

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2022.1\(488\).6](https://doi.org/10.15589/znp2022.1(488).6)  
УДК 624.3.21

## MODERN METHODS OF PLASTIC WASTE PROCESSING TO REDUCE OCEAN WATER POLLUTION

### СУЧАСНІ СПОСОБИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОД СВІТОВОГО ОКЕАНУ

**B. G. Timochevskiy<sup>1</sup>**

Borys.tymoshevskyy@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-4649-702X

**I. O. Shalapko<sup>2</sup>**

Ivanksua@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-1062-0575

**D. O. Shalapko<sup>3</sup>**

Shalapko.denys@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-4311-3908

**O. V. Litvinenko<sup>4</sup>**

ot443443@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-8252-7882

**Б. Г. Тимошевський<sup>1</sup>,**

докт. техн. наук, професор

**І. О. Шалапко<sup>2</sup>,**

аспірант

**Д. О. Шалапко<sup>3</sup>,**

канд. техн. наук, доцент

**О. В. Литвиненко<sup>4</sup>,**

викладач

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv<sup>1</sup>*

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv<sup>2</sup>*

*Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson<sup>3</sup>*

*Kherson Polytechnic Professional College of Odessa Polytechnic State, Kherson<sup>4</sup>*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв<sup>1</sup>*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв<sup>2</sup>*

*Херсонський навчально-науковий інститут*

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон<sup>3</sup>*

*Херсонський політехнічний фаховий коледж*

*Національного університету «Одеська політехніка», м. Херсон<sup>4</sup>*

**Abstract.** The problem of plastic waste disposal is extremely relevant and of global importance, as world plastics production has a steady upward trend. Currently, the world produces about 400 million tons of various types of plastics, and, according to forecasts, by 2050 only about 12,000 million tons of accumulated plastic waste will be disposed of in landfills or the environment. At the same time polymers practically do not decompose and do not rot that considerably aggravates the current situation. In this regard, the development of effective ways to dispose of waste polymeric materials is one of the priorities of the world community. Recently, the press, scientific publications and patents have published many reports on various areas and methods of processing waste polymeric materials into valuable organic substances. One of such directions is their thermal and thermocatalytic destruction in hydrocarbon fractions, which after appropriate treatment can be used as high-quality motor fuel.

A promising method of disposal of this waste is pyrolysis, which differs favorably from known methods of disposal and has the additional advantage in terms of the possibility of converting plastic waste into different fuels (coke, liquid hydrocarbons, and gaseous fuels). The article summarizes information on the types of polymer pyrolysis, the mechanism of the process, and the fuel formed. Emphasis is placed on the comparative analysis of two main types of pyrolysis of thermal (non-catalytic) and catalytic. The characteristics, ways, and prospects of using pyrolysis products of plastic waste are given. A summary of the existing problems and obstacles that affect the development of different methods of obtaining fuel during pyrolysis is given.

Given the fact that the amount of waste polymer materials is increasing every year, the development of highly efficient technology for their processing into hydrocarbon fuel fractions will create an additional source of motor fuel production and partially solve the problem of its shortage and can be one of the best methods of cleaning the world's oceans from the huge debris stains on the ocean surface.

**Key words:** plastic waste; pyrolysis; liquid fuel; cracking; pyrolysis products; thermal pyrolysis.

**Анотація.** Проблема утилізації пластикових відходів є надзвичайно актуальною і має глобальне значення, оскільки світове виробництво пластмас має стійку тенденцію до зростання. У даний час у світі виробляється близько 400 млн т. різних видів пластмас, і, за прогнозами, до 2050 р. всього близько 12000 млн т накопичених пластикових відходів буде викинуто на звалища або в навколишнє середовище. При цьому полімери практично не розкладаються і не гниють, що значно посилює ситуацію, що склалася. У зв'язку із цим розробка ефективних способів утилізації відходів полімерних матеріалів є одним із першочергових завдань світової спільноти. Останнім часом у пресі, наукових публікаціях та патентах з'явилася багато повідомлень про різні напрями та способи переробки відходів полімерних матеріалів у цінні органічні речовини. Одним із таких напрямків є їх термічна та термокаталітична деструкція у вуглеводневі фракції, які після відповідної обробки можуть бути використані як високоякісне моторне паливо.

