УДК 620.925:628.4

Жук Д.В.

УТИЛІЗАЦІЯ ТВЕРДИХ ВІДХОДІВ МЕТОДОМ ПІРОЛІЗУ З ОТРИМАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА МАТЕРІАЛЬНИХ ПРОДУКТІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто перспективи застосування методу піролізу для утилізації твердих відходів з одночасним отриманням корисних енергетичних і матеріальних продуктів. Проаналізовано особливості термічного розкладання органічної складової твердих відходів в умовах відсутності або обмеженого доступу кисню, а також основні фактори, що визначають ефективність піролізного процесу. Розглянуто вплив температури, вологості, фракційного та морфологічного складу сировини, швидкості нагрівання і часу перебування матеріалу в реакторі на вихід газоподібних, рідких та твердих продуктів. Особливу увагу приділено отриманню синтез-газу, піролізної оливи та твердого вуглецевого залишку. Визначено основні переваги піролізу порівняно із захороненням і прямим спалюванням відходів, а також перспективи використання піролізних установок для підвищення рівня ресурсної та енергетичної ефективності системи поводження з відходами.

Ключові слова: піроліз, тверді відходи, термічна утилізація, синтез-газ, піролізна олива, біовугілля, термічна переробка, вторинні ресурси, енергетична ефективність.

Abstract

The paper examines the prospects of using pyrolysis for the disposal of solid waste while simultaneously producing valuable energy and material products. The features of thermal decomposition of the organic fraction of solid waste under oxygen-free or oxygen-limited conditions are analyzed, along with the main factors determining the efficiency of the pyrolysis process. The influence of temperature, moisture content, fractional and morphological composition of the feedstock, heating rate, and residence time of the material in the reactor on the yield of gaseous, liquid, and solid products is considered. Particular attention is paid to the production of synthesis gas, pyrolysis oil, and solid carbon residue. The main advantages of pyrolysis compared with waste landfilling and direct incineration are identified, as well as the prospects for using pyrolysis plants to improve the resource and energy efficiency of waste management systems.

Key words: Pyrolysis, solid waste, thermal waste treatment, synthesis gas, pyrolysis oil, biochar, thermal processing, secondary resources, energy efficiency.

Вступ

Проблема утворення та накопичення твердих відходів є однією з важливих екологічних і соціально-економічних проблем сучасності. Постійне збільшення обсягів споживання, розвиток промисловості, урбанізація та недостатній рівень повторного використання матеріалів призводять до формування значних потоків відходів, які потребують ефективного збирання, перероблення та утилізації.

Традиційне захоронення на полігонах не забезпечує повноцінного використання ресурсного потенціалу відходів та супроводжується утворенням фільтрату, полігонного газу й довготривалим вилученням земельних ресурсів [1].

Значну частину твердих відходів становлять органічні матеріали, які містять значну кількість вуглецю та хімічної енергії. До них належать деревина, рослинні залишки, папір, картон, текстиль, полімерні матеріали та інші органічні компоненти. Замість остаточного захоронення така сировина може бути перетворена на нові енергетичні та матеріальні продукти. Одним із перспективних способів такого перетворення є піроліз [2].

Піроліз являє собою термохімічний процес розкладання органічної сировини під дією високої температури за відсутності або суттєвого обмеження доступу кисню. У результаті складні органічні сполуки розкладаються з утворенням трьох основних груп продуктів: газоподібної, рідкої та твердої.

Співвідношення між ними залежить від властивостей вихідної сировини та параметрів технологічного процесу [2, 3].

На відміну від прямого спалювання, основною особливістю піролізу є можливість не лише отримати теплову енергію, а й сформувати декілька товарних продуктів. Газова фракція може використовуватися як паливо для забезпечення власних потреб установки або виробництва електричної та теплової енергії. Рідка фракція після відповідного очищення може розглядатися як альтернативне паливо або хімічна сировина. Твердий вуглецевий залишок залежно від властивостей може використовуватися як паливо, сорбент або матеріал для подальшої переробки [3, 4].

