє інтенсифікації газоутворення внаслідок вторинних реакцій термічного крекінгу. Таким чином, вибір температурного режиму дозволяє цілеспрямовано регулювати співвідношення між основними продуктами піролізу залежно від поставлених завдань.

Газоподібний продукт піролізу, або синтез-газ, складається переважно з оксиду вуглецю, водню, метану та інших легких вуглеводнів. Його склад і теплотворна здатність залежать від температури, часу перебування сировини в реакторі та складу вихідних відходів [5]. Синтез-газ може використовуватися безпосередньо для покриття власних енергетичних потреб установки або для виробництва теплової та електричної енергії в когенераційних системах, що підвищує загальну енергоефективність технологічного процесу.

Рідкий продукт піролізу — піролізна олива — є складною багатокомпонентною сумішшю органічних сполук, включаючи кисневмісні вуглеводні, смоли та ароматичні сполуки. Залежно від параметрів процесу та складу ТПВ піролізна олива може використовуватися як альтернативне паливо або як сировина для подальшої хімічної переробки після відповідного очищення та фракціонування [3]. Її практичне використання відкриває додаткові можливості для інтеграції піролізних технологій у промислові та енергетичні системи.

Твердий вуглецевий залишок, що утворюється в процесі піролізу, характеризується підвищеним вмістом вуглецю та пористою структурою. Його фізико-хімічні властивості залежать від температури піролізу та швидкості нагрівання. За даними досліджень [6], після відповідної обробки твердий залишок може застосовуватися як енергетичний ресурс, сорбент або вторинний матеріал у будівельній галузі. Це дозволяє додатково зменшити кількість відходів, що підлягають остаточному захороненню.

Окрему увагу в межах досліджень приділено екологічним аспектам піролізних технологій. Завдяки відсутності вільного кисню процес супроводжується меншим утворенням оксидів азоту, діоксинів і фуранів порівняно з традиційним спалюванням відходів [2, 5]. За умов застосування ефективних систем очищення газових викидів піролізні установки можуть відповідати сучасним екологічним вимогам та нормативам.

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що піроліз твердих побутових відходів є технологічно та екологічно обґрунтованим способом їх комплексної переробки з одержанням корисних енергетичних і матеріальних продуктів. Отримані висновки створюють передумови для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію параметрів процесу та адаптацію піролізних установок до умов практичного застосування в Україні.

Висновки

Проведений аналіз свідчить, що піролізні технології є одним із найбільш перспективних напрямів утилізації твердих побутових відходів, який поєднує екологічну ефективність з можливістю отримання корисних енергетичних і матеріальних продуктів. На відміну від традиційних методів захоронення та прямого спалювання, піроліз забезпечує глибоку термохімічну переробку органічної складової ТПВ у безкисневому середовищі з утворенням синтез-газу, піролізної оливи та твердого вуглецевого залишку, що підтверджується результатами сучасних досліджень [2, 4].

Встановлено, що застосування оптимальних температурних режимів у межах 400–700 °С дозволяє забезпечити стабільний перебіг процесу та прогнозований вихід продуктів піролізу, що є важливим з точки зору практичної реалізації технології [4]. Отриманий синтез-газ характеризується достатньою теплотворною здатністю та може використовуватися для виробництва теплової й електричної енергії, підвищуючи загальну енергоефективність піролізних установок і зменшуючи споживання традиційних викопних палив [5].

Піролізна олива, що утворюється в процесі переробки ТПВ, має значний потенціал для використання як альтернативне паливо або як сировина для подальшої хімічної переробки, що розширює можливості її інтеграції в енергетичні та промислові технологічні схеми [3]. Твердий вуглецевий залишок залежно від фізико-хімічних властивостей може застосовуватися як вторинний матеріал, енергетичний ресурс або компонент композиційних матеріалів, що сприяє підвищенню рівня комплексної утилізації відходів [6].

З екологічної точки зору впровадження піролізних технологій дозволяє суттєво зменшити обсяги захоронення твердих побутових відходів, знизити ризики забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря, а також скоротити викиди парникових газів порівняно з традиційними методами поводження з відходами [1, 5]. Це робить піроліз важливим елементом реалізації принципів сталого розвитку та циркулярної економіки.

В умовах України піролізні установки можуть стати ефективною складовою сучасної системи управління відходами, особливо в регіонах з обмеженими полігонними потужностями та зростаючою потребою в альтернативних джерелах енергії. Впровадження таких технологій сприятиме підвищенню енергетичної безпеки держави, розвитку вторинного ресурсокористування та зменшенню екологічного навантаження на навколишнє середовище [6].

Подальші наукові дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію технологічних параметрів піролізного процесу з урахуванням морфологічного складу українських ТПВ, підвищення надійності та енергоефективності обладнання, а також адаптацію піролізних установок до реальних умов промислової експлуатації. Особливу увагу слід приділити питанням очищення продуктів піролізу та економічної доцільності впровадження даних технологій у вітчизняну практику поводження з відходами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Brunner, P. H., Rechberger, H.** *Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers*, Second Edition. CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/9781315313450. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
2. **Bridgwater, A. V.** Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. – 2012. – Vol. 38. – P. 68–94. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048. Електронний ресурс: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
3. **Goh, C. S., Choi, Y.** Thermal pyrolysis of biomass and waste: potential and challenges. *Energies*. – 2020. <https://www.mdpi.com/journal/energies>.
4. Zhang Y., Yu Z. Pyrolysis of solid waste: influence of operating conditions on product yield. *Chemical Engineering Research and Design*. – 2021. <https://www.sciencedirect.com/journal/chemical-engineering-research-and-design/issues>
5. **Arena, U.** Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32(4). – P. 625–639. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025. Електронний ресурс: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>
6. Ковалев О. Перспективи розвитку технологій термічної переробки відходів в Україні. *Екологічний вісник*. – 2022. <https://journal.kdpu.edu.ua/ecolog/uk/issue/archive>

Жук Дмитро Вячеславович – аспірант, кафедра інженерних систем у будівництві, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: DmitroZhuk333@gmail.com

Dmytro Zhuk – Postgraduate student of the Department of Engineering Systems in Construction, Vinnytsia, National Technical University, e-mail: DmitroZhuk333@gmail.com