Перспективним методом утилізації цих відходів є піроліз, що вигідно відрізняється від відомих способів утилізації і має додаткову перевагу з точки зору можливості перетворення пластикових відходів у різні види палива (кокс, рідке вуглеводневе та газоподібне паливо). У статті узагальнені відомості про види піролізу полімерів, механізм процесу та паливо, що утворюється. Зроблено акцент на порівняльному аналізі двох основних типів піролізу термічного (некаталітичного) та каталітичного. Наведено характеристики, шляхи та перспективи використання продуктів піролізу пластикових відходів. Подано короткий виклад проблем та перешкод, що впливають на розвиток різних способів отримання палива при піролізі.

Ураховуючи той факт, що кількість відходів полімерних матеріалів щорічно збільшується, розробка високо-ефективної технології їх переробки у вуглеводневі паливні фракції дозволить створити додаткове джерело виробництва моторного палива і частково вирішити проблему його дефіциту, що намітилася останнім часом, а також може стати одним із передових методів очищення вод світового океану від величезних сміттєвих плям, які знаходяться на поверхні океану.

**Ключові слова:** пластикові відходи; піроліз; рідке паливо; крекінг; продукти піролізу; термічний піроліз.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Щороку мільйони тон пластикових відходів потрапляють у світовий океан і скупчуються в окремих його районах.

Одна із найвідоміших антропогенних пластикових плям знаходиться у Тихоокеанському «сміттєвому скупченні» (Great Pacific Garbage Patch), що накопичився у північній (субтропічній) частині Тихого океану; зазвичай її називають Великою тихоокеанською сміттєвою плямою (Great Pacific Garbage Patch, GPGP). Розташована між 135°–155° західної довготи та 35°–42° північної широти, за площею цей гігантський «пластиковий острів» більший за Україну, площа якої складає 603 628 км<sup>2</sup>, і містить у шість разів більше пластику, аніж важить уся біомаса планктону Світового океану. За прогнозами британського фонду «Еллен Макартур», до 2025 року на кожні три кілограми риби в світовому океані припадатиме по кілограму сміття, а до 2050 року маса відходів буде вище, ніж сукупна вага всієї риби на Землі. Пластик становить 80% всього сміття в Світовому океані. Під впливом сонячних променів пластикове сміття розпадається на дрібні частинки, які накопичують на своїй поверхні стійкі токсичні речовини. Пластик, який не розчинився, потрапляє в шлунки морських ссавців і птахів. За підрахунками екологів, від цього гинуть десятки тисяч птахів, китів, тюленів, черепах щорічно. Тварини вмирають від задухи або ж нетравне сміття накопичується в їхніх шлунках і заважає їх роботі [1].

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Одним з ефективних методів отримання якісних альтернативних палив з відходів полімерів є безперервний технологічний процес контрольованого крекінгу, що відрізняється відповідним апаратним оформленням і параметрами. Основним завданням при цьому є вибір такого складу обладнання та параметрів процесу, які б дозволили отримати альтернативні палива, близькі за своїми моторними властивостями до стандартних палив. Це дозволить використовувати ці палива в двигунах внутрішнього згоряння без внесення будь-яких конструктивних змін зі збереженням основних показників цих двигунів. Варто відмітити, що у цьому випадку необхідні відповідні регулювання паливної апаратури з метою забезпечення якості та стабільності робочого процесу [2]. Іншим важливим завданням при вирішенні зазначеної проблеми є досягнення таких технохімічних властивостей альтернативних палив, які забезпечили б екологічні показники двигунів на рівні, принаймні, не гірше вимог EURO-4, а також забезпечили б достатню надійність і довговічність цих двигунів в умовах експлуатації.

Для вирішення цього питання фахівцями з лабораторії Центру перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, доктором технічних наук проф. Тимошевським Б. Г. та доктором технічних наук проф. Ткачом М. Р. розроблено схемне та апаратне рішення технологічного процесу переробки відходів термопластичних полімерних відходів в альтернатив-

ні палива. Принципова схема цього технологічного процесу захищена патентом України № 73900 і представлена на рисунку 1.