Для України розвиток технологій термічної утилізації відходів має особливе значення. Необхідність зменшення обсягів захоронення, підвищення енергетичної незалежності та раціонального використання вторинних ресурсів створює передумови для впровадження сучасних технологій термохімічної переробки. Піролізні установки можуть бути адаптовані як до промислових, так і до окремих потоків органічних твердих відходів.

Таким чином, дослідження процесу піролізу є актуальним завданням, оскільки ця технологія поєднує вирішення проблеми утилізації відходів із можливістю отримання енергетично цінних і матеріальних продуктів.

Аналіз відомих публікацій

Питання термохімічної переробки відходів досліджується значною кількістю науковців. У роботах, присвячених аналізу потоків матеріалів і поводженню з відходами, зазначається, що сучасна система управління відходами повинна бути орієнтована не тільки на їх остаточне видалення, але й на максимальне повернення матеріалів та енергії у господарський обіг [1].

Дослідження піролізу біомаси та органічних відходів показують, що процес може забезпечувати одночасне отримання газоподібних, рідких і твердих продуктів. За даними A. V. Bridgwater, характеристики отриманих продуктів істотно залежать від температури, швидкості нагрівання, часу перебування парогазової суміші та властивостей вихідної сировини [2].

Важливим параметром є температура піролізу. За відносно низьких температур процес характеризується утворенням значної частини твердого залишку та первинних рідких продуктів. При підвищенні температури активізуються реакції вторинного розкладання та крекінгу, унаслідок чого зростає частка газоподібних продуктів [3].

Для твердих відходів додатковим фактором є неоднорідність їх складу. Різні компоненти мають різну температуру початку термічного розкладання, теплотворну здатність та вміст вологи. Тому перед подаванням сировини до реактора доцільно здійснювати сортування, подрібнення та, за необхідності, сушіння [4].

Особливий інтерес становить використання піролізного газу для енергозабезпечення самої установки. Газ, що утворюється під час процесу, може після очищення подаватися до пальникової системи та використовуватися для нагрівання реактора. Такий підхід дає змогу частково або повністю компенсувати зовнішні енергетичні витрати установки та підвищити її загальну енергоефективність [5].

Отже, аналіз наукових досліджень показує, що піроліз є перспективним напрямом комплексної переробки твердих відходів, однак для його ефективної реалізації необхідно враховувати властивості конкретного виду сировини та забезпечувати оптимальний режим роботи реактора.

Мета і завдання досліджень

Метою роботи є дослідження можливостей використання піролізу для утилізації твердих відходів з отриманням корисних газоподібних, рідких і твердих продуктів та оцінювання основних технологічних факторів, що впливають на ефективність процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості піролізної утилізації твердих відходів;
- розглянути основні стадії термічного розкладання органічної сировини;
- визначити вплив температури, вологості та складу сировини на вихід продуктів;
- охарактеризувати основні властивості синтез-газу, піролізної оливи та твердого вуглецевого залишку;
- оцінити енергетичні та екологічні переваги піролізу;
- визначити перспективи практичного застосування піролізних установок.

Основний матеріал досліджень

Піроліз твердих відходів є багатостадійним термохімічним процесом. На першому етапі сировина нагрівається, внаслідок чого з неї видаляється фізично зв'язана волога. Наявність значної кількості вологи є небажаною, оскільки частина теплоти витрачається не на безпосередній термічний розклад органічної речовини, а на нагрівання та випаровування води. Тому попереднє сушіння може підвищувати енергетичну ефективність установки.

Після видалення вологи відбувається інтенсивне розкладання органічної речовини. У процесі нагрівання полімерні та біогенні компоненти руйнуються з утворенням летких речовин і твердого вуглецевого залишку. Леткі компоненти надходять у газову фазу, після чого частина з них конденсується з утворенням рідкої фракції, а частина залишається у вигляді неконденсованого газу [2, 3].