Технічне рішення складається з двох послідовних технологічних ліній: декомпозиції відходів термопластичних полімерів і отримання рідких вуглеводнів (поліолефінів або альтернативної нафти) з цієї сировини і нафтоперегінної частини, яка дозволяє отримати із зазначеної сировини моторні палива відповідної якості.

Найбільш важливим при реалізації наведеної технології є вибір і підтримання параметрів процесу декомпозиції, який повинен забезпечити отримання рідких вуглеводнів з дуже низьким вмістом важких фракцій (фенолів, альдегідів, жирних кислот, тощо), а також вуглеводнів, що містять галогени.

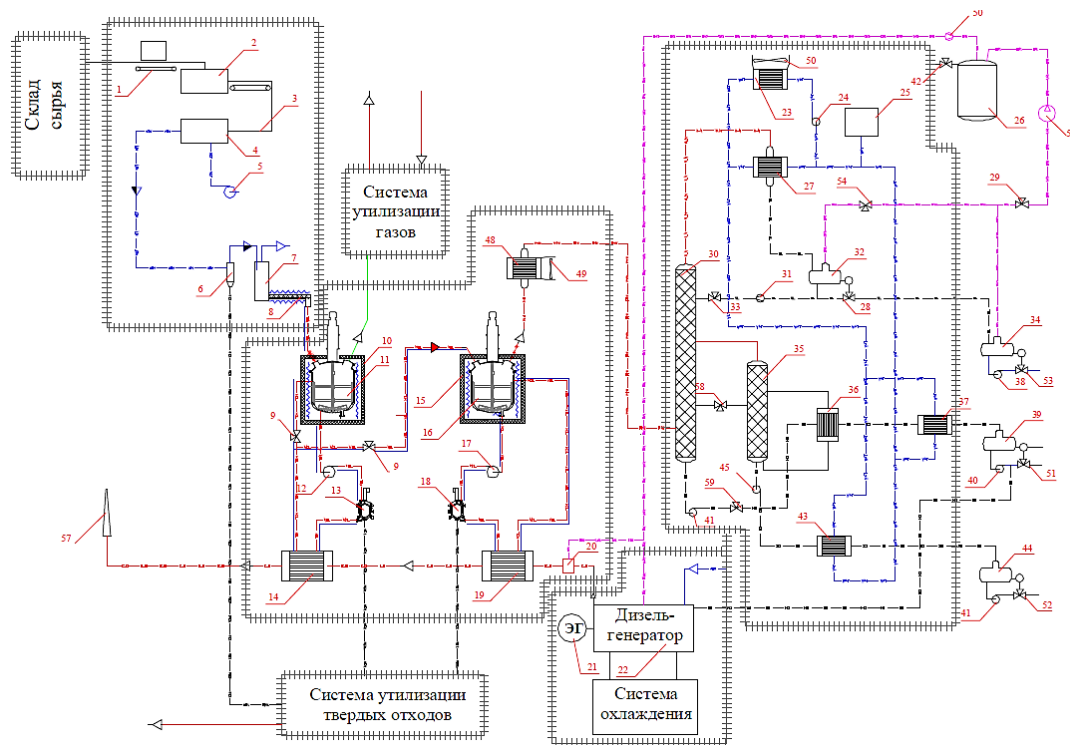
Досягнення таких показників процесу декомпозиції дозволяє в подальшій нафтоперегінній лінії використовувати мінімальний стандартний набір технологічного обладнання і не застосовувати дороге

і енергоємне обладнання для платформінгу, деасфальтизації, депарафінації, гідроочищення та ін. Такий підхід дозволяє істотно знизити вартість альтернативних моторних палив і таким чином підвищити їх конкурентоспроможність.

Основні показники технологічного процесу, реалізованого на експериментальній установці Центру перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, наведені в таблиці 1.

За подібним принципом дії, але значно більшим за розміром та продуктивністю збудована у 2020 році установка УТД-2 компанією «International power ecology company», основні характеристики установки приведені у таблиці 2.

Таким чином, якщо в подальшому вирішити питання щодо монтажу та налагодженні робочого процесу декількох таких установок на судні типу танкер, це дозволить переробляти пластикові відходи, що знаходяться в океані та отримувати альтер-



**Рис. 1.** Принципова схема технологічного процесу отримання альтернативних палив із відходів термопластичних полімерів (патент України № 73900):

1, 3 – конвейер стрічковий; 2, 4 – дробарка; 5 – вентилятор пневмотранспорту; 6 – магнітний циклон-сепаратор; 7 – бункер зрівняльний; 8 – екструдер; 9 – вентиль керований; 10, 15 – електричний елемент; 11 – апарат емсійний; 12 – агрегат циркуляційних насосів; 13, 18 – фільтр; 14 – теплообмінник утилізаційний; 16 – реактор крекінгу; 17 – агрегат циркуляційних насосів; 19 – утилізаційний теплообмінник; 20 – камера згоряння; 21 – електрогенератор; 22 – дизельгенератор; 23 – апарат повітряного охолодження; 24 – насос водяний циркуляційний; 25 – сміть розширювальна; 26 – газовий ресивер; 27 – конденсатор-дефлегматор; 28, 29, 33 – вентиль керований; 30 – ректифікаційна колона; 31 – пристрій дросельний; 32 – цистерна збору бензинових фракцій; 34 – цистерна збірна бензину; 35 – колона відгінна; 36 – теплообмінник; 37 – охолоджувач; 38 – насос перекачування товарного бензину; 39 – цистерна збірна мазутних фракцій; 40 – насос мазутний; 41 – насос дизельного палива; 42 – клапан запобіжний; 43 – теплообмінник; 44 – цистерна збірна дизельних фракцій; 45 – насос

нативне паливо для власних потреб суднової енергетичної установки, заправляти суднові танки для подальшої реалізації альтернативного палива та крекінгового газу.

**Таблиця 1.** Основні показники технологічного процесу отримання альтернативних палив із відходів термопластичних полімерів [2]

Показник	Значення
<b>Вихід технологічних продуктів</b>	
Продуктивність установки, кг/добу.	155
Газ крекінгу, м <sup>3</sup> /добу.	9,5
Бензин, кг/добу.	45,0
Дизельне паливо, кг/добу.	78,0
Котельне паливо, кг/добу.	15,0
<b>Споживання енергії</b>	
Встановлена електрична потужність, кВт/год.	10,0
Енергоємність переробки, (кВт·год)/кг.	1,2
Споживання води (підживлення), кг/добу.	1,5
<b>Відходи</b>	
Коксовий залишок, кг/добу.	6,25
Мінеральний залишок, кг/добу.	1,0

**Таблиця 2.** Основні характеристики установки УТД-2

Показник	Значення
Продуктивність установки, кг/добу	24000
Електрична потужність, кВт/год	220



**Рис. 2.** Піролізна установка УТД-2 на етапі пусконаладжувальних випробувань

Попередньо весь проект можна розділити на стадії: спочатку траленням піднімається велика фракція, подрібнюється і переробляється. Потім методом фільтрації відокремлюються дрібні частинки, які теж прямують на переробку. Важливим питанням також є облаштування біостанції для роботи з живими організмами, захопленими тралами та фільтрами. І звичайно ж, одне із завдань – вирішити безліч супутніх проблем, жодна з яких, однак, не є нерозв’язною вже на даному етапі розвитку технологій.

Після сортування та подрібнення (або минаючи цю стадію, якщо в ній немає необхідності) відходи

подаються в піролізний реактор по системі шнекових герметичних податчиків і просуваються далі по камері. Після стадії сушіння починається стадія термічної деструкції, пластикові відходи починають плавитися та випаровуватися. Проходячи систему фільтрації, гази очищаються від сажі і потрапляють в конденсатор, з якого піролізне паливо, що сконденсувалося, надходить в ємності зберігання. Паливні гази через систему очищення викидаються в атмосферу.