У спрощеному вигляді матеріальний баланс піролізного процесу можна представити як:

Тверді відходи → газ + рідка фракція + твердий вуглецевий залишок.

Кількісне співвідношення між цими продуктами не є постійним. Воно визначається температурою процесу, швидкістю нагрівання, часом перебування продуктів у реакторі, гранулометричним складом та хімічним складом сировини [2].

Одним із найважливіших параметрів є температура. Для багатьох органічних твердих відходів процес піролізу реалізується в широкому температурному діапазоні приблизно 400–700 °C. За нижчих температур збільшується частка твердого залишку та конденсованих продуктів, тоді як підвищення температури сприяє глибшому розкладанню органічних сполук і збільшенню виходу газової фракції [3, 4].

Синтез-газ є одним із найбільш перспективних продуктів піролізу з точки зору його подальшого енергетичного використання. До його складу можуть входити водень, оксид вуглецю, метан, діоксид вуглецю та легкі вуглеводні. Теплотворна здатність газу залежить від складу вихідної сировини та умов процесу. Після очищення від пилу, смол та інших небажаних компонентів газ може спалюватися у топковому пристрої або використовуватися в енергетичних установках.

Важливою перевагою є можливість використання частини отриманого газу для підтримання температурного режиму самого піролізного реактора. У такому випадку формується частково замкнений енергетичний цикл: відходи надходять до реактора, у процесі піролізу утворюється горючий газ, а газ використовується для подальшого нагрівання установки. Це зменшує потребу в зовнішньому паливі та підвищує енергетичну автономність технології.

Другим важливим продуктом є рідка фракція — піролізна олива. Вона являє собою складну суміш органічних речовин, склад якої залежить від виду сировини та режиму процесу. Застосування піролізної оливи як палива потребує оцінювання її фізико-хімічних властивостей та, у багатьох випадках, додаткового очищення. Водночас вона може бути цікавою як сировина для подальшого виділення цінних хімічних компонентів [2].

Твердий продукт піролізу характеризується підвищеним вмістом вуглецю. Для біомаси та деревних відходів такий продукт часто називають біовугіллям. Його властивості визначаються температурою піролізу, тривалістю процесу та характеристиками вихідної сировини. Біовугілля може мати пористу структуру та значну питому поверхню, завдяки чому його можна використовувати як сорбційний матеріал, паливо або сировину для подальшої технологічної переробки.

Важливим технологічним фактором є розмір частинок сировини. Подрібнення сприяє більш рівномірному прогріванню матеріалу та зменшенню внутрішнього температурного градієнта. Для великих частинок тепло передається до внутрішніх шарів повільніше, що може призводити до нерівномірного проходження піролізу. Тому підготовка сировини безпосередньо впливає на стабільність технологічного процесу.

Не менш важливим фактором є вологість. Високий вміст вологи збільшує енергетичні витрати на сушіння та може знижувати температуру в реакторі. Зниження вологості перед піролізом дозволяє більш ефективно використовувати теплоту та створює умови для стабільного перебігу термічного розкладання [4].

Схематично технологічний процес утилізації твердих відходів методом піролізу може бути представлений як послідовність:

підготовка відходів → сортування → подрібнення → сушіння → завантаження в реактор → піроліз → розділення продуктів → очищення газу та рідкої фракції → використання отриманих продуктів.

Екологічна ефективність технології визначається не тільки самим процесом термічного розкладання, а й системою очищення продуктів. Газоподібні продукти перед використанням повинні очищуватися від механічних домішок, смол та інших компонентів, які можуть негативно впливати на обладнання. Застосування сучасних систем очищення дозволяє підвищити безпечність технологічного процесу.

Порівняно із захороненням піроліз забезпечує значно вищий рівень використання ресурсного потенціалу відходів. Замість тривалого зберігання органічної речовини на полігоні вона перетворюється на продукти, які можуть бути повторно залучені до енергетичного або виробничого циклу. Це відповідає принципам циркулярної економіки та ресурсозбереження [1].