Суть технологічного процесу піролізу полягає у нагріванні вихідної сировини в атмосфері з дефіцитом кисню та подальшому випаровуванні, крекінгу та конденсації вуглеводневих сполук [4]. Не всі типи відходів доцільно утилізувати методом піролізу, але саме відходи пластику піддаються йому найбільш оптимальним чином – з утворенням максимуму корисного продукту та мінімуму відходів процесу. Корисним продуктом у разі переробки пластику є піролізне паливо, що йде на підтримку температури процесу [5].

Через високу теплотворну здатність пластикових відходів установка швидко вийде на режим і далі пластикові відходи перероблятимуть самі себе, що ставить піролізну установку поза конкуренцією з економічної ефективності. За попередніми підрахунками отриманого палива навіть вистачить на генерацію електроенергії.

Вуглецевий залишок вивантажується з реактора герметичним шнековим транспортером і охолоджується в герметичному золоприймачі. Це відхід, однак у випадку з пластиком як вихідна сировина, при невеликому кондиціонуванні, вуглецевий залишок перетворюється на кондиційний технічний вуглець, придатний, наприклад, для виготовлення гумотехнічних виробів.

Як правило, процес термічного піролізу проводиться при високій температурі в діапазоні 500–800 °С, що призводить до утворення летючої фракції, яка може бути розділена на рідке паливо, що конденсується, і не конденсований вуглеводневий газ, твердий кокс або інші тверді залишки. Точний склад паливної фракції, отриманої в результаті піролізу, залежить від властивостей сировини та умов, за яких здійснюється процес: температура, тиск та час перебування в реакторі, а також конструкція реактора [6].

У таблиці 3 наведено результати досліджень характеристик різних пластмас, одержаних методом термогравіметричного аналізу.

З даних, представлених в табл. 3, можна зробити висновок, що полімери мають високий потенціал для отримання з них досить великої кількості рідкого палива шляхом термічного піролізу.

Термічний піроліз – це ендотермічний процес, у якому каталізатори не використовуються. Процес протікає за трьома основними механізмами, описаними вище. Раніше інтенсивно використовувався

піроліз різних типів полімерів, таких як поліпропілен (ПП), поліетилен (ПЕ) та полістирол (ПС). Проте дослідження термічного піролізу таких матеріалів, як поліетилентерефталат (ПЕТ), полівінілхлорид (ПВХ), поліуретан та поліметилметакрилат (ПММА), були нечисленними.

**Таблиця 3.** Термогравіметричний аналіз деяких типів пластиків [7; 8]

Тип пластику	Вологість, % вмісту	Зола, % вмісту	Летючі речовини, % вмісту	Пов'язаний вуглець, % вмісту
ПЕНЩ	0,30	0,00	99,70	0,00
	–	0,40	99,60	–
	0,03	0,12	99,85	0
ПЕВЩ	0,00	0,18	99,81	0,01
	0,00	1,40	98,57	0,03
	0,01	0,22	99,77	0
ПП	0,15	3,55	95,08	1,22
	0	0,36	99,64	0
	0,18	1,99	97,85	0,16
ПЕТ	0,46	0,02	91,75	7,77
	0,22	6,83	86,75	6,2
	0,61	0,00	86,83	13,17
ПВХ	0,80	0,00	93,70	6,30
	0,74	0,00	94,82	5,19
	0	9,11	85,77	5,12
ПС	0,25	0,00	99,63	0,12
	0,30	0,00	99,50	0,20
	0	0,22	99,78	0
Поліамід	0,00	0,00	99,78	0,69

Термічний піроліз полістиролу відбувається легше, ніж піроліз ПП, ПЕ низької щільності (ПЕНЩ) та високої щільності (ПЕВЩ), оскільки ці полімери розкладаються при вищій температурі, тобто мають вищу енергію активації розкладання. Крім того, термічний піроліз ПЕНЩ та ПЕВЩ без використання каталізатора призводить до утворення воску, а не рідкого мастила [8].

При термічному піролізі пластмас утворюється піролізне масло, що містить сполуки з досить довгими вуглеводневими ланцюгами, з низьким октановим числом і з високим вмістом твердих залишків.

При термічному піролізі поліпропілену кінцевий продукт містить ненасичені вуглеводні, що вказує на те, що основними реакціями піролізу є реакції міжмолекулярного перенесення водню та  $\beta$ -диспропорціонування. Оскільки при піролізі ПЕНЩ також відбуваються  $\beta$ -диспропорціонування та реакції міжмолекулярного перенесення водню, то підвищений вміст бензинової та дизельної фракцій у рідких продуктах, що утворюються в результаті термічного крекінгу, явно свідчить про те, що це один з кращих способів перетворення відходів

пластмас в продукти для отримання енергії. Термічний піроліз ПЕВЩ дає рідкий продукт при температурі вище 450 °С [9].

Таким чином, при термічному піролізі на кінцевий результат процесу по-різному впливають склад сировини, обрана температура, тиск, час перебування та конструкція реактора. Однак основною тенденцією є одержання рідкого продукту, який містить сполуки з більш довгим вуглецевим ланцюгом, ніж при піролізі в присутності каталізатора. Термічний піроліз для завершення процесу вимагає вищої робочої температури та більшої тривалості і призводить до більш високого виходу рідкої фракції 58–79,3 %, на другому місці газ 17,7–34 % і потім кокс 0,8–14 %. У разі термічного піролізу кінцевий продукт вимагає додаткової обробки для підвищення його якості [10].

Проведені наукові дослідження показали гарну перспективу використання каталітичного процесу піролізу для перетворення відходів пластмас на рідке паливо. Паливо, що одержується, має покращену якість, при цьому процес піролізу відбувається при більш низькій температурі і більш короткому часі реакції порівняно з термічним піролізом. Крім того, у разі каталітичного процесу правильний вибір відповідного каталізатора дає можливість не лише значно знизити температуру реакції, але й керувати виходом та співвідношенням компонентів продукту [11].

Каталізатор знижує енергію активації таким чином збільшує швидкість реакції розкладання пластиків.

Використання каталізатора знижує витрати енергії через низькотемпературні реакції при піролізі і дає можливість комерційного застосування процесу піролізу [12].

Транспортувати піролізну установку до масового скупчення пластикових відходів не викликає значних складнощів, оскільки обладнання в самому розширеному варіанті монтується в стандартні 40-футові морські контейнери, і розміщення їх на будь-якому судні, навіть невеликого тоннажу, не складе труднощів. Подібні установки чудово зарекомендували себе в роботі на суші і, звичайно ж, вимагатимуть доопрацювання для роботи в морських умовах.

## ВИСНОВОК

Проведений аналіз показує, що піроліз є ефективним способом отримання цінних вуглеводнів з відходів полімерів. Продуктами процесу піролізу є газ, піролізне рідке паливо і кокс.

Однак різні типи пластмас мають різну хімічну структуру та фізичну природу, тому вихід та склад продуктів піролізу може значно різнитися.

Варіювання таких параметрів процесу, як наявність або відсутність каталізатора, тип використовуваного каталізатора, температура і тиск, тип реактора і склад сировини, призводить до зміни співвідношен-