Порівняно з прямим спалюванням піроліз має іншу технологічну логіку, оскільки первинним етапом є розкладання органічної речовини в середовищі з обмеженим доступом кисню. Водночас остаточна екологічна ефективність конкретної установки залежить від складу відходів, температурного режиму, герметичності реактора та ефективності систем очищення газів.

Таким чином, технологія піролізу дозволяє розглядати тверді відходи не лише як проблему, що потребує утилізації, а як потенційну вторинну сировину. Поєднання отримання газу, рідкої фракції та твердого вуглецевого залишку створює можливість комплексного використання сировини та зменшення кількості залишкових відходів.

Висновки

Проведений аналіз показав, що піроліз є перспективним методом термохімічної утилізації твердих відходів, який дозволяє одночасно вирішувати декілька завдань: зменшувати обсяги відходів, що направляються на захоронення, повертати частину матеріалів у господарський обіг та отримувати енергетично цінні продукти.

Основною особливістю піролізу є проведення термічного розкладання органічної складової за відсутності або суттєвого обмеження доступу кисню. У результаті утворюються три основні продукти

— газоподібний, рідкий та твердий. Їх вихід і властивості залежать від температури, вологості та складу сировини, швидкості нагрівання та часу перебування продуктів у реакторі [2–4].

Найбільший енергетичний інтерес становить піролізний газ, який після відповідного очищення може використовуватися як паливо. Його застосування для нагрівання реактора дозволяє знизити потребу в зовнішньому паливі та підвищити енергетичну автономність установки. Піролізна олива може розглядатися як альтернативне паливо або сировина для подальшої переробки, а твердий вуглецевий залишок — як паливо, сорбент або вторинний матеріал.

Ефективність піролізу значною мірою залежить від правильної підготовки сировини. Сортування, подрібнення та зниження вологості дозволяють забезпечити більш стабільний процес і ефективніше використання теплоти. Вибір температурного режиму повинен здійснюватися залежно від бажаного співвідношення між газовими, рідкими та твердими продуктами.

З екологічної точки зору піроліз створює можливість суттєво скоротити обсяг твердих відходів, що підлягають остаточному захороненню, та зменшити потребу в нових полігонних потужностях. При цьому необхідною умовою безпечної експлуатації є використання герметичного реактора та ефективної системи очищення газоподібних продуктів.

Отже, подальше вдосконалення піролізних технологій доцільно спрямовувати на підвищення енергетичної ефективності установок, оптимізацію температурних режимів, покращення систем очищення газів та підвищення якості отриманих продуктів. Для умов України перспективним напрямом є створення модульних піролізних установок, здатних працювати з локальними потоками органічних твердих відходів та забезпечувати одночасне отримання енергії й вторинних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Brunner P. H., Rechberger H. Handbook of Material Flow Analysis: For Environmental, Resource, and Waste Engineers. 2nd ed. CRC Press, 2016. DOI: 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.
3. Goh C. S., Choi Y. Thermal pyrolysis of biomass and waste: potential and challenges. Energies. 2020.
4. Zhang Y., Yu Z. Pyrolysis of solid waste: influence of operating conditions on product yield. Chemical Engineering Research and Design. 2021.
5. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. Waste Management. 2012. Vol. 32, No. 4. P. 625–639. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
6. Ковалев О. Перспективи розвитку технологій термічної переробки відходів в Україні. Екологічний вісник. 2022.
7. Czajczyńska D., Anguilano L., Ghazal H., Krzyżyńska R., Reynolds A. J., Spencer N., Jouhara H. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. Energy Procedia. 2017. Vol. 123. P. 387–394.
8. Miandad R., Barakat M. A., Aburiazaiza A. S., Rehan M., Nizami A.-S. Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. Process Safety and Environmental Protection. 2016. Vol. 102. P. 822–838.
9. Chen D., Yin L., Wang H., He P. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. Waste Management. 2014. Vol. 34. P. 2466–2486.
10. Al-Salem S. M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste: A review. Waste Management. 2009. Vol. 29. P. 2625–2643.

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

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