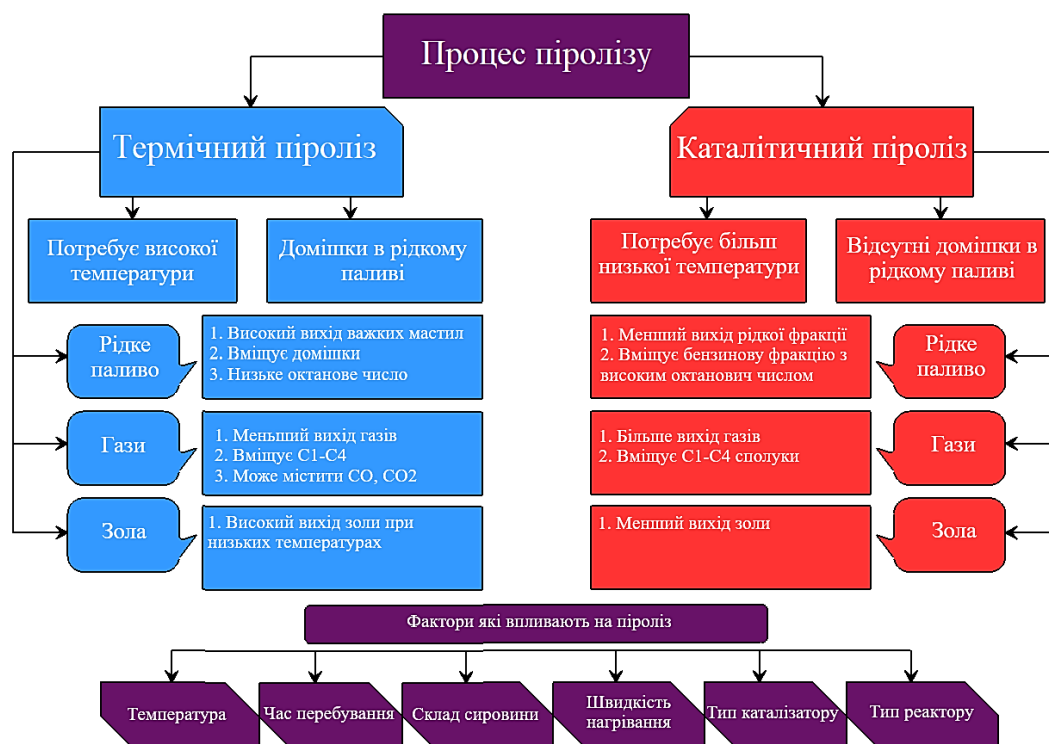


Рис. 3. Порівняння основних показників термічного (некаталітичного) та каталітичних процесів піролізу пластикових відходів [13]

ня компонентів продукту, що отримується, і зміни його якості. Технологія піролізу є кращою, ніж методи термічного розкладання, такі як плазмова газифікація і спалювання, не тільки за своїм мінімальним впливом на навколишнє середовище, але і за нижчими капітальними витратами. Вуглеводневе рідке паливо, що отримується в результаті піролізу пластикових відходів, має у своєму складі ароматичні вуглеводні і характеризується високою теплотворною здатністю. Тому воно може бути використане замість дизельного палива.

Безсумнівно, наведені тут факти є важливими для промислового застосування піролізу з метою утилізації пластикових відходів та отримання палива. Таким

чином, піроліз пластикових відходів може дозволити одночасно вирішити такі важливі завдання:

- 1) скорочення кількості твердих відходів, що зберігаються на полігонах, та відповідно зменшення площі земель, що використовуються для цієї мети;
- 2) часткова заміна цінних корисних копалин.

Також це може бути одним із передових методів для очищення вод світового океану від пластикових відходів одночасно з отриманням альтернативного палива. Це можливе після вдосконалення установки для її роботи на судні та створення конструктивного рішення щодо налагодження роботи декількох установок на одному судні типу танкер з метою заповнення танків альтернативним паливом.

## REFERENCES

- [1] Shafferina, D.A.S., Faisal, A., Wan, M. A.W.D., & Mohamed, K. A. (2020). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 148, 925 – 934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
- [2] Timochevskiy B.G, Tkach M.R, (2009). *Motorni vlastyivosti al'ternatyvnykh palyv, otrymanykh z vidkhodiv polimeriv* [Motor properties of alternative fuels derived from polymer waste]. *Dvyhuny Vnutrishn'oho zhoroyannya no.1*, pp. 83–89.
- [3] Undri, A., Meini, S., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 103, 149 – 158. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.011>
- [4] Aznar, M. P., Caballero, M. A., Sancho, J. A., & Francés, E. (2006). Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.09.006>
- [5] Akubo, K., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2019). Aromatic fuel oils produced from the pyrolysis-catalysis of Polyethylene Plastic with metal-impregnated zeolite catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 92(1), 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.10.009>

- [6] Yan, G., Jing, X., Wen, H., & Xiang, S. (2015). Thermal cracking of Virgin and Waste Plastics of PP and LDPE in a semibatch reactor under atmospheric pressure. *Energy & Fuels*, 29(4), 2289–2298. <https://doi.org/10.1021/ef502919f>
- [7] Almeida, D. (2016). Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. *Thermochemical Waste Treatment*, 133–154. <https://doi.org/10.1201/b19938-12>
- [8] Ma, C., Yu, J., Yan, Q., Song, Z., Wang, K., Wang, B., & Sun, L. (2017). Pyrolysis-catalytic upgrading of brominated high impact polystyrene over Fe and ni modified catalysts: Influence of HZSM-5 and MCM-41 catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 146, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.09.005>
- [9] Oh, D., Lee, H. W., Kim, Y.-M., & Park, Y.-K. (2018). Catalytic pyrolysis of polystyrene and polyethylene terephthalate over Al-MSU-F. *Energy Procedia*, 144, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.015>
- [10] Kabir, G., & Hameed, B. H. (2017). Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 945–967. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.001>
- [11] Wong, S. L., Ngadi, N., Abdullah, T. A. T., & Inuwa, I. M. (2015). Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1167–1180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.063>
- [12] Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M., & Zhou, Z. (2018). Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>
- [13] Munir, M. T., Mardon, I., Al-Zuhair, S., Shawabkeh, A., & Saqib, N. U. (2019). Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109461>

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Shafferina, D.A.S., Faisal, A., Wan, M. A.W.D., & Mohamed, K. A. (2020). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*. 148. P. 925–934. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>.
- [2] Timochevskiy B.G, Tkach M.R, (2009). Motorni vlastyvoiti al'ternatyvnykh palyv, otrymanykh z vidkhodiv polimeriv [Motor properties of alternative fuels derived from polymer waste]. *Dvyhuny Vnutrishn'oho zhoryannya no.1*, pp. 83–89.
- [3] Undri, A., Meini, S., Rosi, L., Frediani, M., & Frediani, P. (2013). Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 103, 149–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.011>.
- [4] Aznar, M. P., Caballero, M. A., Sancho, J. A., & Francés, E. (2006). Plastic waste elimination by co-gasification with coal and biomass in fluidized bed with air in pilot plant. *Fuel Processing Technology*, 87(5), 409–420. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.09.006>.
- [5] Akubo, K., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2019). Aromatic fuel oils produced from the pyrolysis-catalysis of Polyethylene Plastic with metal-impregnated zeolite catalysts. *Journal of the Energy Institute*, 92(1), 195–202. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.10.009>.
- [6] Yan, G., Jing, X., Wen, H., & Xiang, S. (2015). Thermal cracking of Virgin and Waste Plastics of PP and LDPE in a semibatch reactor under atmospheric pressure. *Energy & Fuels*, 29(4), 2289–2298. URL: <https://doi.org/10.1021/ef502919f>.
- [7] Almeida, D. (2016). Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. *Thermochemical Waste Treatment*, 133–154. URL: <https://doi.org/10.1201/b19938-12>.
- [8] Ma, C., Yu, J., Yan, Q., Song, Z., Wang, K., Wang, B., & Sun, L. (2017). Pyrolysis-catalytic upgrading of brominated high impact polystyrene over Fe and ni modified catalysts: Influence of HZSM-5 and MCM-41 catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 146, 1–12. URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.09.005>.
- [9] Oh, D., Lee, H. W., Kim, Y.-M., & Park, Y.-K. (2018). Catalytic pyrolysis of polystyrene and polyethylene terephthalate over Al-MSU-F. *Energy Procedia*, 144, 111–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.015>.
- [10] Kabir, G., & Hameed, B. H. (2017). Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 945–967. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.001>.
- [11] Wong, S. L., Ngadi, N., Abdullah, T. A. T., & Inuwa, I. M. (2015). Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1167–1180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.063>.
- [12] Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M., & Zhou, Z. (2018). Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 287–300. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>.
- [13] Munir, M. T., Mardon, I., Al-Zuhair, S., Shawabkeh, A., & Saqib, N. U. (2019). Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109461>

© Б. Г. Тимошевський, І. О. Шалапко,

Д. О. Шалапко, О. В. Литвиненко

Дата надходження статті до редакції: 07.04.2022

Дата затвердження статті до друку: 19.04.2022